

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

**RESIDUAL DA MISTURA FORMULADA DOS
HERBICIDAS IMAZETHAPYR E IMAZAPIC EM
ÁREAS DE ARROZ SOB DIFERENTES MANEJOS DE
SOLO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Alejandro Fausto Kraemer

Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil

2008

**RESIDUAL DA MISTURA FORMULADA DOS HERBICIDAS
IMAZETHAPYR E IMAZAPIC EM ÁREAS DE ARROZ SOB
DIFERENTES MANEJOS DE SOLO**

por

Alejandro Fausto Kraemer

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

Orientador: Prof. Dr. Enio Marchesan

Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil

2008

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

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

**RESIDUAL DA MISTURA FORMULADA DOS HERBICIDAS
IMAZETHAPYR E IMAZAPIC EM ÁREAS DE ARROZ SOB
DIFERENTES MANEJOS DE SOLO**

elaborada por
Alejandro Fausto Kraemer

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Agronomia

Comissão Examinadora

Enio Marchesan, Dr.
(Presidente/Orientador)

José Alberto Noldin, Dr. (EPAGRI)

Luis Antonio de Avila, Dr. (UFSM)

Santa Maria, 03 de abril de 2008.

DEDICATÓRIA

A minha esposa

Florencia Galdeano

Aos meus filhos

Simon Kraemer

Alejandro Jacques Kraemer

Aos meus Pais

Simon Jacques Syme Kraemer

Paola Massoli

Aos produtores, técnicos e pesquisadores que trabalham com arroz de várzea

AGRADECIMENTOS

À DEUS.

À minha esposa e filhos, pelo apoio, carinho, dedicação neste período e pelas horas de convivência que lhes foram suprimidas.

Ao Instituto Nacional de Tecnologia Agropecuária (INTA Argentina), a Universidade Federal de Santa Maria, e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, pela oportunidade de realização do curso.

Ao professor Enio Marchesan, pela amizade, e inestimável dedicação, ensinamento e orientação durante o curso de Pós-Graduação.

Aos professores Luis Antonio de Avila e Sérgio Luiz de Oliveira Machado, pela co-orientação e amizade.

Aos professores das diferentes disciplinas do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, pelos qualificados ensinamentos oferecidos.

Aos colegas da EEA INTA Corrientes, pela amizade e colaboração durante estes dois anos.

Aos estagiários e ex-estagiários do Setor de Agricultura da Universidade Federal de Santa Maria, em especial aos bolsistas, Mara Grohs, Jefferson Fontoura, Paulo Fabrício Sachet Massoni e Gerson Meneguetti pelo apoio nos trabalhos de pesquisa.

Aos colegas do curso de Pós-Graduação em Agronomia, em especial aos colegas Edinalvo Rabaioli Camargo, Melissa Walter e Ramon Méndez La Rosa, pelo convívio, amizade e colaboração.

Ao Senhor Alex Fabiano Guiliani, Funcionário do Departamento de Fitotecnia; da UFSM pelo apoio e colaboração oferecida nos trabalhos em campo.

À todos meus novos amigos que tornaram minha vida em Santa Maria, mais feliz e agradável, contribuindo direta ou indiretamente com o êxito do trabalho, os meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

Dissertação de Mestrado em Agronomia
Programa de Pós-Graduação em Agronomia
Universidade Federal de Santa Maria

RESIDUAL DA MISTURA FORMULADA DOS HERBICIDAS IMAZETHAPYR E IMAZAPIC EM ÁREAS DE ARROZ SOB DIFERENTES MANEJOS DE SOLO

AUTOR: Alejandro Fausto Kraemer

ORIENTADOR: ENIO MARCHESAN

Santa Maria, 27 de março de 2008.

O arroz-vermelho (*Oryza* spp.) é um dos principais fatores limitantes da produtividade de grãos do arroz irrigado (*O. sativa* L.) no mundo e em particular do estado do Rio Grande do Sul (RS) Brasil. A tecnologia Clearfield® é uma ferramenta viável e eficiente para o controle desta planta daninha, mediante o uso de herbicidas da família das imidazolinonas junto com cultivares tolerantes a estes herbicidas. No entanto, os herbicidas podem permanecer no solo após o cultivo, em quantidade que pode comprometer a utilização futura da área com outras culturas, ou mesmo com cultivares de arroz não tolerante (NT). A permanência destes herbicidas no solo é muito dependente das condições ambientais e de solo, aumentando sua persistência em solos com pH baixos, com altos conteúdos de matéria orgânica (MO), argila e em condições de anaerobioses. A principal via de dissipação destes herbicidas é a microbiana, podendo também, sofrer fotólises ou serem lixiviados para fora da área de absorção das raízes. Foram conduzidos dois experimentos sob solo de várzea, em Santa Maria-RS no ano agrícola 2006/07. O primeiro experimento (Capítulo II) teve como objetivo determinar o efeito de nove manejos de solo (quatro sob plantio direto ou semidireto e cinco sob plantio convencional), na fitotoxicidade do arroz não tolerante. O efeito residual do herbicida Only® afetou o estande de plantas, perfilhamento, número de panículas e a estatura da cultivar não tolerante IRGA 417, porém não afetou a produtividade de grãos. O revolvimento do solo diminuiu a atividade do herbicida na camada superficial de solo (0-3 cm), embora não tenha afetado as variáveis analisadas. O segundo experimento (Capítulo III) teve como objetivo determinar o efeito de dois manejos de solo, plantio direto (PD) e plantio convencional (PC), na degradação e lixiviação do imazethapyr. Ocorreu maior degradação de imazethapyr no PC do que no PD. Imazethapyr lixiviou até 20 cm, independente do sistema de cultivo. No PC existe uma distribuição uniforme do imazethapyr nos primeiros 15 cm de solo e no PD existe menor concentração de imazethapyr de 0-5 cm, e acúmulo do herbicida de 5-15 cm de profundidade.

Palavras-chave: imidazolinonas, degradação de herbicidas, residual de herbicida, preparo de solo, percolação de herbicidas, lixiviação, *Oryza sativa*

ABSTRACT

M.S. Dissertation in Agronomy
Programa de Pós-Graduação em Agronomia
Universidade Federal de Santa Maria

RESIDUALS FROM TWO HERBICIDES IMAZETHAPYR AND IMAZAPIC ON PADDY RICE WITH DIFFERENTS SOIL MANAGEMENTS

AUTHOR: ALEJANDRO FAUSTO KRAEMER

ADVISER: ENIO MARCHESAN

Santa Maria March 27, 2008.

Red rice (*Oryza* spp.) is one of the main limiting factors of rice yield (*O. sativa* L.) in the world and particularly in the Rio Grande do Sul (RS) state Brazil. The Clearfield® technology is a viable and efficient tool for controlling such harmful plant by using imidazolinone herbicides in tolerant cultivars. However, herbicides may persist on the soil after the crop season in amount that could affect the future use of the area with other crops as well as with non tolerant rice cultivars. The persistence of this kind of herbicides is highly dependent on the soil's environmental conditions. It increases in low pH soils with high organic matter (MO) content, and under anaerobic conditions. The main way of herbicide dissipation is the biodegradations; they can be photolysis or be lixiviated bellow the roots absorption region.

Two field experiments were carried out on lowland soil in Santa Maria-RS during 2006/2007. The first experiment (Chapter II) had the objective of determining the effect of nine soil tillages (four on no till or minimum till seeping and five, on conventional tillage) on the phytotoxicity of non tolerant rice.

The residual effect of the herbicide Only® affected plants stand, tillering, panicle number and plant heights of cultivar IRGA 417, but did not affect the grain yield. Soil plowing decreased herbicide activity on the soil surface (0-3 cm) without affecting the variables assayed. The second experiment (Chapter III) had the objective of determining the effect of two soil tillages (no till- PD- and conventional tillage-PC) on imazethapyr degradation and leaching. Higher degradation of imazethapyr was registered on PC than on PD. Imazethapyr leaching until 20 cm regardless the tillage system. In PC, a uniform distribution of imazethapyr was observed in the first 15 cm of soil while in PD there was a lower concentration of imazethapyr at 0-5 cm, which accumulated at 5-15 cm deep.

Key words: imidazolinone, herbicide degradation, herbicide residual, soil preparation, herbicide percolation, lixiviation, *Oryza sativa*

LISTA DE TABELAS

- TABELA - 1 Estande de plantas por m² aos 10 e 17 dias após emergência (planta m⁻² 10 DAE) (planta m⁻² 17DAE), número de colmos por m² (colmos m⁻²), estatura de plantas em cm (estatura (cm)), número de panículas por m² (panículas m⁻²), esterilidade de espiguetas (% esterilidade), número de grãos por panículas (grãos/panícula), peso de 1000 grãos em g (peso 1000 grãos) e produtividade de grãos em kg ha⁻¹ (produtividade de grãos.), para nove preparos do solo (PS) e duas cultivares em resposta ao efeito residual de dois anos dos herbicidas imazethapyr e imazapic (75+25 g a.i. ha⁻¹) (Only®). Santa Maria, RS. 2006/07.....35
- TABELA - 2 Dados do bioensaio. Fitotoxicidade residual dos herbicidas imazethapyr e imazapic e estatura de plantas (cm) do tomateiro 15 dias após emergência, semeados sobre amostras de solo coletadas das parcelas plantio direto (PD), quatro preparos de solo, pousio e testemunha, a duas profundidades, 0-3 cm e 3-6 cm.....58
- TABELA - 3 Dados do bioensaio. Fitotoxicidade residual dos herbicidas imazethapyr e imazapic e estatura de plantas (cm) do tomateiro 15 dias após emergência, semeados sobre amostras de solo coletadas das parcelas plantio direto (PD), quatro preparos de solo, pousio e testemunha, a duas profundidades, 0-3 cm e 3-6 cm.....59

LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1 - Herbicidas imidazolinonas: a) imidazolinona piridina, b) benzeno imidazolinona e c) imidazolinona quinolina. Imidazolinona piridina dividido segundo o radical (R) em imazapyr: R = H, imazapic: R = CH₃, imazethapyr: R = CH₃—CH₂, e imazamox: R = CH₃—O—CH₂. Extraído de Tan et al. (2005).....16
- FIGURA 2 - Curva teórica de titulação das imidazolinonas calculada com a equação de Henderson-Hasselbalch.....19
- FIGURA 3 - Fitotoxicidade da mistura formulada de imazethapyr e imazapic (75+25 g ha⁻¹) na cultivar IRGA 417 semeada após um ano da última aplicação dos herbicidas, num sistema com dois anos de uso dos herbicidas, em cinco épocas de avaliação e nove preparos de solos: plantio direto (PD); plantio direto mais azevém (PDA); um preparo de solo (PS) em abril (1PSA); um PS em abril mais azevém (1PSAA); um PS em outubro (1PSO); dois PS em maio e outubro (2PSMO); dois PS em abril e outubro (2PS); três PS em abril, maio e outubro (3PS); quatro PS em abril, maio, agosto e outubro (4PS). Santa Maria, RS, 2006/07.....32
- FIGURA 4- Concentração de imazethapyr, expressa em µg de ingrediente ativo por kg de solo (µg kg⁻¹), para dois manejos de solo, plantio convencional (PC) e plantio direto (PD) e quatro profundidades 0-5, 5-10; 10-15 e 15-20 cm após a coleta do arroz no terceiro ano num sistema de rotação dois anos arroz Clearfield e um ano arroz convencional.....42
- FIGURA 5 - Profundidade do lençol freático durante o período de entressafra (abril-outubro de 2006) em solo de várzea, registradas na área do experimento.....44

- FIGURA 6 - Dados bioensaio. Fitotoxicidade residual dos herbicidas imazethapyr e imazapic em tomateiro 15 dias após emergência, semeados sobre amostras de solo coletadas das parcelas plantio direto (PD), quatro preparos de solo, pousio e testemunha, a duas profundidades, 0-3 cm e 3-6 cm.....59
- FIGURA 7 - Temperaturas médias diárias do ar e temperatura média diária do solo aos três centímetros para os manejos de solo, plantio direto (PD) e plantio convencional com quatro preparos de solo (4PS) durante o período de entressafra (abril-outubro de 2006).....60
- FIGURA 8 - Porcentagem de umidade do solo, nos primeiros 5 cm, para nove preparos de solo, durante o período de entressafra (abril-outubro de 2006) em solo de várzea, registradas na área do experimento e o conteúdo de umidade a capacidade de campo (CC) determinada no laboratório de física de solos da UFSM.....60
- FIGURA 9 - Produção de azevém em kg/ha de massa seca para plantio direto (PD) e plantio convencional (PC), durante o período de entressafra (abril-outubro de 2006) em solo de várzea, na área do experimento.....61

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	10
-----------------	----

CAPÍTULO

I	COMPORTAMENTO AMBIENTAL DOS HERBICIDAS DO GRUPO DAS IMIDAZOLINONAS.....	13
	Resumo	13
	Abstract	14
	Introdução	14
	Mecanismo de ação.....	15
	Estrutura química.....	15
	Fatores que afetam o comportamento das imidazolinonas no solo.....	16
	Sorção.....	16
	Fotólises.....	21
	Hidrólises.....	23
	Degradação microbiana.....	23
	Lixiviação.....	24
	Considerações finais.....	25
II	MANEJO DO SOLO DE VÁRZEA E A PERSISTÊNCIA DOS HERBICIDAS IMAZETHAPYR E IMAZAPIC	26
	Resumo	26
	Abstract	26
	Introdução	27
	Material e Métodos	29
	Resultados e discussão	31
	Conclusão	36

III	LIXIVIAÇÃO DO IMAZETHAPYR EM DOIS SISTEMAS DE MANEJO DE SOLO DE VÁRZEA.....	37
	Resumo	37
	Abstract	38
	Introdução	38
	Material e Métodos	40
	Resultados e discussão	41
	Conclusão	44
	SUGESTÕES DE MANEJO.....	46
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	47
	APÊNDICES.....	58

INTRODUÇÃO

O arroz é uma das culturas mais importantes no mundo, cultivada em todos os continentes, somando em torno de 150 milhões de hectares no ano 2004 (AZAMBUJA et al., 2004) com uma produção mundial de 636,7 milhões de toneladas base casca (MÉNDEZ DEL VILLAR, 2007). É a principal fonte de alimento, sendo a responsável da alimentação de mais da metade da população mundial (LU, 2007). Contribui com 23% de todas as calorias, quase o mesmo que o aporte do milho e trigo juntos, transformando-o na principal fonte mundial de consumo direto de calorias (RIDEELL & GUJJA, 2007). O Brasil é o nono produtor mundial de arroz com cerca de 10,6 milhões de toneladas, das quais o 68% é originado de arroz irrigado, semeado principalmente nos estados de Santa Catarina (SC) e Rio Grande do Sul (RS) (AZAMBUJA et al., 2004). De acordo com os mesmos autores, no RS semeia-se em torno de um milhão de hectares, com uma produtividade média em torno das seis t ha⁻¹, representando 25% da área cultivada e contribuindo com mais de 50% do total do arroz produzido no Brasil.

Embora no RS a produtividade média seja relativamente alta, existem sérios problemas de infestação com arroz-vermelho, sendo o principal inconveniente das lavouras nesta região. Com o desenvolvimento da tecnologia Clearfield[®] foi possível controlá-lo eficientemente, mediante o uso conjunto de cultivares tolerantes às imidazolinonas e a mistura formulada dos herbicidas imazethapyr e imazapic (Only[®]) com 75 e 25 g i.a. L⁻¹, respectivamente (VILLA et al., 2006; SANTOS et al., 2006). No entanto, os herbicidas podem permanecer no solo após o cultivo, em quantidade que pode comprometer a utilização futura da área com outras culturas, ou mesmo com cultivares de arroz não tolerante. Os danos causados às culturas em sucessão são variáveis dependendo das condições físicas, químicas e de manejo do solo, entre outros fatores. Foram determinados diferentes níveis de danos por fitotoxicidade do residual de imazethapyr, imazapic ou Only[®] sobre, alfafa, algodão, aveia, azevém, batata, beterraba açucareira, canola, cebola, ervilha, girassol, linho, melão, milho, mostarda, pimenta, pimentão, repolho, sorgo, trigo e tomate (BOVEY & SENSEMAN, 1998; ALISTER & KOGAN, 2005; PINTO et al., 2007a). Em arroz não-tolerante, VILLA et al., (2006) determinaram menor estande de plantas por efeito residual do herbicida Only[®], porém sem efeito na produtividade. No entanto

MARCHESAN et al., (2007a e b) determinaram perdas de produtividade de 19 e 30% por efeito do residual desse herbicida sobre arroz suscetível, um ano após a aplicação do herbicida e os sintomas de fitotoxicidade foram observados dois anos após a aplicação. Nesse sentido, ZHANG et al., (2000) determinaram redução na produtividade de arroz de 69% pelo efeito residual de imazethapyr. PINTO et al., (2007b) determinaram redução na biomassa aérea e radicular de arroz suscetível, sendo que o efeito residual do herbicida relacionou-se com as doses aplicadas no último ano, não havendo acúmulo de efeito pelo emprego de anos consecutivos do sistema Clearfield®. MASSONI et al. (2007) observaram efeito residual desse herbicida sobre o arroz suscetível, 358 dias após a aplicação e para WILLIAMS et al., (2002), devem transcorrer 540 dias (18 meses) entre a aplicação de imazethapyr e a semeadura de arroz não-tolerante.

A dissipação destes herbicidas no solo é muito dependente das condições ambientais e das características do solo, quando as condições favorecem a adsorção dos herbicidas à matriz do solo, a persistência destes aumenta e quando favorecem o desenvolvimento dos microorganismos a persistência diminui. Solos com pH inferiores a 6,5, e com maior conteúdo de matéria orgânica (MO), a adsorção e a persistência destes herbicidas aumenta (WANG & WEIPING, 1999; MADANI et al., 2003; FERNANDES DE OLIVEIRA et al., 2004). No entanto, solos bem aerados, com umidade adequada e temperatura em torno de 30 °C aumenta a degradação destes herbicidas (BASHAM & LAVY, 1987; FLINT & WITT, 1997). A principal via de degradação destes herbicidas no solo é por ação de microorganismos (LOUX & REESE, 1993; FLINT & WITT, 1997). Estes herbicidas também podem sofrer fotólises (CURRAN et al., 1992a) ou serem lixiviados para fora da região de absorção das plantas (JOURDAN et al., 1998; McDOWELL et al., 1997). A degradação biológica ocorre principalmente pela ação de microorganismos aeróbicos, sendo praticamente nula em condições de anaerobiose (SHANER & O'CONNOR, 1991). Devido a isto, em solos cultivados com arroz irrigado é de se esperar comportamentos diferentes aos observados em condições de sequeiro, existindo pouca degradação dos herbicidas durante o período de alagamento, aumentando a persistência e o risco de contaminação ambiental, sendo muito importante neste processo, o manejo da área durante o período de entressafra. Evidências teóricas sugerem que a utilização de práticas de manejo que estimulem a degradação de herbicidas no solo durante este período, possam reduzir o residual

destes e minimizam os danos aos cultivos subseqüentes e o risco de contaminação ambiental. Isso porque os processos biológicos estariam sendo influenciados por fatores ambientais, tais como umidade, temperatura e aeração, os quais estão relacionados às práticas de preparo do solo (SOON & ARSHAD, 2005; PEREZ et al., 2005), sendo que a atividade microbiana incrementa em média, 57%, após um preparo do solo (FRANCHINI et al., 2007).

Existem vários trabalhos de pesquisa que estudaram o comportamento das Imidazolinonas no solo em condições de sequeiro. No entanto, há poucos estudos na literatura nacional e internacional do comportamento destes herbicidas em condições de anaerobiose, sendo necessário estudar o comportamento destes herbicidas, em condições de solos alagados. Em vista do exposto, o presente trabalho teve por objetivo conhecer o comportamento das imidazolinonas no solo, determinar o efeito de diferentes manejos do solo, sobre a fitotoxicidade residual do herbicida Only[®], em arroz não tolerante e na degradação e posicionamento em profundidade do herbicida imazethapyr, em área de várzea cultivado com arroz.

CAPÍTULO I

COMPORTAMENTO AMBIENTAL DOS HERBICIDAS DO GRUPO DAS IMIDAZOLINONAS

ENVIRONMENTAL FATE OF THE IMIDAZOLINONES HERBICIDES – A REVIEW

Resumo

Os herbicidas do grupo das imidazolinonas controlam um amplo espectro de plantas daninhas, sendo absorvidos pelas raízes e folhas e translocados por floema e xilema, acumulando-se nos pontos de crescimento. Atuam inibindo a enzima acetolactato sintase (ALS), essencial no processo de síntese de aminoácidos de cadeia ramificada em plantas. Quando aplicados nas lavouras, uma proporção significativa deles atinge o solo, onde são passíveis de serem absorvidos pelas raízes das plantas, sorvidos aos colóides do solo, ou dissolvidos na solução do solo, podendo sofrer fotólise, hidrólise, ou degradação microbiana. Condições ambientais do solo como temperatura, umidade, aeração, textura, matéria orgânica (MO) e pH, entre outras, afetam o comportamento destes herbicidas. Podem ser transportados por escoamento superficial e/ou por lixiviação para fora da região de absorção das raízes, podendo atingir fontes de água superficiais e subterrâneas. Além disso, a alta persistência e solubilidade em água fazem com que apresentem alto potencial de contaminar o ambiente e afetar cultivos subseqüentes.

Palavras-chave: degradação de herbicidas, degradação microbiana, fotólise, hidrólise, mecanismo de ação, persistência, sorção

Abstract

Imidazolinones is a group of herbicides that control a wide variety of weeds. They are absorbed by roots and leaves and transported through phloem and xylem, accumulating in the growing point. They inhibit the enzyme acetolactate synthase (ALS), which synthesizes the branched chain amino acids. When used in the field, a large portion of these herbicides reach the soil, where they can be absorbed by the roots of plants, sorbed into the soil colloids, or dissolved in soil solution, going through photolysis, hydrolysis or microbial degradation. Soil conditions such as temperature, moisture, aeration, texture, organic matter (OM), pH, and others, affect the behavior of these herbicides in the environment. They can be transported by runoff and/or leaching, and reaching superficial and ground water bodies. Besides, due to their high persistence and solubility in water they have a relatively high potential to contaminate the environment and affect rotational crops.

Key Words: herbicide degradation, biodegradation, photolysis, hydrolysis, mode of action, persistence, sorption.

Introdução

Existem evidências de que os lençóis subterrâneos e corpos de água superficiais são contaminados por pesticidas provenientes da agricultura. Segundo a agência de proteção ambiental dos EUA (USEPA 1992, 1993) 14% das amostras de água obtidas de lençóis freáticos, 165.000 km de rios e 830.000 ha de lagos e reservatórios de água dos EUA apresentam algum nível de contaminação. As imidazolinonas apresentam alto risco de contaminar fontes de água por sua alta persistência no ambiente e alta solubilidade em água. Nos EUA, foram encontrados 16 herbicidas pertencentes às famílias das sulfonilureias, sulfonamidas e imidazolinonas em amostras coletadas de águas superficiais e subterrâneas (BATTAGLIN et al., 2000). Foi determinado que ao menos um dos herbicidas esteve presente em 83% das amostras analisadas, e o herbicida mais frequentemente encontrado foi o imazethapyr, detectado em 71% das amostras. Também foram encontrados traços de imazapyr em águas subterrâneas após oito anos de sua aplicação para o controle de plantas em ferrovias (BORJESSON et al., 2004).

Além disto, existe o problema da permanência das imidazolinonas no solo, em quantidade que pode comprometer a utilização futura da área com culturas não tolerantes. Há relatos indicando danos de fitotoxicidade sobre alfafa, algodão, arroz, aveia, azevém, batata, beterraba açucareira, canola, ervilha, girassol, linho, melão, milho, pimenta, pimentão, repolho, sorgo, trigo e tomate (ALISTER & KOGAN, 2005; PINTO et al., 2007a).

Mecanismo de ação

As imidazolinonas controlam um amplo espectro de plantas daninhas, incluindo gramíneas, ciperáceas e latifoliadas. São absorvidas pelas raízes e folhas, sendo translocadas pelo floema e xilema, acumulando-se nos pontos de crescimento. O controle é proporcionado pela inibição da enzima acetolactato sintetase (ALS), essencial no processo de síntese de aminoácidos de cadeia ramificada (valina, leucina e isoleucina). O efeito fitotóxico das imidazolinonas é causado pela deficiência destes aminoácidos, provocando a diminuição na síntese de proteínas e de DNA, na divisão celular, na translocação de fotossintatos aos pontos de crescimentos. Isto provoca redução no crescimento das plantas, no alongamento das folhas e cloroses entre as nervuras (SHANER & SINGH, 1993).

Estrutura química

Os herbicidas que fazem parte das imidazolinonas incluem imazapyr, imazapic, imazethapyr, imazamox, imazamethabenz e imazaquin, contendo em suas moléculas uma estrutura em comum, o imidazol, separando-se em três subgrupos baseados em uma segunda estrutura cíclica (Figura 1). Imazaquin tem um grupo quinolina, imazamethabenz tem um anel benzeno e as outras imidazolinonas um anel piridina. A este último grupo, piridina imidazolinonas, pertence quatro moléculas que se diferenciam por um radical unido ao carbono cinco do anel piridina. Imazapyr apresenta um hidrogênio (H) no lugar do radical (R), imazapic um grupo metil (CH₃), imazethapyr um grupo etil (CH₃-CH₃), e imazamox um grupo metoximetil (CH₃-O-CH₃).

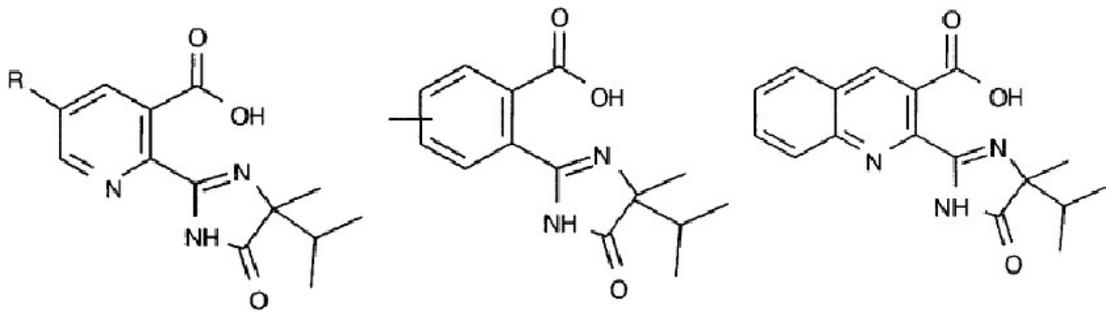


Figura 1 - Herbicidas imidazolinonas: a) imidazolinona piridina, b) benzeno imidazolinona e c) imidazolinona quinolina. Imidazolinona piridina dividido segundo o radical (R) em imazapyr: R = H, imazapic: R = CH₃, imazethapyr: R = CH₃—CH₂, e imazamox: R = CH₃—O—CH₂. Extraído de Tan et al. (2005).

Existem diferenças na intensidade de inibição da enzima ALS entre os grupos, (quinolina, benzeno e piridina), sugerindo que, além do grupo imidazol, estes também são importantes na inibição da ALS. Os diferentes radicais do grupo piridina apresentam pouca atividade na inibição da ALS, mas exerce um efeito diferencial sobre o comportamento no ambiente (TAN et al., 2005).

Fatores que afetam o comportamento das imidazolinonas no solo

Quando um herbicida é aplicado na lavoura, uma alta proporção atinge o solo, seja por contato direto, por escorrimento das folhas, ou quando a planta morre e é incorporada ao solo. Uma vez no solo, o herbicida pode ser absorvido pelas raízes das plantas, sorvido pelos colóides do solo, dissolvido na solução do solo, sofrer fotólise, hidrólise, ou degradação microbiana. Também pode ser transportado para fora da região de absorção das raízes, por lixiviação ou escorrimento superficial, podendo contaminar fontes de água superficiais ou subsuperficiais.

Sorção

A sorção dos herbicidas no solo é o processo mais importante, porque determina quanto do herbicida ficará retido na matriz do solo e quanto ficará disponível na solução do solo, afetando a absorção pelas plantas, degradação microbiana, fotólise, lixiviação e transporte. Vários estudos demonstram que a sorção das imidazolinonas aos colóides do solo depende de diversos fatores, como

pH, matéria orgânica (MO), textura, umidade e temperatura, e que por sua vez, variam em sua influência, dependendo do lugar e do momento. Isto dificulta a obtenção de uma recomendação única, tanto do ponto de vista agrônomo, como ambiental. A sorção acontece muito rápida, antecipando-se aos outros processos, regulando-os, sendo que para imazapyr, mais de 90% é alcançada na primeira hora e o equilíbrio sorção-desorção é atingido em 20 horas (WANG & WEIPING, 1999), e para imazethapyr, a sorção é completada entre 15 minutos e uma hora (MADANI et al., 2003).

A temperatura é um fator importante na sorção dos pesticidas. Em geral as quantidades sorvidas de pesticidas decrescem com aumentos da temperatura (BIGGAR & CHEUNG, 1973; FUSI et al., 1993). O contrário acontece com as imidazolinonas, sendo que para imazapyr as porcentagens de sorção aumentaram com o aumento da temperatura, sendo um processo endotérmico (JENKINS et al., 2000; WANG & WEIPING, 1999).

Outro fator importante é a umidade do solo, que favorece a sorção destes herbicidas, atuando como meio de difusão das moléculas para as superfícies externas e para os poros internos da matriz do solo (PIGNATELLO & XING, 1996; EHLERS & LOIBNER, 2006). Embora em condições de alta umidade seja favorecida a desorção, como efeito da maior diluição do herbicida (AVILA, 2005).

Os resultados de pesquisa sobre o efeito do conteúdo de argilas na retenção destes herbicidas são diferentes, alguns sugerem que aumenta a sorção (WEI & WEIPING, 1998; LOUX, et al., 1989) enquanto outros sugerem que o conteúdo de argila não afeta a sorção das imidazolinonas (LEON & CARL, 2001; MADAMI et al., 2003). Estas diferenças podem estar relacionadas ao pH do solo. A MO e argila aumentam a sorção das imidazolinonas ao solo, por ter uma grande superfície específica. O principal mecanismo que envolve a sorção das moléculas de pesticida à MO é a partição hidrofóbica. No entanto, os mecanismos de interação, com as cargas positivas das argilas, e superfícies dos óxidos de Fe e Al, com as moléculas destes herbicidas ocorre principalmente por mecanismos de troca aniônica e/ou formação de ligantes. Porém, este tipo de interação passa a ter relevância apenas em solos com baixo teor de carbono orgânico, sendo desprezível em solos agrícolas.

O pH da solução do solo, juntamente com a MO, são os fatores que mais influenciam na dinâmica destes herbicidas (KOSKINEN & HARPER, 1990). As

moléculas das imidazolinonas apresentam um comportamento anfótero, possuindo um grupo carboxílico (ácido) e um grupo amino (básico) como grupos funcionais, comportando-se como ácidos ou bases fracas respectivamente. O coeficiente de ionização (pKa) para imazethapyr e imazapyr é de 3,9 e 3,6 no grupo carboxílico e de 2,1 e 1,9 no grupo amino, respectivamente; já para imazaquin 3,8, para imazamox 3,3, e para imazapic 3,9 no grupo carboxílico (SENSEMAN, 2007). Para ácidos fracos, quando o pH da solução do solo é igual ao pKa, as moléculas encontram-se 50% associadas ou neutras (COOH) e 50% dissociadas ou aniônicas (COO⁻). Caso o pH seja maior que o pKa, predominam as moléculas COO⁻, e se o pH for inferior ao pKa, predominam as moléculas COOH (Figura 2). Já para bases fracas, quando o pH da solução do solo for igual ao pKa 50% das moléculas estarão associadas e positivas e 50% delas sem carga. Quando o pH for menor que o pKa, predominam moléculas positivas e quando for maior que pKa predominam moléculas neutras.

Com valores de pH elevados, a sorção destes herbicidas é reduzida, em decorrência do predomínio da forma COO⁻ das moléculas, as quais seriam repelidas pelas cargas negativas da matriz do solo, permanecendo mais biodisponível na solução do solo. Com pH baixo, o número de moléculas COOH ou protonadas (NH⁺) aumenta (MADANI et al., 2003; FERNANDES DE OLIVEIRA et al., 2004). A protonação do grupo amino para imazethapyr e imazapyr só ocorreria com pH próximo de três, o que não é comum em solos agrícolas. Embora BRESNAHAM et al., (2000), consideram que na camada difusa perto das argilas o pH é dois pontos menor que o pH da solução do solo, gerando em solos ácidos condições propícias para acontecer a protonação da molécula, aumentando a adsorção aos colóides do solo, logo de transcorrido três meses de aplicado o herbicida. Quando a proporção de moléculas associadas aumenta, o herbicida fica menos solúvel, aumentando as interações hidrofóbicas com a MO, ficando menos biodisponível, aumentando a persistência. Quando o valor do pH da solução do solo está próximo ao pKa, pequenas variações no pH significam grandes mudanças nas proporções de moléculas COO⁻ e COOH (Figura 2), influenciando a persistência do herbicida no solo.

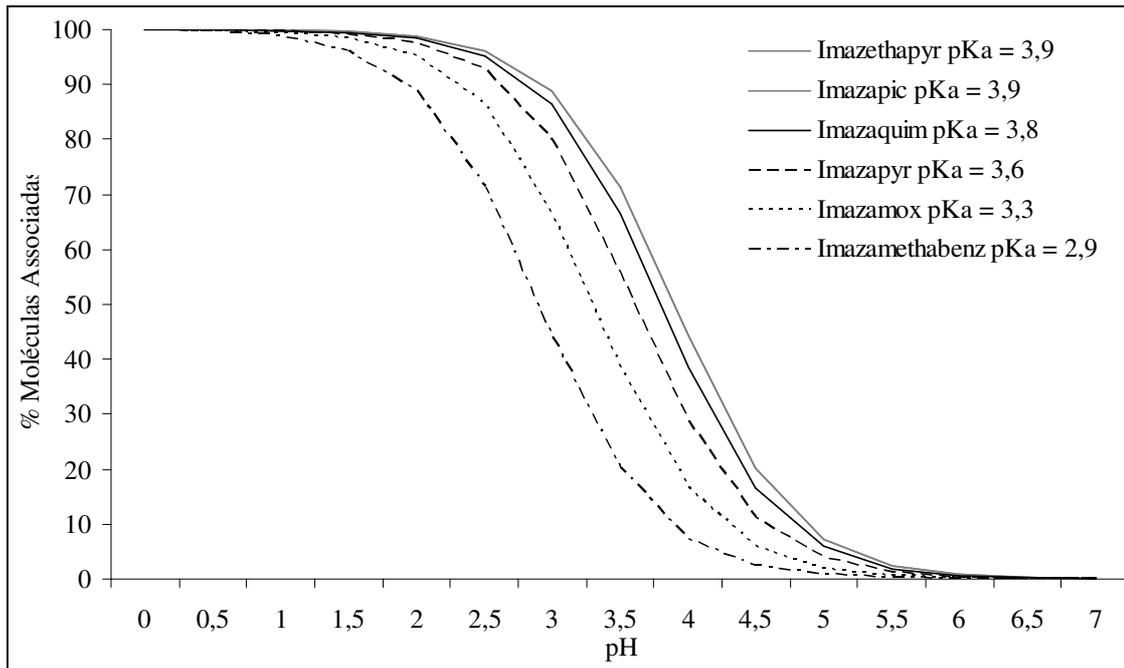


Figura 2 - Curva teórica de titulação das imidazolinonas calculada com a equação de Henderson-Hasselbalch.

O principal mecanismo envolvido na sorção do imazaquin é a partição hidrofóbica, sendo que o aumento do teor de carbono orgânico aumenta a sorção (REGITANO et al., 2001) e reduz a sua desorção do solo (WANG & WEIPING, 1999). Em vista da maior adsorção do herbicida em solos com maiores teores de MO, a taxa da degradação do imazapyr é menor quando comparado com solos com menores teores (McDOWEL et al., 1997). Incrementos nos conteúdos de MO e argila no solo também aumentam a sorção de imazethapyr, diminuindo sua biodisponibilidade (JOURDAN et al., 1998).

Comparativamente, a ordem decrescente de persistência no solo é de imazaquin > imazethapyr > imazamox (BHALLA et al., 1991). Em solos com pH superiores a 6,0 estes herbicidas encontram-se predominantemente na forma dissociada e na solução do solo (MANGELS 1991; AICHELE & PENNER, 2005). Quando o pH da solução do solo diminuiu, aparecem as formas associadas, em maior proporção para imazaquin e imazethapyr do que para imazamox, em decorrência do seu pKa, aumentando as proporções de compostos adsorvidos e diminuindo a proporção biodisponível na solução do solo (LOUX et al., 1989; AICHELE & PENNER, 2005). Para imazethapyr, a porcentagem de herbicida desorvido foi consideravelmente maior a pH 7,0 do que a pH 5,0.

Independentemente do valor de pH avaliado, sempre foi encontrado na solução do solo maior quantidade de imazamox do que imazaquin e imazethapyr, sendo que os dois últimos encontravam-se em quantidades similares (AICHELE & PENNER, 2005). Como imazamox tem pKa menor, maior proporções de moléculas estariam na forma eletronegativa que os demais para um mesmo pH, sendo mais biodisponível e menos persistente no solo (CANTWELL et al., 1989; AICHELE & PENNER, 2005). As mudanças na porcentagem de sorção em relação ao pH para imazapyr foram pequenas (WANG & WEIPING, 1999; AICHELE & PENNER, 2005). A sorção do imazethapyr ao solo aumentou em pH 5,0, e não variou significativamente quando este era superior a 6,0, bem como não foi encontrada interação significativa entre a retenção e o conteúdo de argila e MO do solo, com pH entre 7,5 e 8,5 (LITTLE et al., 1994, JOURDAN et al., 1998, MADAMI et al., 2003). A biodisponibilidade de imazethapyr em solo arenoso aumenta quando o pH incrementava de 3,7 para 6,5, porém, para valores superiores a este, o pH não tinha efeito sobre a bioatividade do herbicida (JOURDAN et al., 1998). A concentração de imazethapyr remanescente no solo após cinco meses foi menor com pH maiores. Quando o pH é baixo vários mecanismos de sorção são iniciados, incluindo forças físicas fracas ou pontes de hidrogênio, através de grupos carboxila associado (WANG & WEIPING, 1999). LOUX (1989) e REGITANO et al., (2001) acharam comportamento similar para imazaquin em relação ao pH. A alta solubilidade do imazethapyr e a fraca retenção que ele apresenta em solos com pH superiores a 7,0 indicam que teria uma alta mobilidade nestas condições, aumentando significativamente o risco de contaminação de lençóis freáticos, por lixiviação (MADAMI et al., 2003).

A sorção das imidazolinonas está relacionada com as propriedades do solo, sendo necessário ajustar as doses dos herbicidas de acordo as características do mesmo, com o objetivo de manter a eficiência do produto e diminuir a contaminação ambiental, sem afetar a eficiência de controle das plantas daninhas. As doses devem ser maiores quando aplicadas em um solo com alto conteúdo de MO e baixo pH, para manter a eficiência de controle, porém, quando as condições do solo são contrárias a estas, as doses a aplicar devem ser menores para diminuir o risco de contaminação ambiental (WANG & WEIPING, 1999)

Fotólise

As imidazolinonas sofrem rápida fotólise em água, podendo ser uma forma importante de dissipação neste meio. Porém, em solo, as taxas de fotólises são mais lentas. A penetração da luz no interior do perfil do solo é limitada a 0,1 a 0,5 mm de espessura (BALMER et al., 2000) e nunca mais do que um mm (FRANK et al., 2002). Em solos arenosos e úmidos a fotólise pode ser elevada, porém em condições de solo seco ou com maiores conteúdos de MO e/ou argila, a fotólise perde importância. Foi quantificado que 45% do imazaquin e 52% do imazethapyr foram dissipados em solo arenoso e úmido após 48 horas; já em condições de solo arenoso seco ou solo argiloso seco ou a capacidade de campo, a dissipação dos herbicidas após 48 horas foi menor do que 10% (CURRAN et al., 1992a). Em condições de laboratório, a luz ultravioleta (UV) causa 100% de degradação do imazethapyr em água pura, após 48 horas (CURRAN et al., 1992a), sendo a meia vida em torno de 4-6 horas, podendo sofrer tanto fotólise direta quanto indireta (AVILA et al., 2006), obtendo-se como produtos, na primeira etapa da fotólise, dois metabólitos (AZZOUZI et al., 2002). A taxa de fotólise varia segundo as condições do meio e a presença de ácido húmico, sendo significativamente diferente em comparação com a fotólise em água pura. A presença de ácido húmico diminui a fotólise do herbicida (AZZOUZI et al., 2002). Os ácidos húmicos diminuem a fotodegradação do imazethapyr por competir por luz com as moléculas do herbicida. Sustâncias inorgânicas solúveis podem diminuir a fotólise direta diminuindo a intensidade de luz, ou acelerar a fotólise indireta, gerando espécies reativas de oxigênio.

A sorção também afeta a fotólise do imazethapyr, sendo seu efeito mais importante quando o herbicida é aplicado na pré-emergência. Químicos adsorvidos dentro de espaços coloidais ou seqüestrados pela MO ficariam protegidos da luz. A maior sorção ou a menor disponibilidade do herbicida diminui a taxa da fotólise (CURRAN et al., 1992a). A fotólise em água do imazethapyr varia pouco com o pH da solução (SHANER & O'CONNOR, 1991) ou não é afetada (AVILA et al., 2006), embora no solo o pH afete indiretamente a fotólise através da interferência na sorção do herbicida (LOUX et al., 1989; STOUGAARD et al., 1990). Em condições de solo alagado, o efeito do pH só é observado durante as primeiras 3-4 semanas após a inundação, já que após este período o pH do solo estabiliza-se próximo da

neutralidade através do processo natural de auto calagem (SNYDER & SLATON, 2002). A taxa de fotólise aumenta com a temperatura quando em solução com água pura (ISHIKI et al., 2005).

A meia vida do imazamox em água é de 78 minutos, degradando-se por completo em 10 horas, sendo mais estável que o imazapyr, que foi degradado completamente em 6 horas com uma meia vida de 40 minutos, embora os metabólitos perdurem na solução do solo de 50 a 100 horas (QUIVET et al., 2004 e 2006a). Esta relativa maior estabilidade da molécula de imazamox em relação à molécula do imazapyr está relacionada a sua diferença estrutural. A molécula de imazapyr no anel piridínico tem um H, e o imazamox um grupo metoximetil, o que acaba lhe conferindo maior estabilidade, embora o imazethapyr apresente um grupo etil ao invés do H, ele é fotodegradado mais rapidamente que imazapyr (QUIVET et al., 2004; e 2006a). Os radicais do anel piridínico que diferenciam as imidazolinonas deste grupo permanecem unidos ao anel piridínico após o primeiro passo do processo de fotodegradação, sem interferir na formação de diferentes metabólitos, pois os produtos da fotólise de imazamox e imazapyr são semelhantes. (MALLIPUDI et al., 1991; QUIVET et al., 2006a). A presença de metais como Na^+ , Ca^{2+} ou Cu^{2+} faz com que diminua a taxa de degradação de imazamox. A presença destes íons estabiliza as moléculas do herbicida, provavelmente por um processo de complexação deste com os metais. A meia vida de fotólise de imazamox em presença de Cu^{2+} se prolongou para 482 minutos (QUIVET et al., 2006b). MALLIPUDI (1991) determinou que para imazapyr a fotodegradação não foi afetada pelo pH quando em solução aquosa, e que a presença de ácidos húmicos a diminui. AZZOUZI et al., (1999) observaram um efeito “guarda-chuva” do ácido húmico sobre as moléculas do herbicida. A fotólise do imazaquin, em condições de campo, tem importância somente para uma pequena fração do produto que permanece na superfície do solo. A maior porção fica na solução do solo disponível para as plantas, para os microorganismos e para ser lixiviado ou sorvido ao solo (BASHAM & LAVY, 1987). A fotólise é mais efetiva com pH maior ao pKa e na ausência de oxigênio. Em pH baixo, ocorre aumento de sorção e as moléculas tornam-se mais estáveis à fotodegradação (BARKANI et al., 2005)

A luz UV degrada por fotólise 100% das moléculas de imazaquin, imazethapyr, imazapyr e imazamox, e 87% das moléculas de imazamethabenz quando em solução aquosa, após 48 horas (CURRAN et al., 1992a; QUIVET et al.,

2004 e 2006a). A ordem de susceptibilidade decrescente à fotodegradação é imazaquin = imazethapyr > imazapyr > imazamox > imazamethabenz, sendo que a fitotoxicidade destas imidazolinonas diminui com o tempo de exposição à luz ultravioleta, indicando que a degradação dos herbicidas é acompanhada por uma correspondente perda de atividade biológica (CURRAN et al., 1992a).

Hidrólise

A hidrólise não é um processo importante de dissipação para as imidazolinonas. As perdas de imazethapyr por hidrólise são mínimas, a pH 5,0 ou 7,0, sendo praticamente nulas a pH 9,0 ($t_{1/2} \approx 9,6$ meses a 25°C) (SHANER & O'CONNOR, 1991). Foi demonstrado que a degradação hidrolítica não é importante para os herbicidas imazapyr (CURRAN, 1992a; QUIVET et al., 2004; 2006a), imazethapyr (CURRAN, 1992a), imazamox (QUIVET et al., 2004 e 2006a), imazamethabenz (CURRAN, 1992a) e imazaquin (CURRAN, 1992a, BARKANI et al., 2005), sendo que não foi encontrado resultados de pesquisa sobre imazapic.

Degradação microbiana

O principal mecanismo de dissipação das imidazolinonas no solo é através da degradação microbiana (FLINT & WITT, 1997; LOUX et al., 1989). A degradação de imazapyr foi 2,3 a 4,4 vezes mais lenta em solos estéreis quando comparadas com solo em condições naturais (WANG et al., 2005), já para imazethapyr e imazaquin foi determinado que 100% dos herbicidas foram degradados em solos não estéreis e 15% em solo estéril após cinco meses (FLINT & WITT, 1997). A degradação microbiana pode acontecer em condições de aerobiose exclusivamente, como é o caso de imazethapyr (SHANER & O'CONNOR, 1991), ou em condições de aerobiose e anaerobiose, como no caso de imazapyr (WANG et al., 2006). Quando as condições ambientais favoreceram o desenvolvimento dos microorganismos e a biodisponibilidade dos herbicidas, a degradação das imidazolinonas aumenta.

A temperatura do solo afeta a degradação das imidazolinonas, sendo que em solos cultivados sob temperaturas de 18 e 35°C, a degradação do imazethapyr foi de 66 e 100%, respectivamente (BASHAM & LAVY, 1987). FLINT & WITT, (1997) determinaram que a emissão de CO₂ por microorganismos aumentou com a

presença de imazethapyr ou imazaquin, duplicando a atividade quando a temperatura passou de 15 para 30°C, utilizando preferencialmente o carbono do grupo carboxila. Mantendo-se o pH alto e aumentando-se a temperatura, observou-se uma redução na concentração de imazethapyr, mais acentuada em solo úmido (JOURDAN et al., 1998). BASHAM & LAVY, (1987) e BAUGHMAN & SHAW, (1996) demonstraram que imazethapyr e imazaquin foram mais persistentes em solos frios e secos do que em solos aquecidos e úmidos.

A sorção dos herbicidas aos colóides do solo prolonga a persistência dos mesmos e os protege dos processos de biodegradação. AICHELE & PENNER, (2005) determinaram que a dissipação de imazaquin, imazethapyr e imazamox diminuiu quando o pH desceu de 7,0 para 5,0 devido ao aumento na sorção com a conseqüente redução da biodisponibilidade. A degradação microbiana destes herbicidas tem uma estreita relação com a quantidade de moléculas biodisponível na solução do solo (CANTWELL et al., 1989). Imazamox foi degradado mais rapidamente que os outros dois, sendo a meia vida do imazamox a pH 7,0 de 1,4 semanas, do imazethapyr de 16, e do imazaquin mais de 16 semanas (AICHELE & PENNER, 2005). Alguns autores determinaram que a persistência do imazapyr no solo pode variar de 90 a 730 dias (ARS, 2001), para imazapic 90 dias (GRYNES et al., 1995), e para o imazethapyr de 60 a 360 dias (GOETZ et al., 1990; MANGELS, 1991). O prolongado período de permanência no solo destes herbicidas compromete o desenvolvimento de cultivos sensíveis, aumentando o risco de contaminar fontes de água (HART et al., 1991).

Uma bactéria de solo foi isolada por WANG (2006), a qual degrada imazaquin em altas concentrações, *Arthrobacter crystallopoietes* (WWX-1), apresentando máxima atividade a 35°C e pH 5,0. Esta bactéria também é capaz de degradar outras imidazolinonas, podendo ser usada como uma ferramenta para biorremediar solo e água contaminados com imidazolinonas.

Lixiviação

JOURDAN et al. (1998) monitoraram a movimentação de imazethapyr no perfil de um solo arenoso, até 90 dias após a aplicação (DAA) do herbicida. Nos primeiros cinco DAA, o herbicida atingiu 20 cm, embora as maiores concentrações encontravam-se nos primeiros 10 cm. Já aos 30 DAA, a maior concentração do

produto encontrava-se nos primeiros 15 cm, detectando-se produto até 30 cm de profundidade. A partir dos 90 DAA, a concentração nos primeiros cinco cm diminuiu, concentrando-se o herbicida entre cinco e 30 cm de profundidade, indicando uma diminuição na camada superficial e um aumento na espessura da porção subsuperficial com as maiores concentrações. Após cinco meses, não foi detectada presença de imazethapyr. Em condições de menor umidade de solo, foi observada maior concentração de imazethapyr de 0 a 10 cm, e com maior umidade, de 5 a 10 cm, 90 DAA. A mobilidade do herbicida no perfil do solo é menor em condições de baixas temperaturas e umidades (JOURDAN et al., 1998). McDOWELI et al., (1997) observaram que imazapyr atingiu maior profundidade em condições de maior precipitação, alcançando 25 cm de profundidade 90 DAA.

Considerações finais

As imidazolinonas apresentam longa persistência no solo, podendo causar danos de fitotoxicidade em culturas suscetíveis e contaminar fontes de águas subterrâneas e superficiais.

A sorção das imidazolinonas é afetada principalmente pelo pH, conteúdo de matéria orgânica e argila do solo, sendo inversamente proporcional ao primeiro e diretamente proporcional aos outros dois.

A sorção regula o comportamento das imidazolinonas no solo, determinando quanto do herbicida vai estar disponível para fotólise, degradação microbiana, lixiviação e quanto para ser absorvido pelas plantas. Dessa forma, influencia na eficiência e na persistência do herbicida.

A fotólise direta em condições de campo não é uma via importante de dissipação, podendo adquirir alguma importância em solos arenosos e úmidos.

A principal via de dissipação das imidazolinonas é a degradação microbiana, sendo exclusivamente aeróbica para imazethapyr, e aeróbica e anaeróbica para imazapyr.

A hidrólise não é uma via de dissipação relevante para as imidazolinonas.

CAPÍTULO II

MANEJO DO SOLO DE VÁRZEA E A PERSISTÊNCIA DO HERBICIDA ONLY[®] (IMAZETHAPYR + IMAZAPIC)

SOIL TILLAGE AND THE RESIDUAL OF THE HERBICIDE ONLY[®] (IMAZETHAPYR + IMAZAPIC) IN PADDY RICE

Resumo

A tecnologia Clearfield[®] permite controlar eficientemente o arroz-vermelho em cultivos de arroz irrigado mediante o uso da mistura formulada dos herbicidas imazethapyr e imazapic (Only[®]), tendo contribuído para o acréscimo da produtividade de arroz no Rio Grande do Sul (RS). Esses herbicidas podem persistir no solo por longos períodos causando fitotoxicidade ao arroz suscetível cultivado em sucessão. Este trabalho teve como objetivo determinar o efeito de diferentes manejos de solo, durante a entressafra do arroz, sobre a fitotoxicidade residual do imazethapyr e imazapic, em arroz não tolerante. O residual desses herbicidas causou fitotoxicidade sobre o arroz suscetível, observando-se valores máximos até 25 dias após a emergência, ocorrendo uma diminuição após este período até praticamente desaparecer 60 dias após a emergência. O residual do herbicida afetou o estande de plantas, número de colmos m⁻², número de panículas m⁻², estatura de plantas, mas não afetou a produtividade de grãos. O revolvimento do solo diminuiu a atividade do herbicida na camada superficial de solo (0-3 cm).

Palavras-chave: residual de herbicida, imidazolinonas, preparo de solo.

Abstract

The release of Clearfield[®] technology has enabled efficient control of red rice on irrigated rice crops by using a mixture of herbicides imazethapyr and imazapic (Only[®]), contributing to increase the rice yield in Rio Grande do Sul (RS). However,

such herbicides may persist on the soil for long periods causing plant injury to susceptible rice grown in rotation. The objective of this work was to determine the effect of different soil tillage during the winter fallow on the residual phytotoxicity of imazethapyr and imazapic on non tolerant rice.

Herbicide residues caused injury on susceptible rice with the highest values observed 25 days after emergency and decreasing after this period until almost disappearing 60 days after emergency. Herbicide residues affected plants stand, number of stems m^{-2} , number of panicles m^{-2} and plants high, but did not affect grain yield. Soil movement decreased herbicides activity only on the superficial soil layer (0-3 cm).

Key words: herbicide residual, imidazolinone, soil tillage.

Introdução

Os herbicidas imazethapyr e imazapic pertencem à família das imidazolinonas, e controlam um amplo espectro de plantas daninhas, incluindo gramíneas, ciperáceas e latifoliadas. São absorvidos por raízes e folhas, sendo transportados por floema e xilema, acumulando-se nos pontos de crescimento. O controle é proporcionado pela inibição da enzima acetolactase sintetase (ALS), que é essencial no processo de síntese de aminoácidos de cadeia ramificada em plantas, a isoleusina, leusina, e valina (TAN et al., 2006). Esses herbicidas estão sendo amplamente utilizados no Estado do Rio Grande do Sul (RS), em mistura formulada com o nome comercial Only[®], que é aplicado em cultivares tolerantes, constituindo a tecnologia chamada Clearfield[®]. A tolerância no arroz cultivado foi obtida por mutações induzidas utilizando-se tratamento das sementes com químicos mutagênicos, a etil metanosulfonato (EMS) ou radiação gamma (CROUGHAN, 1998).

A tecnologia Clearfield[®] foi introduzida como uma nova ferramenta para ajudar a solucionar o principal problema das lavouras de arroz do RS, permitindo o controle químico eficiente do arroz-vermelho (VILLA et al., 2006; SANTOS et al., 2006), o que contribuiu para o acréscimo do rendimento médio de grãos do Estado. No entanto, os herbicidas podem persistir no solo após o cultivo, em quantidade que pode comprometer a utilização futura da área com outras culturas suscetíveis, ou

mesmo com cultivares de arroz não tolerante. Os danos causados a culturas em sucessão são variáveis dependendo das condições físicas, químicas e de manejo do solo, entre outros fatores. Foram determinados diferentes níveis de danos por fitotoxicidade do residual de imazethapyr, imazapic ou Only[®] sobre, alfafa, algodão, aveia, azevém, batata, beterraba açucareira, canola, cebola, ervilha, girassol, linho, melão, milho, mostarda, pimenta, pimentão, repolho, sorgo, trigo e tomate (BOVEY & SENSEMAN, 1998; ALISTER & KOGAN, 2005; PINTO et al., 2007a). Em arroz não-tolerante, VILLA et al. (2006) determinaram menor estande de plantas por efeito residual do herbicida Only[®], porém sem efeito na produtividade. No entanto MARCHESAN et al. (2007a e b) determinaram perdas de produtividade de 19 a 30% por efeito do residual desses herbicidas sobre arroz suscetível, um ano após a aplicação dos herbicidas e sintomas de fitotoxicidade foram observados dois anos após a aplicação. Nesse sentido, ZHANG et al. (2000) determinaram diminuição na produtividade de arroz de 69% pelo efeito residual de imazethapyr. PINTO et al. (2007b) determinaram redução na biomassa aérea e radicular de arroz suscetível, sendo que o efeito residual do herbicida relacionou-se com as doses aplicadas no último ano, não havendo acumulação de efeito pelo emprego de anos consecutivos do sistema Clearfield[®]. MASSONI et al. (2007) observaram efeito residual desse herbicida sobre o arroz suscetível, 358 dias após a aplicação e para WILLIAMS et al. (2002), devem transcorrer 540 dias (18 meses) entre a aplicação de imazethapyr e a semeadura de arroz não-tolerante.

A persistência do herbicida no solo depende das condições climáticas, das propriedades do solo e da quantidade do herbicida aplicado. O principal mecanismo de dissipação das imidazolinonas no solo é a degradação microbiana (LOUX & REESE, 1993; FLINT & WITT, 1997), o que não acontece em condições de anaerobioses para imazethapyr (SHANER & O'CONNOR, 1991). Esses herbicidas também sofrem fotólise, podendo ser este meio de dissipação relevante em solo arenoso e úmido, não sendo importantes para outros tipos de solos (CURRAN et al., 1992a). Esses processos ficam regulados pela sorção das moléculas dos herbicidas aos colóides do solo e pelas condições ambientais que favoreçam o desenvolvimento dos microorganismos.

Em solos com pH baixo ocorre maior sorção desses herbicidas e menor biodegradação (BRESNAHAM et al., 2000; MADANI et al., 2003; FERNANDES DE OLIVEIRA et al., 2004). Isso ocorre, porque a sorção determina quanto do herbicida

vai ficar retido na matriz do solo e quanto ficará disponível na solução do solo capaz de sofrer os diferentes processos de dissipação. Os solos arroseiros do RS são predominantemente ácidos sendo que 50% desses apresentam pH inferior a cinco (ANGHINONI et al., 2004). Nestas condições os herbicidas imazethapyr e imazapic têm alta probabilidade de permanecer sorvidos ao solo, aumentando sua persistência e o risco de efeitos fitotóxicos sobre culturas em sucessão. Há evidências de que as utilizações de práticas de manejo, que estimulem a degradação de herbicidas no solo durante o período da entressafra do arroz, possam reduzir a persistência destes, minimizando os danos aos cultivos subseqüentes. Isso porque os processos biológicos estariam sendo influenciados por fatores ambientais, tais como umidade, temperatura e aeração, os quais estão relacionados às práticas de preparo do solo (SOON & ARSHAD, 2005; PEREZ et al., 2005), sendo que o preparo do solo incrementa em até 57% a atividade microbiana (FRANCHINI et al., 2007).

Em vista do exposto, o presente trabalho teve por objetivo determinar o efeito de diferentes manejos do solo durante o período de entressafra do arroz, sobre a fitotoxicidade residual do herbicida Only[®], em arroz não tolerante.

Material e métodos

O experimento foi instalado em campo, no ano agrícola de 2006/07 em área que havia recebido $1 \text{ L ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ da mistura formulada de imazethapyr + imazapic ($75 + 25 \text{ g L}^{-1}$), produto comercial Only[®], nas safras de 2004/05 e 2005/06. O solo classificado como Planossolo Hidromórfico eutrófico arênico tinha as seguintes características: ($\text{pH}_{\text{água}}(1:1)=4,8$; $\text{P}=6,0 \text{ mg dm}^{-3}$; $\text{K}=120 \text{ mg dm}^{-3}$; argila=26%; M.O.=2,3%; $\text{Ca}=5,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $\text{Mg}=2,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $\text{Al}=1,7 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e índice SMP 5,1). O delineamento experimental foi de blocos ao acaso em esquema bifatorial com quatro repetições. Os tratamentos consistiram da combinação de nove manejos de solo e de duas cultivares de arroz irrigado. Os manejos de solo foram quatro nos sistemas de plantio direito e semidireito: plantio direto (PD); plantio direto com azevém (PDA); um preparo de solo em abril (1PSA); um preparo de solo em abril com azevém (1PSAA). Cinco no sistema de plantio convencional: um preparo de solo em outubro (1PSO); dois preparos de solo, em maio e outubro (2PSMO); dois preparos de solo, em abril e outubro (2PS); três preparos de solo, em abril, maio e

outubro (3PS); e quatro preparos de solo, em abril, maio, agosto e outubro (4PS). As cultivares testadas foram IRGA 417 e IRGA 422 CL.

A cultivar IRGA 422 CL foi utilizada como testemunha resistente aos herbicidas, pois a área experimental não contava com unidades experimentais sem aplicação prévia do herbicida. A cultivar foi escolhida por ser tolerante a herbicidas do grupo das imidazolinonas e por possuir características agronômicas semelhantes a cultivar suscetível, IRGA 417 (MENEZES et al., 2001; LOPES et al., 2003a e b). Para ratificar a similaridade entre as cultivares, foram semeados quatro experimentos comparativos, em diferentes áreas sem resíduos de imidazolinonas.

A data de semeadura e emergência foram 04/10/07 e 16/10/07, respectivamente. Utilizou-se 110 kg de sementes ha⁻¹, com semeadora de 11 linhas espaçadas em 0,175 m e cinco metros de comprimento, gerando uma UE de 9,6 m². A adubação de base foi aplicada junto à semeadura e constou de 350 kg ha⁻¹ de 5-20-30 (N-P-K). A adubação nitrogenada em cobertura foi aplicada na forma de uréia e parcelada em duas épocas: 60 kg ha⁻¹ de N, no estágio de perfilhamento (V4, segundo COUNCE et al. (2000) um dia antes da inundação; e 45 kg ha⁻¹ de N na iniciação da panícula (R0). As demais práticas agronômicas foram seguidas conforme recomendações da pesquisa para a obtenção de altos rendimentos (SOSBAI, 2005). Em todas as UE, foram demarcadas em duas linhas de semeadura, um metro de comprimento para cada uma, onde se determinou estande inicial de plantas, número de colmos e número de panículas. Na mesma área avaliou-se a estatura de plantas até o ápice da panícula, em dez plantas escolhidas ao acaso. Ainda nesse local, coletou-se 10 panículas, nas quais foi determinado o número de grãos por panícula, esterilidade de espiguetas e massa de mil grãos. A produtividade de grãos foi obtida através da colheita manual, de sete linhas centrais, quando os grãos apresentavam umidade média de 20%. Após a trilha, limpeza e pesagem dos grãos com casca, os dados foram corrigidos para 13% de umidade e convertidos em kg ha⁻¹. Foram feitas avaliações de fitotoxicidade no arroz não tolerante (IRGA 417) aos 10, 17, 24, 36 e 59 dias após a emergência (DAE), sendo os valores estimados visualmente, utilizando uma escala de 0 a 100%, onde 0= sem fitotoxicidade e 100= morte das plantas.

Os dados foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste Tukey (P≤0,05). Para a análise estatística, os dados de fitotoxicidade,

foram transformados para $yt = \arcseno\sqrt{(y+0,5)/100}$ e os demais dados em porcentagem foram transformados para $yt = \sqrt{y+1}$.

Resultados e discussão

No experimento preliminar comparando as cultivares IRGA 417 e IRGA 422 CL (Apêndice A) não foi encontrado diferenças entre elas quanto à produtividade de grãos e parâmetros agrônômicos, estando de acordo com relatos de LOPES et al. (2003a) e LOPES et al. (2003b). Baseado nesses resultados, a cultivar IRGA 422 CL foi utilizada como testemunha resistente e a IRGA 417 como planta suscetível, isolando desta maneira o efeito residual do herbicida Only[®].

Ocorreu um aumento na fitototoxicidade dos herbicidas na cultivar IRGA 417, com o passar do tempo, atingindo os maiores valores aos 24 dias após a emergência (DAE) com valores médios entre os diferentes manejos de solo de 28%. A partir de 36 DAE, observam-se redução na fitotoxicidade para 9% até praticamente desaparecer aos 59 DAE, diminuindo também as diferenças entre os preparos de solo a partir de 36 DAE (Figura 3). Ainda na Figura 3 podem-se observar três grupos de preparos de solo com relação à fitotoxicidade. O tratamento 1PSO apresentou as maiores porcentagens de fitotoxicidade, enquanto que os valores intermediários pertenceram aos outros tratamentos com plantio convencional (4PS, 3PS, 2PS, 2PSMO) e com menor fitotoxicidade, os tratamentos com plantio direto ou semi-direto (PD, PDA, 1PSA, 1PSAA). Estes resultados não concordam com resultados de outros trabalhos realizados em solos com culturas de sequeiro, onde foi encontrado que o preparo de solo acelerava ou não afetava a degradação das imidazolinonas. Nesse sentido, CURRAN et al. (1992b) encontraram que a fitotoxicidade residual de imazaquin e imazethapyr em milho, foi maior no sistema de PD do que no plantio convencional. Resultados de MONKS & BRUKS (1993) mostram que não houve efeito de diferentes manejos de palha e de preparo de solo no residual de imazaquin e imazethapyr. RENNERT et al. (1998) comparando o efeito de diferentes sistemas de preparo de solo na dissipação do imazaquin encontraram que no preparo de solo com arado, o herbicida foi degradado mais que no preparo com escarificador e este mais que no PD, sendo detectado imazaquin até 18 cm de profundidade independentemente do sistema de preparo de solo

empregado. No entanto, SEIFERT et al. (2001) não encontraram diferenças na degradação do imazaquin entre o preparo com arado e escarificador. ULBRICH et al. (2005) observaram aumentos na persistência de imazapic e imazapyr em dois solos com PD comparado com plantio convencional.

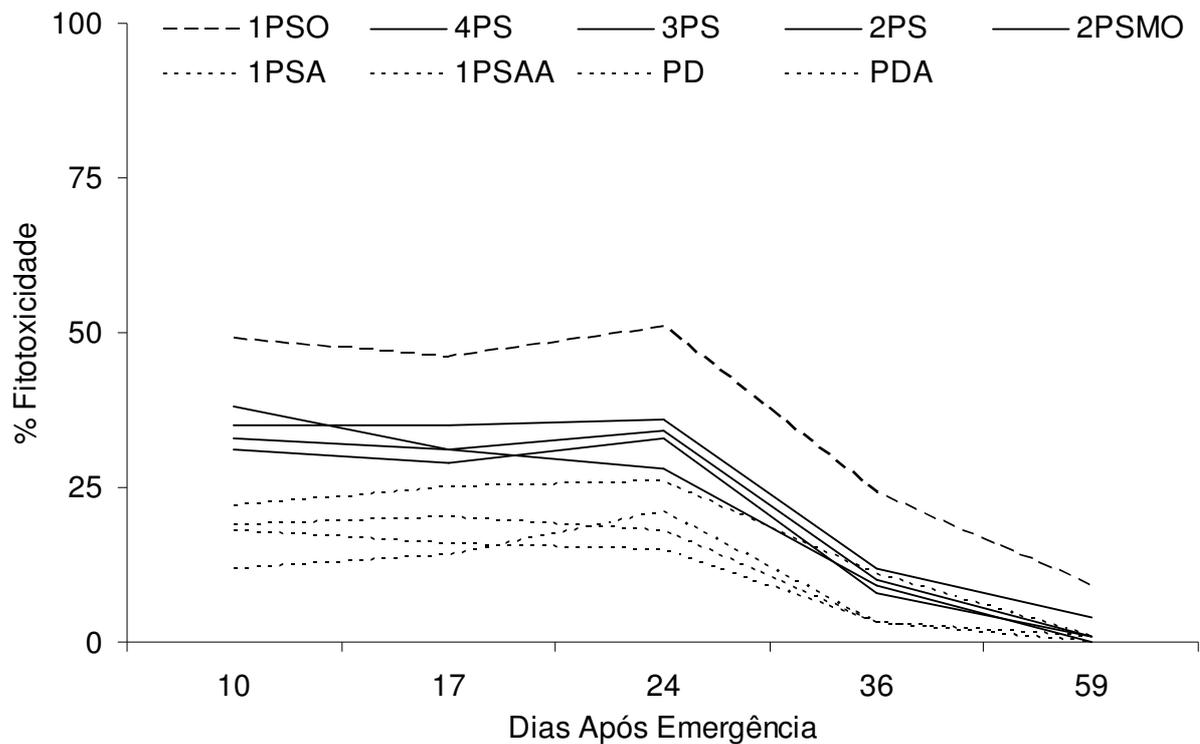


Figura 3 - Fitotoxicidade da mistura formulada de imazethapyr e imazapic ($75+25 \text{ g ha}^{-1}$) na cultivar IRGA 417 semeada após um ano da última aplicação dos herbicidas, num sistema com dois anos de uso dos herbicidas, em cinco épocas de avaliação e nove preparos de solos: plantio direto (PD); plantio direto mais azevém (PDA); um preparo de solo (PS) em abril (1PSA); um PS em abril mais azevém (1PSAA); um PS em outubro (1PSO); dois PS em maio e outubro (2PSMO); dois PS em abril e outubro (2PS); três PS em abril, maio e outubro (3PS); quatro PS em abril, maio, agosto e outubro (4PS). Santa Maria, RS, 2006/07.

Ressalta-se que no presente trabalho, no sistema de plantio convencional, a profundidade de semeadura foi maior quando comparada com os sistemas de plantio direto e semi-direto (6 e 2 cm, respectivamente). A diferença na profundidade de semeadura foi conseqüência da impossibilidade de regular a pressão das molas da semeadora, para cada parcela com diferentes preparo de solo, ocasionando maior profundidade de semeadura onde o solo tinha sido preparado no mesmo dia da semeadura. A diferença na profundidade de semeadura possivelmente tenha sido a causa da maior fitotoxicidade nos tratamentos com preparo convencional. Segundo ZHANG et al. (2000) quando uma plântula de arroz é originada de uma

semente localizada em maior profundidade, apresenta coleóptilo mais comprido, o que acarreta maior área de contato com o solo, aumentando a absorção do imazethapyr e os sintomas de fitotoxicidade. Nesse sentido, estes autores não encontraram efeito residual de imazethapyr em arroz pré-germinado semeado em água sobre a superfície do solo e sim sobre plantas originadas de sementes semeadas em solo seco. Além disso, McDOWEL et al. (1997) e JOURDAN et al. (1998) determinaram que imazethapyr lixivia-se se acumulando em camadas subsuperficiais de solo pelo que sementes colocadas em maior profundidade estariam mais expostas a maiores concentrações de herbicidas. Por outro lado, o tratamento 1PSO praticamente passou o mesmo período de tempo sem movimento de solo quando comparado com os tratamentos com plantio direto (PD, PDA) pelo que a planta de arroz não deveria apresentar diferenças de fitotoxicidade. Para detectar o efeito da profundidade da semente no solo sobre a fitotoxicidade nas plantas foi realizado um bioensaio utilizando-se solo coletado na área, constatando-se que houve menor fitotoxicidade de 0-3 cm no plantio convencional do que no PD (Apêndice B). Pode-se inferir que as diferenças de fitotoxicidade entre estes tratamentos, estejam relacionadas, pelo menos em parte, há um efeito de posicionamento da semente e estratificação do herbicida no perfil do solo e não ao efeito dos preparos de solo na degradação dos herbicidas.

Na Tabela 1 apresentam-se os dados obtidos do efeito dos preparos de solo e o residual do herbicida Only[®], sobre as variáveis analisadas, nas cultivares IRGA 417 e IRGA 422CL. A interação significativa, entre preparos de solo e cultivares para estande de plantas e colmos m⁻² foi causada por um menor número de plantas e de colmos no tratamento 1PSO na cultivar IRGA 417, o que não foi observado na cultivar IRGA 422 CL, mantendo-se como efeito principal a diferença entre as cultivares. Por isso serão discutidos os efeitos dos manejos do solo e das cultivares em separado.

Os diferentes preparos de solo não afetaram ao estande de plantas, número de colmos, estatura de plantas, número de panículas, massa de 1000 grãos e produtividade, concordando com resultados obtidos por (MARÍN et al., 1998; LEVY et al., 2006; TRIPATHI et al., 2007) embora MOHANTY et al. (2006) afirmam que os preparos de solo quando feitos em água geram melhores condições físicas de solo para um melhor desenvolvimento das plantas de arroz.

Avaliando o efeito residual do herbicida Only[®], na cultivar IRGA 417 em comparação com a cultivar IRGA 422 CL (tratamento testemunha), observou-se que a primeira apresentou uma diminuição no estande de plantas, do número de perfilhos m⁻², da estatura de plantas, do número de panículas m⁻², da esterilidade de espiguetas, e da massa de 1000 grãos, porém obteve maior número de grãos por panícula. O maior número de grãos por panícula e a menor esterilidade de espiguetas, provavelmente deveram-se a um efeito compensatório, ante um menor número de panículas m⁻². O residual do herbicida não afetou a produtividade, possivelmente como consequência do maior número de grãos por panículas. Segundo MARIN & KRAEMER (2003), com menor número de panículas, a planta de arroz podem apresentar um incremento no número de grãos por panículas, e menor esterilidade de espiguetas, como um efeito compensatório da planta para manter a produtividade. VILLA et al., (2006), observaram uma diminuição na densidade de plantas como resultado do efeito residual do herbicida Only[®], sem afetar a produtividade. No trabalho realizado por SANTOS et al., (2006) o efeito residual do herbicida afetou a produtividade em torno de 50%. A menor recuperação da lavoura observada por SANTOS et al. (2006), provavelmente esteja relacionada ao menor pH do solo, pelo menos em parte, em relação a este trabalho, 4,5 e 4,8, respectivamente. Essa pequena diferença no pH, gera condições para que as moléculas de imazethapyr e imazapic encontrem-se 20 e 11% associadas a pH 4,4 e 4,8, respectivamente, resultando no dobro de moléculas, no menor pH, capaz de ser sorvida aos colóides do solo, aumentando assim, a persistência do herbicida no solo. Segundo BRESNAHAM et al. (2000) a sorção do imazethapyr aumenta com pH mais baixos e depois de três meses a desorção é maior nestas condições, causando maior fitotoxicidade em culturas suscetíveis.

Tabela 1 - Estande de plantas por m² aos 10 e 17 dias após emergência (planta m⁻² 10 DAE) (planta m⁻² 17DAE), número de colmos por m² (colmos m⁻²), estatura de plantas em cm (estatura (cm)), número de panículas por m² (panículas m⁻²), esterilidade de espiguetas (% esterilidade), número de grãos por panículas (grãos/panícula), peso de 1000 grãos em g (peso 1000 grãos) e produtividade de grãos em kg.ha⁻¹ (produtividade de grãos.), para nove preparos do solo (PS) e duas cultivares em resposta ao efeito residual de dois anos dos herbicidas imazethapyr e imazapic (75+25 g a.i. ha⁻¹) (Only®). Santa Maria, RS. 2006/07.

Fonte de Variação	Plantas m ⁻²		Colmos m ⁻²	Estatura cm	Panículas m ⁻²	% esterilidade	Grãos/ panícula	Massa 1000 grãos	Produtividade de grãos
	10 DAE	17 DAE							
Preparos do Solo	254	304	519	87	383	6,8	89	26,9	9849
Significância ²	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
IRGA 422 CL	283 a ¹	350 a	599 a	88 a	404 a	8 a	85 b	28 a	9861
IRGA 417	226 b	260 b	440 b	86 b	361 b	6 b	93 a	26 b	9837
Significância ²	***	***	***	*	*	*	*	***	NS
PS*Cultivar	NS	***	**	NS	NS	NS	NS	NS	NS
CV%	17	18	21	4	18	4	18	5	11

¹ Médias não seguidas pela mesma letra diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey (P≤0,05).

² NS não significativa, *** significativa P≤0,001, ** significativa P≤0,01, * significativa P≤0,05.

Conclusões

O efeito residual do herbicida Only[®] reduz o estande de plantas, perfilhamento, número de panículas e a estatura de plantas da cultivar não tolerante IRGA 417, sem afetar a produtividade de grãos.

O revolvimento do solo diminuiu a atividade do herbicida na camada superficial de solo (0-3 cm).

Os diferentes sistemas de manejo de solo avaliados não afetam o comportamento agrônômico: estande de plantas, número de colmos, estatura de plantas, número de panículas, esterilidade de espiguetas, número de grãos por panícula, massa de grãos e produtividade.

CAPÍTULO III

LIXIVIAÇÃO DO IMAZETHAPYR EM DOIS SISTEMAS DE MANEJO DE SOLO DE VÁRZEA

LEACHING OF IMAZETHAPYR IN TWO TILLAGE SYSTEM IN PADDY RICE

Resumo

O imazethapyr está sendo amplamente utilizado no Rio Grande do Sul desde o desenvolvimento da Tecnologia Clearfield[®] (CL) em arroz, numa mistura formulada, imazethapyr + imazapic (75+25 g/l) com o nome comercial de Only[®]. No entanto, com o uso desta tecnologia surgiu o problema da persistência do herbicida no solo, afetando cultivos não tolerantes em sucessão com diferentes intensidades, estando relacionada, entre outros fatores, a localização do herbicida no perfil do solo. O presente trabalho teve por objetivo determinar o posicionamento do imazethapyr em profundidade, num solo de várzea cultivado com arroz para dois manejos de solo. Foram coletadas amostras de solos de dois sistemas de manejo; plantio convencional (PC) e plantio direto (PD), numa área onde havia sido utilizado arroz CL por dois anos e no terceiro ano, arroz não tolerante. As amostras de solo foram analisadas por HPLC-DAD. Observou-se menor concentração de imazethapyr no sistema PC do que no PD, sendo que o herbicida lixiviou até 20 cm nos dois sistemas. No PC ocorreu uma distribuição uniforme do imazethapyr nos primeiros 15 cm de solo, enquanto que no PD constatou acúmulo de imazethapyr nas camadas de 5-10 e 10-15 cm.

Palavras-chave: percolação de herbicidas, residual, preparo de solo, HPLC, *Oryza sativa*

Abstract

Imazethapyr has been widely used in Rio Grande do Sul state since the development of Clearfield Technology[®] (CL) on rice, using a formulated mixture of imazethapyr + imazapic (75+25 g/l) with the commercial name Only[®]. However, with the use of such technology raised the problem of herbicide carryover, which might affect non-tolerant crops in rotation with different intensities depending, among other factors, on the herbicide localization in the soil profile. The present work had the objective of determining the localization of imazethapyr in depth on a lowland soil cultivated with rice. Samples were collected from soil with two tillage systems, conventional system (PC) and non till (PD) in an area where CL rice had been cultivated for two years followed by non tolerant rice in the third year. Soil samples were analyzed by HPLC-DAD. Imazethapyr showed smaller concentration under PC system than under PD while the herbicide leached until 20 cm in both systems. In PC, imazethapyr uniformly distributed in the first 15 cm of soil, whereas in PD, imazethapyr leached occurred in the 0-5 cm layer and accumulated in 5-10 and 10-15 cm layers.

Key words: herbicide percolation, residual, soil preparation, HPLC, *Oryza sativa*

Introdução

O herbicida imazethapyr pertence à família das imidazolinonas e controla um amplo espectro de plantas daninhas, incluindo gramíneas, ciperáceas e latifoliadas. É absorvido pelas raízes e folhas (TAN et al., 2005) e transportado pelo floema e xilema, acumulando-se nos pontos de crescimento. O controle é proporcionado pela inibição da enzima acetolactato sintetase (ALS), que é essencial no processo de síntese de aminoácidos de cadeias ramificadas em plantas, a valina, leucina e isoleucina (TAN et al., 2006). Este herbicida está sendo amplamente utilizado no Estado do Rio Grande do Sul desde o desenvolvimento da tecnologia Clearfield[®] em arroz, em uma mistura formulada, imazethapyr + imazapic (75+25 g/l) com o nome comercial de Only[®].

Imazethapyr apresenta a característica de ser persistente no solo, sendo muito solúvel em água, e susceptível à lixiviação (BATTAGLIN et al., 2000; MADANI et al., 2003). A localização do herbicida na zona de absorção das raízes pode comprometer a utilização futura da área com culturas, não tolerantes. Há relatos e experiências indicando danos de fitotoxicidade, causados pelo residual do imazethapyr, que são variáveis dependendo das condições físicas, químicas e de manejo do solo, entre outros fatores. MASSONI et al. (2007) encontraram efeito residual deste herbicida sobre o arroz suscetível, 358 dias após a aplicação e para WILLIAMS et al. (2002) devem transcorrer 540 dias (18 meses) entre a aplicação de imazethapyr e a semeadura de arroz não tolerante.

A persistência do imazethapyr no solo depende das condições climáticas, das propriedades do solo e da dose do herbicida. O principal mecanismo de dissipação do imazethapyr no solo é a degradação microbiana aeróbica e com degradação anaeróbica praticamente inexistente (SHANER & O'CONNOR, 1991). Outra forma de dissipação do herbicida, que não envolve degradação, é a lixiviação para fora da região de absorção das raízes, sendo que para imazapyr, a quantidade do herbicida que lixivia no solo está diretamente relacionada ao pH e inversamente relacionada ao conteúdo de matéria orgânica (BORJESSON et al., 2004), porém, para imazethapyr, a lixiviação está mais relacionada com a permeabilidade do solo do que com os efeitos da sorção, sendo maior em solos arenosos e bem estruturados do que em solos argilosos e com pouca percolação (ONA et al., 2007). O movimento de imazethapyr em profundidade é maior quanto maior a quantidade de chuva, sendo mais importante para a lixiviação do que a intensidade (AYENI et al. 1998). Em condições de baixa precipitação, imazapyr concentrou-se na camada superficial, diminuindo drasticamente sua concentração abaixo de 10 cm. Já com altas precipitações, o herbicida atingiu maior profundidade, distribuindo-se mais uniformemente nos primeiros 15 cm de solo (McDOWELIL et al., 1997). Determinações de JOURDAN et al. (1998) identificaram que imazethapyr movimentou-se, num solo arenoso, em profundidade conforme transcorreram os dias após a aplicação (DAA) do herbicida. Nos primeiros cinco DAA o herbicida atingiu 20 cm, embora as maiores concentrações encontravam-se nos primeiros 10 cm. A maior concentração do produto aos 30 DAA encontrava-se nos primeiros 15 cm, detectando-se produto até 30 cm de profundidade. A partir dos 90 DAA a concentração nos primeiros cinco centímetros diminuiu, concentrando-se o herbicida

entre cinco e 30 cm de profundidade. De acordo com HOLLAWAY et al. (2006), o imazethapyr pode permanecer no solo por mais de três anos e alcançar 40 cm de profundidade.

VAN WYK & REINHARDT (2001) concluíram que imazethapyr lixivia rapidamente alcançando 30 cm de profundidade após uma chuva. Logo, durante o processo natural de perda de umidade do solo, o herbicida movimenta-se para acima conduzido pelas correntes de evaporação. Estes movimentos são mais pronunciados a pH mais elevados e a mobilidade deste herbicida no perfil do solo, decresce com o transcorrer do tempo de aplicação do produto (JOHNSON et al., 2000).

O conhecimento da profundidade de acúmulo do herbicida possibilita manejar a profundidade de semeadura de cultivos não tolerantes, como alternativa para diminuir o efeito residual do herbicida. O posicionamento das raízes ou outros órgãos de absorção (coleóptilo) fora da região de maior concentração de um herbicida é um dos mecanismos de seletividade (HOLLY, 1976). O arroz semeado mais profundo desenvolve coleóptilos mais compridos e um sistema radicular mais profundo, estando exposto à absorção de maior quantidade de herbicida com alta mobilidade no solo como o imazethapyr (ZHANG et al., 2000). Em sorgo, a fitotoxicidade por metholachlor aumenta na medida em que aumenta a profundidade de semeadura (KETCHERSID et al., 1998).

Em vista do exposto, o presente trabalho teve por objetivo determinar o efeito de dois sistemas de manejo de solo, na degradação e no posicionamento do imazethapyr em profundidade, em área de várzea cultivado com arroz.

Material e métodos

O experimento foi conduzido em solo de várzea, classificado como Planossolo Hidromórfico eutrófico arênico, com as seguintes características: (pH água(1:1)= 4,8; P= 6,0 mg dm⁻³; K= 120 mg dm⁻³; argila= 26%; M.O.= 2,3%; Ca= 5,0 cmolc dm⁻³; Mg= 2,0 cmolc dm⁻³ e Al= 1,7 cmolc dm⁻³ e índice SMP 5,1). Nas safras agrícolas 2004/05 e 2005/06 a área foi cultivada com arroz Clearfield (CL) e na safra agrícola 2006/07 com arroz não tolerante (NT). Nas safras com arroz CL foi aplicado imazethapyr+imazapic (Only[®]) na dose de 75+25 g ha⁻¹, respectivamente. Na entressafra de arroz CL e arroz NT foram adotados dois sistemas de manejo de solo,

plantio direto (PD), sem movimentação de solo, e plantio convencional (PC), com preparos de solo em abril, maio, agosto e outubro. Durante o mesmo período foi medida a profundidade do lençol freático uma vez por semana. Para o que foram construídos dois poços de observação por bloco com cano de PVC perfurados, de 90 cm de profundidade e cinco cm de diâmetro.

Após a colheita do arroz NT, foram coletadas, em cada parcela, amostras de solo a quatro profundidades, de 0-5, 5-10, 10-15, 15-20 cm. As amostras estiveram conformadas por três subamostras recolhidas em diferentes locais de cada parcela. Logo após coletadas, as amostras foram secas no ar e na sombra, posteriormente moídas e conservadas em freezer até serem feitas as análises de laboratório. A extração de imazethapyr foi feita com acetonitrila em banho de ultrassom e as quantificações utilizando cromatografia líquida de alta eficiência com detecção por arranjo de diodos (HPLC-DAD), com separação em coluna C18 (GONÇALVES, 2003).

Utilizou-se oito tratamentos oriundos da combinação de dois manejos de solo (PD e PC) com as quatro profundidades de amostragem (0-5, 5-10, 10-15, 15-20 cm) O delineamento experimental foi de bloco ao acaso, com quatro repetições, em arranjo fatorial. Os dados foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste Tukey ($P \geq 0,05$). Para a análise estatística, os dados foram transformados para $y_t = \sqrt{y + 0,5}$.

Resultados e discussão

Observou-se interação significativa entre os sistemas de manejo de solo e as profundidades de coleta, por isso será analisado o comportamento do imazethapyr para cada manejo de solo dentro das diferentes profundidades (Figura 4).

Analisando-se a concentração total do herbicida nos 20 cm, constata-se maior concentração no PD ($24,6 \mu\text{g kg}^{-1}$) em relação ao PC ($16,1 \mu\text{g kg}^{-1}$), indicando menor degradação do herbicida no sistema de PD. CURRAN et al. (1992b) encontraram que a fitotoxicidade residual de imazaquin e imazethapyr em milho, foi maior no sistema de PD do que no plantio convencional. RENNERT et al. (1998) comparando o efeito de diferentes sistemas de preparo de solo na dissipação do imazaquin encontraram que no preparo de solo com arado, o herbicida foi degradado mais que

no preparo com escarificador e este mais que no PD. ULBRICH et al. (2005) observaram aumentos na persistência de imazapic e imazapyr em dois solos com PD quando comparado com plantio convencional. Comparando preparos de solo com diferentes equipamentos, SEIFERT et al. (2001) não encontraram diferenças na degradação do imazaquin entre o preparo com arado e escarificador e resultados de MONKS & BRUKS (1993) mostram que não houve efeito de diferentes manejos de palha e de preparo de solo no residual de imazaquin e imazethapyr.

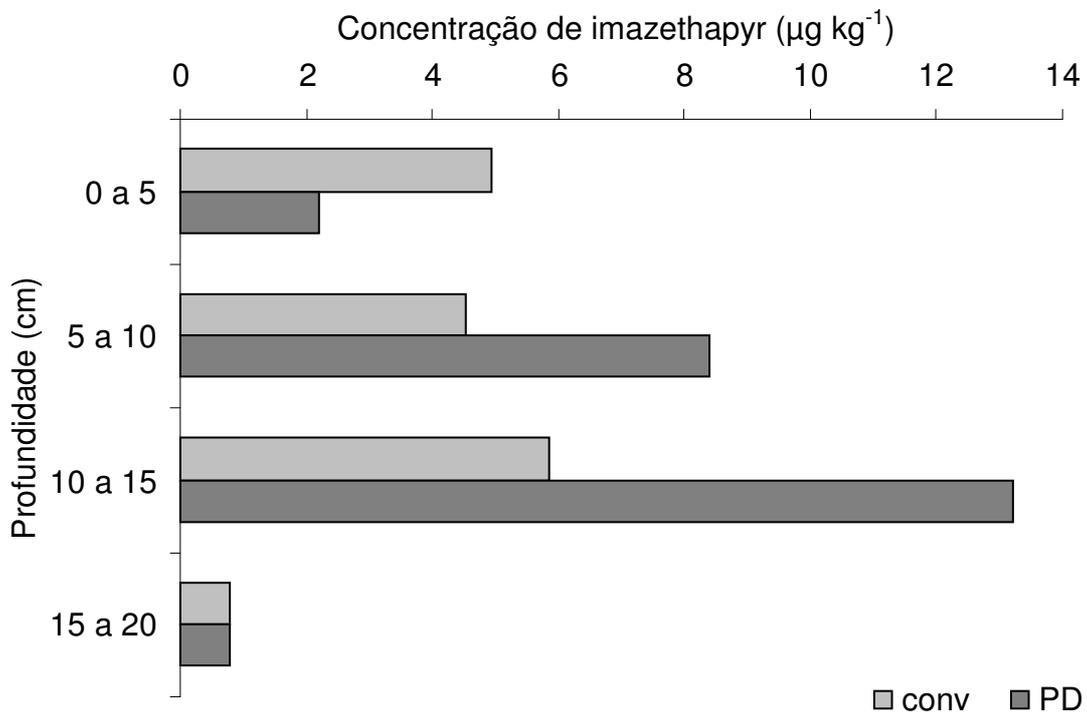


Figura 4 – Concentração de imazethapyr expressa em μg de ingrediente ativo por kg de solo ($\mu\text{g kg}^{-1}$), para dois manejos de solo, plantio convencional (PC) e plantio direto (PD) e quatro profundidades 0-5, 5-10; 10-15 e 15-20 cm após a coleta do arroz no terceiro ano num sistema de rotação dois anos arroz Clearfield e um ano arroz convencional.

Embora detectado em pequenas concentrações ($0,8 \mu\text{g kg}^{-1}$), imazethapyr lixiviou até 20 cm de profundidade independentemente do sistema de manejo utilizado (Figura 4). Resultados similares foram encontrados por RENNERT et al. (1998) com imazaquin que foi detectado até 18 cm de profundidade independentemente do sistema de preparo de solo empregado (arado escarificado e PD). Resultados de outros trabalhos indicam que o imazethapyr alcançou 30 cm de profundidade em solos com baixos conteúdos de argila, três meses após a aplicação

do herbicida (JOURDAN et al., 1998; McDOWELL et al., 1997; VAN WYK & REINHARDT, 2001).

No PC o herbicida distribuiu-se uniformemente nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-15 cm de solo, diminuindo sua concentração de 15 a 20 cm. No PD, no entanto, observou-se concentração crescente com o aumento da profundidade até 15 cm, sendo as mesmas de 2,2; 8,4 e 13,2 $\mu\text{g kg}^{-1}$ para as camadas de 0-5; 5-10; 10-15 cm de profundidade respectivamente, diminuindo drasticamente de 15-20 cm. A menor concentração do herbicida e a distribuição uniforme nas três camadas superficiais de solo (primeiros 15 cm) no PC, possivelmente estejam relacionadas com uma maior evaporação da água do solo, neste sistema quando comparado como PD. A temperatura média do solo foi maior no PC do que no PD (Apêndice D), gerando maior evaporação e dando origem a uma corrente ascendente de água maior no PC do que no PD, que arrastaria para a camada superficial ao herbicida, colocando-o numa região com maior aeração, temperatura e atividade microbiana. Esta hipótese encontra respaldo em resultados de VAN WYK & REINHARDT (2001) que relatam que imazethapyr lixivia rapidamente para as camadas subsuperficiais, mas que com as correntes geradas pela evaporação, é transportado novamente para a superfície.

Quando as condições ambientais favoreceram o desenvolvimento dos microorganismos, a degradação das imidazolinonas é acelerada e a atividade microbiana incrementa em média, 57%, após um preparo do solo como consequência da incorporação da matéria orgânica e a maior aeração (FRANCHINI et al., 2007). A temperatura do solo afeta a degradação das imidazolinonas, sendo que em solos cultivados sob temperaturas de 18 e 35°C, a degradação do imazethapyr foi de 66 e 100 %, respectivamente (BASHAM & LAVY, 1987). Nesse sentido, FLINT & WITT (1997) determinaram que a emissão de CO_2 por microorganismos aumentou com a presença de imazethapyr ou imazaquin, duplicando a atividade quando a temperatura passou de 15 para 30°C. Com o aumento da temperatura, observou-se redução na concentração de imazethapyr, que foi mais acentuada em solo úmido (JOURDAN et al., 1998). Autores como BASHAM & LAVY (1987) e BAUGHMAN & SHAW (1996) demonstraram que imazethapyr e imazaquin foram mais persistentes em solos com temperaturas mais baixas e reduzido conteúdo de umidade do que em solos com temperatura mais elevada e com maior umidade. Estas condições mais favoráveis à atividade

microbiológica estiveram mais bem contempladas no sistema PC, colaborando com a maior degradação do herbicida. Além disto, no PD, o imazethapyr acumulou-se de 5 a 15 cm e, durante o período de entressafra, o lençol freático esteve por nove semanas menor do que 20 cm de profundidade (Figura 5), deixando esta região em condições de anaerobiose por prolongados períodos de tempo. Como a principal via de degradação do imazethapyr é a degradação microbiana (FLINT & WITT, 1997; LOUX et al., 1989) e ela é promovida por microorganismos aeróbicos, sendo praticamente inexistente em anaerobiose (SHANER & O`CONNOR, 1991), isto estaria por sua vez, contribuindo para a menor degradação do herbicida no PD.

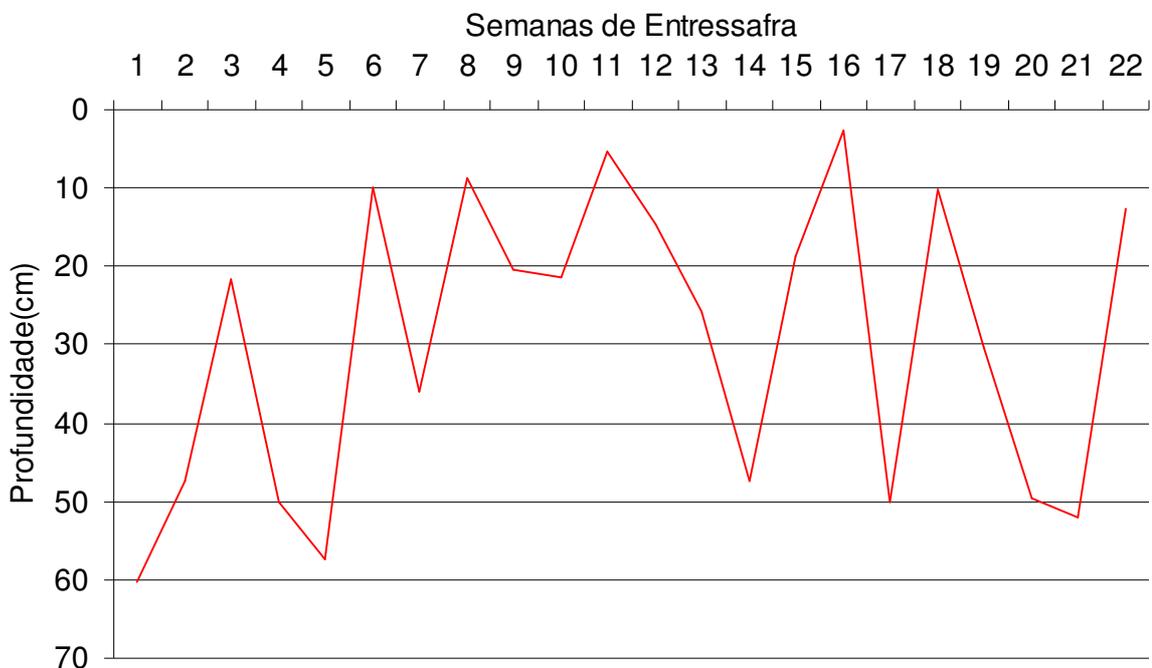


Figura 5 - Profundidade do lençol freático durante o período de entressafra (abril-outubro de 2006) em solo de várzea, registradas na área do experimento.

Conclusão

Ocorre maior degradação de imazethapyr no sistema convencional de cultivo do que no sistema de plantio direto.

Imazethapyr lixivia até 20 cm em solo de várzea, independente do sistema de cultivo.

O preparo de solo afeta a distribuição do imazethapyr no perfil do solo, sendo que no sistema PC o herbicida distribui-se uniforme nos primeiros 15 cm de

solo e no sistema de PD apresenta menor concentração de 0-5 cm e acumula-se de 5-15 cm de profundidade.

SUGESTÕES DE MANEJO

Para reduzir o efeito residual da mistura formulada dos herbicidas imazethapyr e imazapic (Only[®]):

1- Procurar distanciar o máximo possível a última aplicação de Only[®] e a semeadura da cultivar suscetível. Para isso, semear primeiro os quadros destinados ao último ano de arroz Clearfield[®], e na safra seguinte semear esses quadros entre os últimos da propriedade.

2- Preparar o solo imediatamente após a colheita do último ano de arroz Clearfield[®], incorporando a palha de arroz e, se possível, repetir uma ou duas vezes durante a entressafra, procurando não mexer o solo durante os 30-40 dias prévios a semeadura. Para isso, é preciso colher o arroz com o solo seco para evitar rastros e conseguir prepará-lo o antes possível. Isto é mais provável de se lograr em colheitas de fevereiro, pelo que é importante que seja executada a primeira recomendação.

3- Manter a área bem drenada durante a entressafra. Isto é fundamental para conseguir fazer as outras práticas, e é requisito indispensável para degradar o produto no solo.

4- Semear o arroz suscetível, o mais superficial possível, sobre solo firme. Para isso, é preciso deixar o solo pronto para ser semeado, sem mexer, no mínimo 30-40 dias antes da data de semeadura, e permitindo também com esta prática a lixiviação dos herbicidas para as camadas mais profundas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AICHELE, T.M.; PENNER, D. Adsorption, desorption, and degradation of imidazolinones in soil. **Weed Technol.**, v.19, p.154-159, 2005.

ALISTER, C.; KOGAN, M. Efficacy of imidazolinone herbicides applied to imidazolinone-resistant maize and their carryover effect on rotational crops. **Crop Protect.**, v.24, n.4, p.375-379, 2005.

ANGHINONI, I. et al. Fertilidade dos solos cultivados com arroz irrigado no Rio Grande do Sul. Cachoerinha: IRGA, 2004. 52 p. (Boletim Técnico. 1).

ARS. Pesticide properties database Acessado em 2001. Online. Disponível na Internet: <http://www.ars.usda.gov/Services/docs.htm?docid=14199>

AVILA, L.A. Imazethapyr: Red rice control and resistance, and environmental fate : Imazethapyr adsorption and availability in three soils as affected by soil moisture contend. 2005. Thesis (Doctor of Philosophy) – Texas A&M University, Texas, 2005.

AVILA, L.A. et al. Imazethapyr aqueous photolysis, reaction quantum yield, and hydroxyl radical rate constant. **J. Agric. Food Chem.**, v.54, p.2635-2639, 2006.

AYENI, A.O. et al. Rainfall influence on imazethapyr bioactivity in New Jersey soils. **Weed Sci.**, v.46, n.5, p.581-586, 1998.

AZAMBUJA, I.H.V., VERNETTI Jr. F. J. de, MAGALHÃES Jr. A. M. Aspectos socioeconômicos da produção do arroz. In: GOMES, A. da S.; JÚNIOR, A. M. de M. eds. **Arroz irrigado no sul do Brasil**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004, 899p.

AZZOUZI, M. et al. Photodegradation of imazapyr in the presence of humic substances. **Fres. Environm. Bull.**, v.8, p.478-485, 1999.

AZZOUZI, M. et al. Abiotic degradation of imazethapyr in aqueous solution. **J. Environm. Sci. Health.**, Part B- Pest, Food Contamin. Agricult. Wastes, v.37, p.445-451, 2002.

BALMER, M.E. et al., Photolytic transformation of organic pollutants on soil surfaces-an experimental approach. **Environm. Sci. Technol.**, v.34, p.1240-1245, 2000.

BARKANI, H. et al. Study of the phototransformation of imazaquin in aqueous solution: A kinetic approach. **J. Photochem. Photobiol., A: Chem**, v.170, p.27-35, 2005.

BASHAM, G.W.; LAVY, T.L. Microbial and photolytic dissipation of imazaquin in soil. **Weed Sci.**, v.35, p.865-870, 1987.

BATTAGLIN, W.A. et al. Occurrence of sulfonylurea, sulphonamide, imidazolinone, and other herbicides in rivers, reservoirs and ground water in the Midwestern United States, 1998. **Sci. Total Environm.**, v.248, p.123-133, 2000.

BAUGHMAN, T.A.; SHAW, D.R. Effect of wetting/drying cycles on dissipation patterns of bioavailability imazaquin. **Weed Sci.**, v.44, n.2, p.380-382, 1996.

BHALLA, P. et al.. Imazaquin herbicides. In: D.L. Shaner and S.L. O'Connor, eds. **The imidazolinone herbicides**. Boca Raton, Fl: CRC. p.239-246, 1991.

BIGGAR, J.W.; CHEUNG, M.W. Adsorption of picloram (4-amino-3,5,6-trichloropicolinic acid) on Panoche, Ephrata, and Palouse soils. Thermodynamic approach to the adsorption mechanism. **Proc. Soil Sci. Soc. Amer.**, v.37, p.863-868, 1973.

BRESNAHAM, G.A. et al. Influence of soil pH-Sortie interactions on imazethapyr to soil. **Weed Sci.**, v.48, p.1929-1934, 2000.

BÖRJESSON, E. et al. The fate of imazapyr in a Swedish railway embankment. **Pest Managem. Sci.**, v.60, n.6, p.544-549, 2004.

BOVEY, R.W.; SENSEMAN, S.A. Response of food and forage crops to soil-applied imazapyr. **Weed Sci.**, v.46, n.5, p.614-617, 1998.

CANTWELL, J.R. et al. Biodegradation characteristics of imazaquin and imazethapyr. **Weed Sci.**, v.37, p.815-819, 1989.

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

CROUGHAN, T.P. 1998. **Herbicide resistant rice**. [5,773,704]. 6-30-1998. U.S. Patent.

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

CURRAN, W.S. et al. Effect of tillage and application method on clomazone, imazaquin, and imazethapyr persistence. **Weed Sci.**, v.40, p.482-489, 1992b.

EHLERS, G.A.C.; LOIBNER, A.P. Linking organic pollutant (bio)availability with geosorbent properties and biomimetic methodology: A review of geosorbent characterisation and (bio)availability prediction. **Environm. Pollut.**, v.141, p.494-512, 2006.

FERNANDES DE OLIVEIRA, M. et al. Sorção do herbicida imazaquin em Latossolo sob plantio direto e convencional. **Pesq. Agropecu. Brasil.**, Brasilia, v.39, n.8, p.787-793, 2004.

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

FRANCHINI, J.C. et al. Microbiological parameters as indicators of soil quality under various soil management and crop rotation systems in southern Brazil. **Soil Tillage Res.**, v.92, p.18-29, 2007.

FRANK, M.P. et al. Effect of soil moisture and sample depth on pesticide photolysis. **J. Agric. Food Chem.**, v.50, p.2607-2614, 2002.

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.

GOETZ, A. et al. Degradation and field persistence of imazethapyr. **Weed Sci.**, v.38, p.421-428, 1990.

GONÇALVES, F.F. Estudo de métodos empregando HPLC-DAD: Estudo de métodos empregando hplc-dad e lc-ms/ms para a determinação de resíduos de herbicidas em água e solo do cultivo de arroz irrigado. 2003. 170 p. Tese (Doutorado em Química) - UFSM, Santa Maria, RS.

GRYMES, C. et al. Response of soybean (*Glycine max*) and rice (*Oryza sativa*) in rotational to AC 263,222. **Weed Technol.**, v.9, p.504-511, 1995.

HART, R. et al. Imazethapyr herbicide. In: D. Shaner and S. Connor, Editors, **The Imidazolinones Herbicides**, CRC Press, Boca Raton, FL, USA. 1991. p.247-256.

HOLLAWAY, K.L. et al. Persistence and leaching of imazethapyr and flumetsulam herbicides over a 4-year period in the highly alkaline soils of south-eastern Australia. **Austral. J. Exp. Agric.**, v.46, n.5, p.669-674, 2006.

HOLLY, K. Selectivity in relation to formulation and application methods. In: L.J. Audus, ed. **Herbicides: Physiology, Biochemistry, Ecology**. 2nd ed. London: Academy Press. 1976, v. 2, p. 249-277.

ISHIKI, R.R, et al. Photocatalytic degradation of imazethapyr herbicide at TiO₂/H₂O interface. **Chemosphere**, v.58, p.1461-1469, 2005.

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

JOHNSON, D.H. et al. Time-dependent adsorption of imazethapyr to soil. **Weed Sci.**, v.48, n.6, p.769-775, 2000.

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

KETCHERSID, M.L. et al. Rice response to clomazone. **Weed Sci.**, v. 46, p.374-380, 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. p 51-77.

LEON, V.W.J.; CARL, R.F. A bioassay technique detects imazethapyr leaching and liming-dependant activity. **Weed Technol.**, v.15, p.1-6, 2001.

LEVY Jr., R.J. et al. Effect of cultural practices on weed control and crop response in imidazolinone-tolerant rice. **Weed Technol.**, v.20, p. 249-254, 2006.

LITTLE, D.L. et al. Modeling root absorption and translocation of 5-substituted analogs of the imidazolinone herbicide, imazapyr. **Pestic. Sci.**, v.41, p.171-185, 1994.

LOPES, M.C.B. et al. Avaliação regionalizada de linhagens de arroz irrigado (*Oryza sativa* L.) no Rio Grande do Sul, Brasil, safra 2001/2002. In: **International Temperate Rice Conference**, 3, 2003, Punta del Este. Abstracts... Punta del Este: Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, 2003a. p.35.

LOPES, M.C.B. et al. Avaliação regional de genótipos de arroz Clearfield do Instituto Rio Grandense do Arroz, safra 2002/03. In: **Congresso brasileiro de Arroz Irrigado**, 3, 2003; Reunião da cultura do arroz irrigado, 25, 2003, Camboriú. Anais... Itajaí: Epagri, 2003b. p.31-33.

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

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

LU, B.R. Sustainable and safe utilization of rice biodiversity in the biotechnology era. In: **Fourth International Temperate Rice Conference**, 2004, Novara Italy. p.4-5, 2007.

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

MANGELS, G. **Behavior of the imidazolinone herbicides in soil**- A review of the literature. In: D. Shaner and S. Connor, Editors, *The imidazolinone Herbicides*, CRC Press, Boca Raton, FL, USA. 1991, p.191-209.

MALLIPUDI, N.M. et al. Photolysis of imazapyr (AC 243997) herbicide in aqueous media. **J. Agric. Food Chem.**, v.39, p.412-417, 1991.

MARCHESAN, E. et al. Efeito residual da mistura formulada de imazethapyr com imazapic em genótipo de arroz não tolerante, semeado 371 e 705 dias após a aplicação. In: **V Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado**, 2007, Pelotas, RS. Anais... Pelotas, SOSBAI, 2007a, v.2, p. 287-289.

MARCHESAN, E. et al. Residual da mistura formulada dos herbicidas imazethapyr e imazapic em área com cultivo sucessivo de arroz irrigado. In: **V Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado**, 2007, Pelotas, RS. Anais... Pelotas, SOSBAI, 2007b, v.2, p. 293-295.

MARIN, A.R. et al. Evaluación de sistemas de labranzas y siembra en arroz. In: **Proyecto Regional Arroz**. Campaña 1997-1998. Estación Experimental Agropecuaria INTA Corrientes, 1998. p. 53-62.

MARIN, A.R.; KRAEMER, A.F. Efecto de la densidad de plantas sobre el rendimiento de arroz. In: **International Temperate Rice Conference**, 3, 2003, Punta del Este. Abstracts... Punta del Este: Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, 2003.

MASSONI, P.F.S. et al. Controle de arroz vermelho em arroz tolerante a Imidazolinonas e o residual em genótipo de arroz não tolerante. In: **V Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado**, 2007, Pelotas, RS. Anais. Pelotas, SOSBAI, 2007, v.2, p. 230-233.

McDOWELL, R.W. et al. Dissipation of imazapyr, flumetsulam and thifensulfuron in soil. **Weed Res.**, v.37, p.381-389, 1997.

MENDEZ DEL VILLAR, P. InfoArroz - Informativo mensual del Mercado mundial del arroz. Octubre 2007, n. 4. In: <http://www.arroz.agr.br>.

MENEZES, V.G. et al. Eficiência agrônômica de herbicidas do grupo químico das imidazolinonas no controle de arroz vermelho e capim arroz e seletividade às plantas de arroz da linhagem IRGA 417-CL. In: **Congresso Brasileiro de arroz irrigado**, 2, 2001; Reunião da cultura do arroz irrigado, 24, 2001, Porto Alegre. Anais... porto Alegre: Instituto Rio Grandense do Arroz, 2001. p. 522-524.

MOHANTY, M. et al. Estimating impact of puddling, tillage and residue management on wheat (*Triticum aestivum*, L.) seedling emergence and growth in a rice-wheat system using nonlinear regression models. **Soil Tillage Res.**, v.87, p.119-130, 2006.

MONKS D.C. & BANKS P. A. Effect of straw, ash, and tillage on dissipation of imazaquim and imazetapyr. **Weed Sci.**, v41, p.133-137, 1993.

MOURA NETO, F.P. et al. Conversão de cultivares de arroz irrigado para tolerância a herbicida da classe das imidazolinonas. In: **V Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado**, 2007, Pelotas, RS. Anais... Pelotas, SOSBAI, 2007, v. 1, p. 46-49

ONA, S. et al. Sorption and predicted mobility of herbicides in Baltic soils. **Environm. Sci. Health**, Part B, v.42, n.6, p.641-647, 2007.

PEREZ, K.S.S. et al. Nitrogênio da biomassa microbiana em solo cultivado com soja, sob diferentes sistemas de manejo, nos Cerrados. **Pesq. Agropecu. Brasil**, v.40, n.2, p.137-144, 2005.

PIGNATELLO, J.J.; XING B. Mechanisms of slow sorption of organic chemicals to natural particles. **Environm. Sci. Technol.**, v.30, p.1-11, 1996.

PINTO, J.J.O. et al. Comportamento da cultura do sorgo granífero (*Sorghum bicolor*), cv BR 304, semeado em rotação com o arroz clearfield. In: **V Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado**, 2007, Pelotas, RS. Anais... Pelotas, SOSBAI, 2007a, v.2, 300-302.

PINTO, J.J.O. et al. Avaliação da atividade residual em solo da mistura formulada com os herbicidas imazapic + imazethapyr, para a cultura do arroz irrigado, cultivar IRGA 417. In: **V Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado**, 2007, Pelotas, RS. Anais... Pelotas, SOSBAI, 2007b, v.2, 307-309.

QUIVET, E. et al. Kinetic studies of imazapyr photolysis and characterization of the main photoproducts. **Toxicol. Environm. Chem.**, v.86, p.195-204, 2004.

QUIVET, E. et al. Hydrolytic and photolytic behaviour of imidazolinone pesticides. Case of imazamox and imazapyr. **Act. Chim.**, v.294, p.31-34, 2006a.

QUIVET, E. et al. Influence of metal salts on the photodegradation of imazapyr, an imidazolinone pesticide. **Pest Managem. Sci.**, v.62, p.407-413, 2006b.

REGITANO, J.B. et al. Atributos de solos tropicais e sorção de imazaquin. **Sci. Agric.**, v.58, p.801-807, 2001.

RENNER, K.A. et al. Effect of tillage and application method on corn (*Zea mays*) response to imidazolinone residues in soil. **Weed Technol.**, v.12, n.2, 281-285, 1998.

RIDDEL, P.J. & GUJJA, B. A Partnership response to the water resource implications of expected increases in irrigated rice production. **4th International Temperate Rice Conference**, 2007, Novara. Abstracts... Novara, Itália, 2007, p.6-7.

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

SEIFERT, S. et al. Imazaquim mobility and persistence in a Sarkey Clay soil as influenced by tillage systems. **Weed Sci.**, v.49, p.571-577, 2001.

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

SHANER, D.L.; O'CONNOR, S. **The Imidazolinones Herbicides**, CRC Press, Boca Raton, FL, USA. 1991.

SHANER, D.L.; SINGH, B.K.. Phytotoxicity of acetohydroxyacid synthase inhibitors is not due to accumulation of 2-ketobutyrate and/or 2-aminobutyrate. **Pl. Physiol.**, v.103, p.1221-1226, 1993.

SNYDER, C.S.; SLATON, D.N. Effects of soil flooding and drying on phosphorous reactions. **News & Views**, April, p.1-3, 2002.

SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO (SOSBAI). **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil**. Santa Maria, RS: SOSBAI, 2005. 159 p.

SOON, Y.K.; ARSHAD, M.A. Tillage and liming effects on crop and labile soil nitrogen in an acid soil. **Soil Tillage Res.**, v.80, p.23-33, 2005.

STOUGAARD, R.N. et al. Effect of soil type and pH on adsorption, mobility, and efficacy of imazaquin and imazethapyr. **Weed Sci.**, v.38, p.67-73, 1990.

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

TAN, S. et al. Herbicidal inhibitors of amino acid biosynthesis and herbicide-tolerant crops. **Amino Acids**, v.30, p.195-204, 2006.

TRIPATHI, R.P. et al. Influence of tillage and crop residue on soil physical properties and yields of rice and wheat under shallow water table conditions. **Soil Tillage Res.**, v.92, p.221-226, 2007.

ULBRICH, A.V.; SOUZA, R.P.; SHANER, D. Persistence and carryover effect of Imazapic and Imazapyr in Brazilian cropping systems. **Weed Technol.**, v.19, p.986-991, 2005.

U.S. Environmental Protection Agency. National water Quality Inventory: 1990. **Report to Congress. USEPA**, Washington DC. 1992.

U.S. Environmental Protection Agency. Pesticide in Ground Water Database: **National Summary**. Rep. 734-r-92: USEPA, Washington DC. 1993.

VAN VAN WYK, L.J.; REINHARDT, C.F. A bioassay technique detects imazethapyr leaching and liming-dependent activity. **Weed Sci.**, v.15, n.3, p.1-6, 2001.

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

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

WANG, X. et al. Biodegradation of imazapyr in typical soils in Zhejiang Province, China. **J. Environm. Sci.**, v.17, n.4, p.593-597, 2005.

WANG, X. et al. Degradation and metabolism of imazapyr in soils under aerobic and anaerobic conditions. **Int. J. Environm. Anal Chem.**, v.86, n.8, p.541-551, 2006.

WEI, Z.; WEIPING, L. Adsorption-desorption and photolysis of the herbicide imazethapyr in soil-water environment. **Sci. Sin.**, v.18, p.476-480, 1998.

WILLIAMS, B.J. et al. Weed management systems for Clearfield rice. **Louisiana Agric. Chemis.**, v.45, n.3, p.16-17, 2002.

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

APÊNDICE

Apêndice A TABELA - 2 Estande de plantas (Planta m⁻²), número de colmos (colmos m⁻²), estatura de plantas (estatura cm), número de panículas (panículas m⁻²), esterilidade de espiguetas (% esterilidades), número de grãos por panícula (grãos/panícula), peso de 1000 grãos (peso 1000 grãos) e produtividade de grãos (produtividade de grãos kg ha⁻¹.) das cultivares IRGA 422CL e IRGA 417 dos quatros experimentos comparativos analisados em forma conjunta.

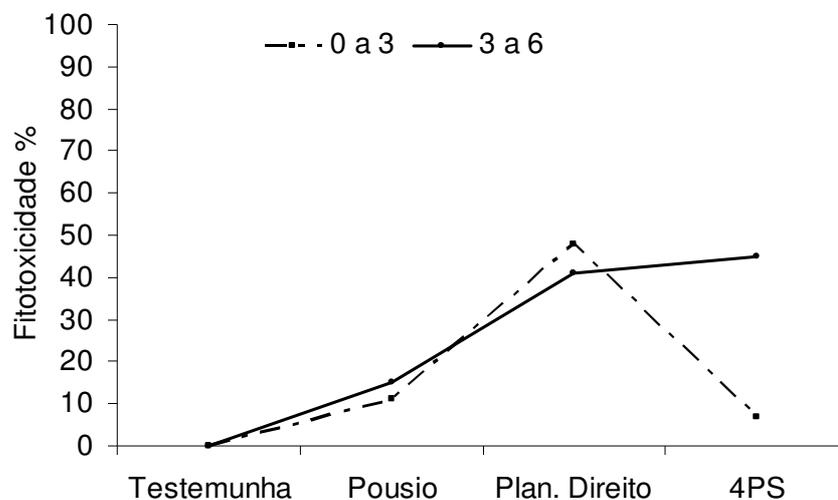
Cultivares	Plantas m ⁻²	Colmos m ⁻²	Estatura (cm).	Panículas m ⁻²	% esterilidade	Grãos/panícula	Peso (g) 1.000 grãos	Produtividade de grãos (kg ha ⁻¹) ¹⁾
IRGA 422CL	291	604	89	457	24	85	26,3	9069
IRGA 417	265	600	89	443	23	83	25,5	8944
Média	278	602	89	450	8,8	84	25,9	9007
CV%	17	12	3	14	17,3	16,9	5,5	9
Significância	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Locais*Cultivar	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

NS: não significativo, com probabilidade de erro P≤0,5.

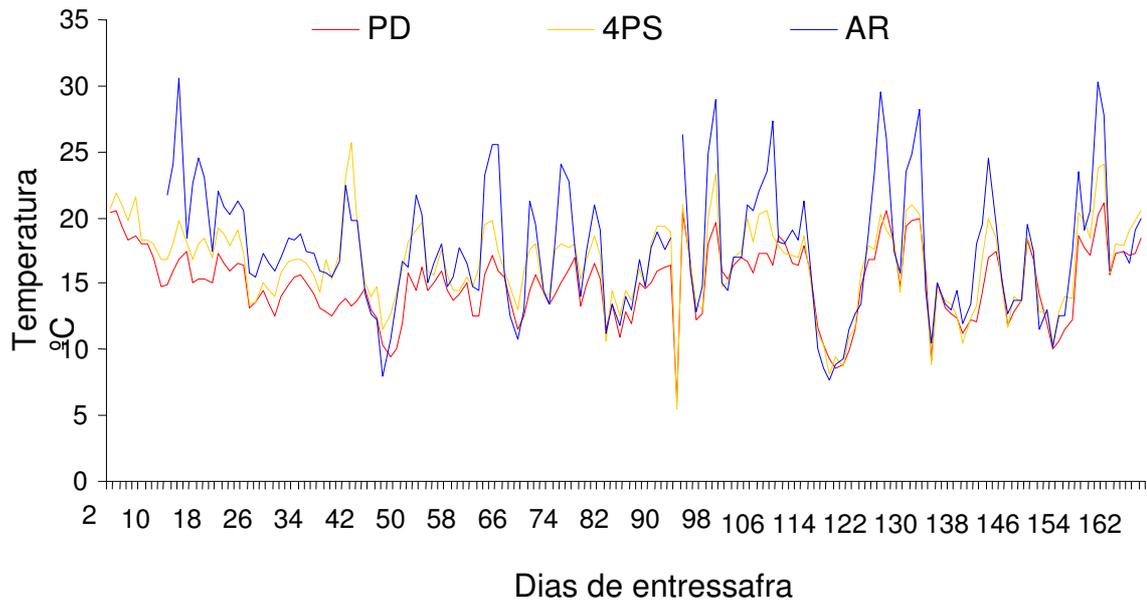
Apêndice B TABELA - 3 Dados do bioensaio. Fitotoxicidade residual dos herbicidas imazethapyr e imazapic e estatura de plantas (cm) do tomateiro 15 dias após emergência, semeados sobre amostras de solo coletadas das parcelas plantio direto (PD), quatro preparos de solo, pousio e testemunha, a duas profundidades, 0-3 cm e 3-6 cm.

Manejo de solos	Fitotoxicidade	Estatura
PD	47 a ¹	2,7 b
4PS	26 b	4,0 a
Pousio	13 b	3,4 ab
Testemunha	0 c	4,4 a
Significância ²	**	***
Profundidade solo		
0-3 cm	15 b	3,9 a
3-6 cm	28 a	3,3 b
Significância	**	*
Manejo*Profundidade	*	NS
CV%	38	24

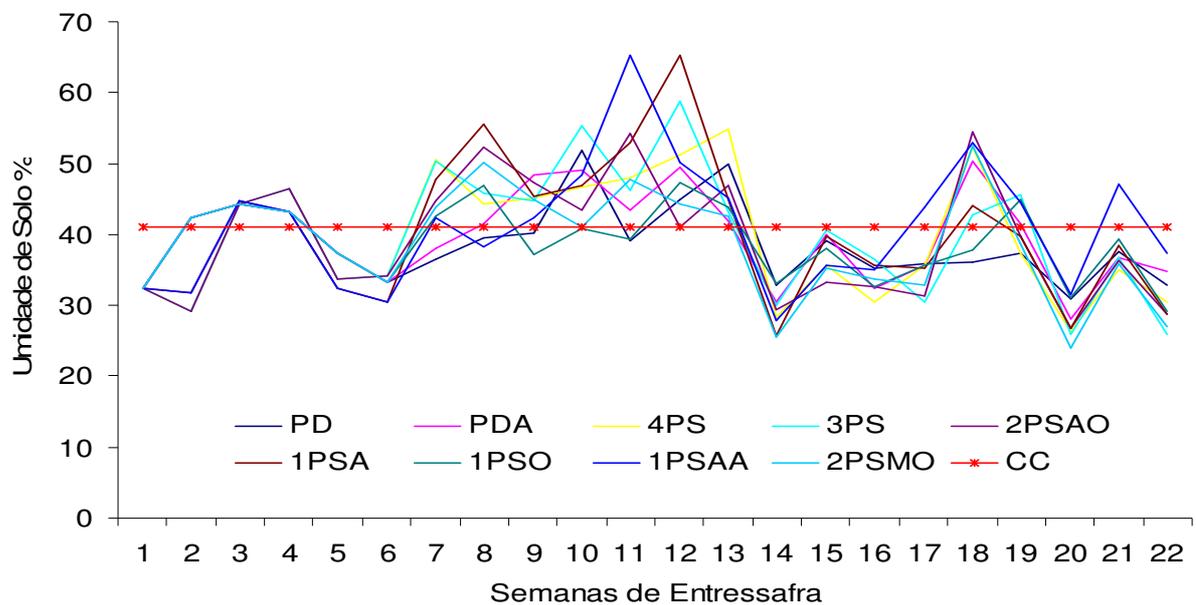
1 - Médias não seguidas da mesma letra diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$); 2 - NS não significativa, *** significativa $P \leq 0,001$, ** significativa $P \leq 0,01$, * significativa $P \leq 0,05$



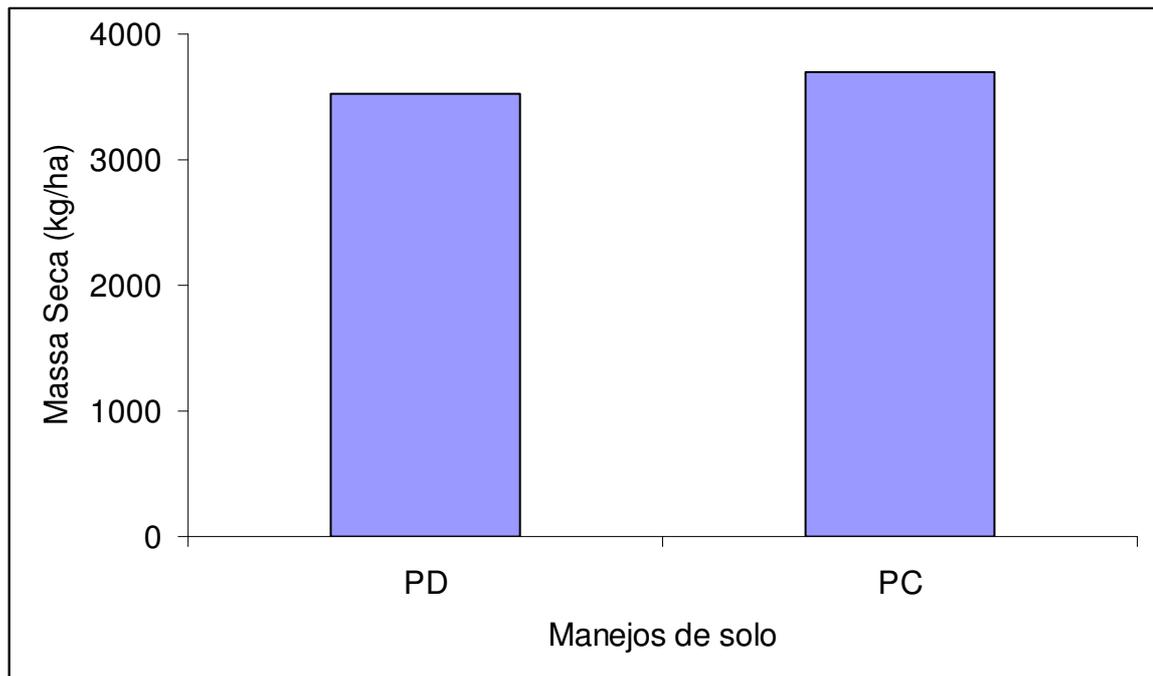
Apêndice C Figura – 6 Dados bioensaio. Fitotoxicidade residual dos herbicidas imazethapyr e imazapic em tomateiro 15 dias após emergência, semeados sobre amostras de solo coletadas das parcelas plantio direto (PD), quatro preparos de solo, pousio e testemunha, a duas profundidades, 0-3 cm e 3-6 cm.



Apêndice D Figura – 7– Temperaturas médias diárias do ar e temperatura média diária do solo aos três centímetros para os manejos de solo, plantio direto (PD) e plantio convencional com quatro preparos de solo (4PS) durante o período de entressafra (abril-outubro de 2006).



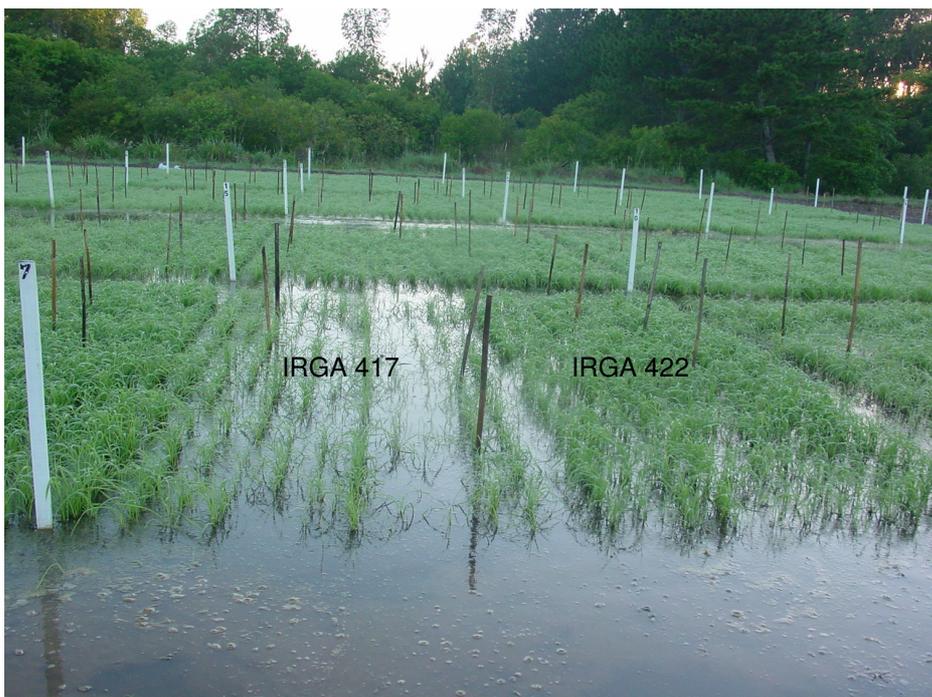
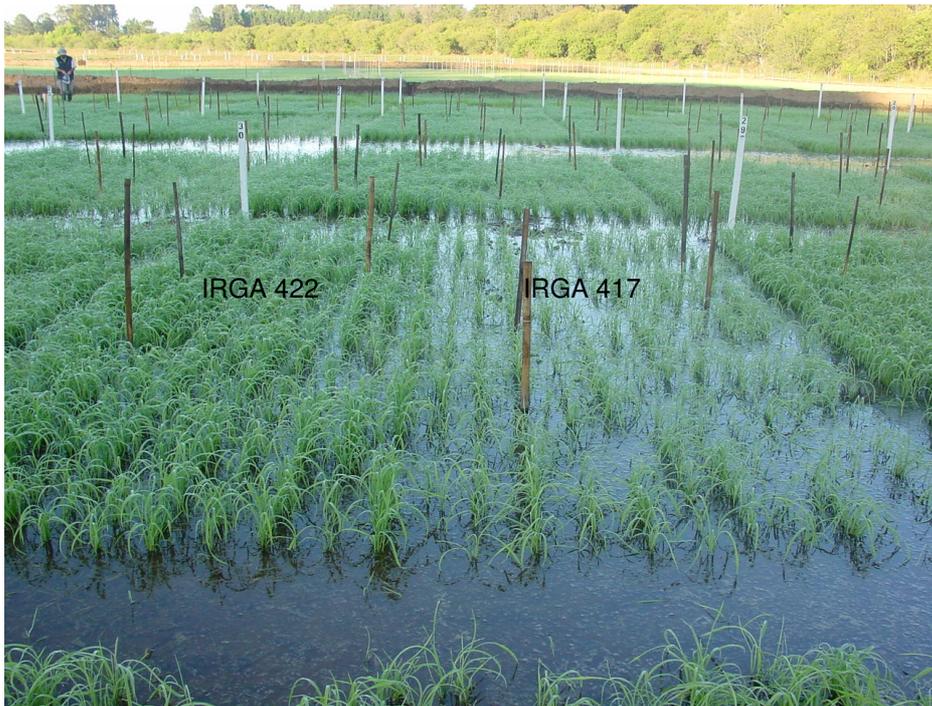
Apêndice E Figura – 8 Porcentagem de umidade do solo, nos primeiros 5 cm, para nove preparos de solo, durante o período de entressafra (abril-outubro de 2006) em solo de várzea, registradas na área do experimento e o conteúdo de umidade a capacidade de campo (CC) determinada no laboratório de Física de solos da UFSM.



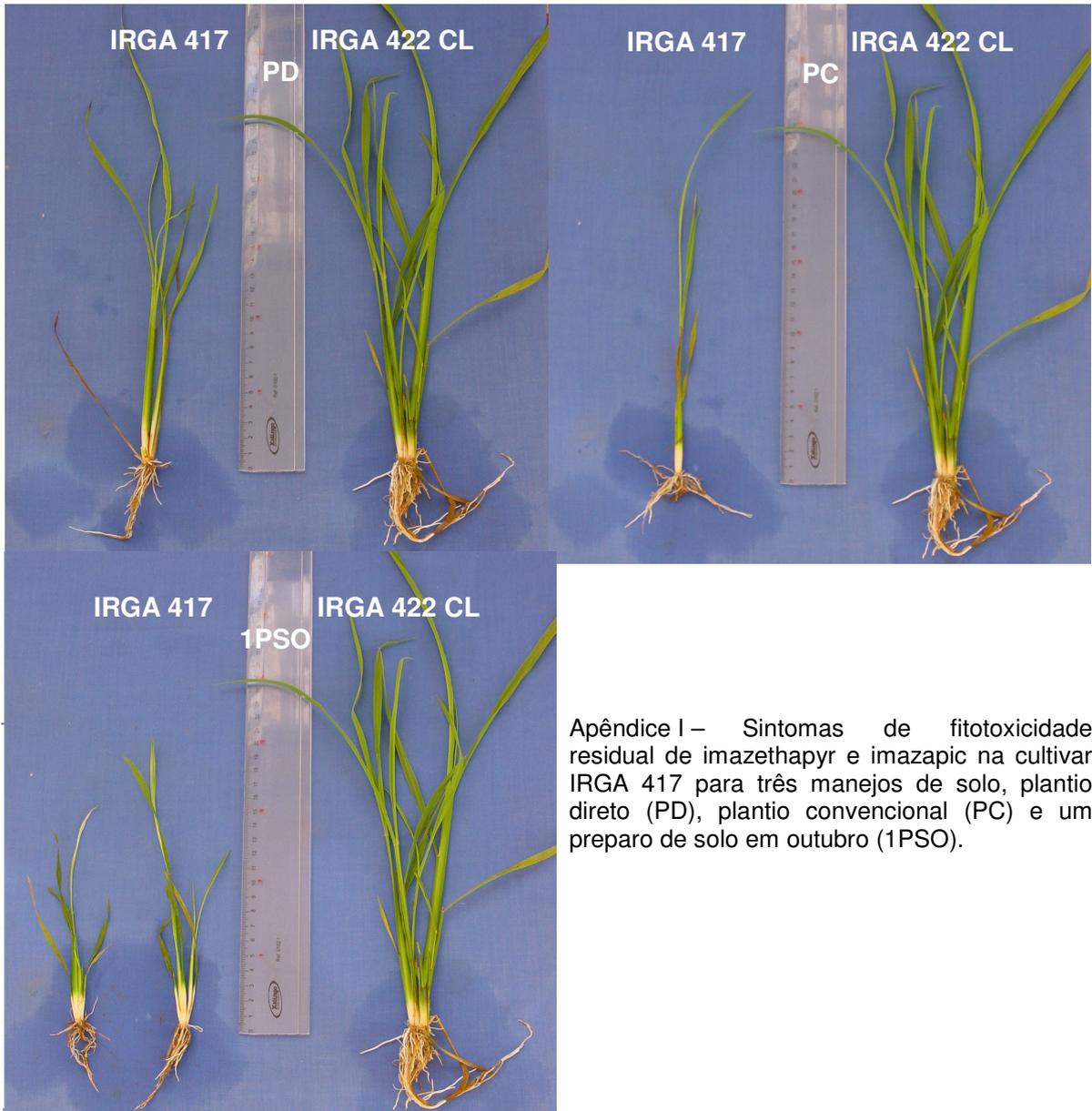
Apêndice F Figura – 9. Produção de azevém em kg/ha de massa seca para plantio direto (PD) e plantio convencional (PC), durante o período de entressafra (abril-outubro de 2006) em solo de várzea, na área do experimento.



Apêndice G – Diferentes preparos e umidade de solo, no momento da semeadura.



Apêndice H – Sintomas de fitotoxicidade residual de imazethapyr e imazapic em arroz.



Apêndice I – Sintomas de fitotoxicidade residual de imazethapyr e imazapic na cultivar IRGA 417 para três manejos de solo, plantio direto (PD), plantio convencional (PC) e um preparo de solo em outubro (1PSO).