

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA  
CAMPUS SÃO GABRIEL  
GESTÃO AMBIENTAL  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**BEATRIZ WARDZINSKI BARBOSA**

**FITORREMEDIÇÃO E EMISSÃO DE CO<sub>2</sub> DE SOLOS DE MATA  
NATIVA E DE LAVOURA CONTAMINADOS COM OS HERBICIDAS  
IMAZAPIR+IMAZAPIQUE E IMAZETAPIR**

**São Gabriel  
2017**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA  
CAMPUS SÃO GABRIEL  
GESTÃO AMBIENTAL  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**BEATRIZ WARDZINSKI BARBOSA**

**FITORREMEDIAÇÃO E EMISSÃO DE CO<sub>2</sub> DE SOLOS DE MATA  
NATIVA E DE LAVOURA CONTAMINADOS COM OS HERBICIDAS  
IMAZAPIR+IMAZAPIQUE E IMAZETAPIR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Curso de Gestão Ambiental da Universidade  
Federal do Pampa, como requisito parcial para  
obtenção do Título de Bacharel em Gestão  
Ambiental.

Orientadora: Mirla Andrade Weber

**São Gabriel  
2017**

**BEATRIZ WARDZINSKI BARBOSA**

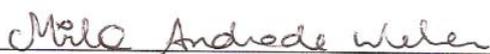
**FITORREMEDIAÇÃO E EMISSÃO DE CO<sub>2</sub> DE SOLOS DE MATA NATIVA E DE LAVOURA CONTAMINADOS COM OS HERBICIDAS IMAZAPIR+IMAZAPIQUE E IMAZETAPIR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Gestão Ambiental da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Gestão Ambiental.

Área de concentração: Solos e meio ambiente

Monografia defendida e aprovada em: 04 de julho de 2017.

Banca examinadora:



---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Mirla Andrade Weber  
Orientadora  
(UNIPAMPA)



---

Prof. Dr. André Cruz Copetti  
(UNIPAMPA)



---

Prof. Dr. Frederico Costa Beber Vieira  
(UNIPAMPA)

Dedico esta Monografia à minha mãe, sem a qual eu nunca teria chegado até aqui.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço à minha mãe Rosa, que desde sempre batalhou sozinha para criar três filhos e que, com muito esforço, pôde me dar a oportunidade de me graduar em um ensino superior. Espero ainda poder retribuir à altura tudo o que você fez e ainda faz por mim. Te amo.

À minha orientadora Mirla Weber pela paciência, compreensão, amizade, palavras encorajadoras e enorme conhecimento. Eu realmente não poderia ter escolhido outra orientadora melhor. Você esteve comigo em toda essa jornada, obrigada por tudo.

À minha irmã Gabriela, por ter me recebido tão bem todas as vezes que eu voltava para casa nas férias. Pelos cinemas, restaurantes/comidas, caronas e passeios todos pagos. Algum dia também espero retribuir (se todos os presentes agora não acabarem indo para a Valentina).

Ao meu irmão Narciso por todas as vezes que me buscou e me levou ao aeroporto e até mesmo às cervejas que, de vez em quando, me trazia como presente.

À Jeniffer Lopes, que esteve do meu lado durante três anos. As nossas vidas tomaram caminhos diferentes, mas eu não teria aguentado tudo isso se você não estivesse ao meu lado no momento em que decidi mudar drasticamente o rumo da minha vida. Obrigada do fundo do meu coração. Eu nunca vou te esquecer.

Ao meu melhor amigo dos tempos de São Borja, Phillipp Gripp. Carrego você dentro do meu coração todos os dias, mesmo quando sumo por muito tempo. Espero que nosso destino se cruze novamente e possamos reviver todos aqueles cafés da tarde ao pôr do sol com croissant e café recém passado.

À minha melhor amiga dos tempos de São Gabriel, Monique Lagemann. Obrigada por aguentar todas as minhas crises, exageros, sono e louças não lavadas. Na minha segunda etapa de estadia nessa cidade, você se mostrou essencial na minha vida. Era quem me ajudava a colocar a cabeça no lugar, quem me dava puxões de orelha quando eu precisava (e como precisei!). Ainda vamos morar juntas novamente e jogar várias partidas de Detetive.

A todos os meus amigos, em especial àqueles que possuem um cantinho maior no meu coração: Ariel Barcelos, Caroline Vian, Elis Rigoni, Gian Facchini, Joana Leite, Kellyn Klein, Maize da Luz, Marina Almeida, Natália Leme, Nycolas Ribeiro, Tuanny Anjos e Vítor de Paiva.

À Universidade Federal do Pampa, que me possibilitou ter uma educação superior gratuita e de qualidade.

Ao pessoal do LabSEF que me ajudou em alguma etapa dos meus estudos: Alisson, Bruno, Cristiano, Décio, Daniel, Jéssica, Josiane, Letiéri, Luan, Luanna, Querina, Roberto e Vanessa. Todos ainda vão chegar longe. Vocês são incríveis.

À técnica Rosângela Nunes, pela ajuda inestimável no laboratório – me perdoe por eventuais sujeiras não intencionadas e pelas vezes que esquecia de usar jaleco.

Ao professor Leandro Lorentz pela ajuda estatística, essencial na reta final desse trabalho.

À técnica Daiane Balconi, pela ajuda nos preparos das soluções e reagentes.

A todos os professores que fizeram parte da minha trajetória acadêmica, sem os quais eu não teria 5% do conhecimento que tenho hoje: Ana Júlia, André, Andressa, Beatriz, Cibelle, Cristiane, Fabiano, Franclin, Hamilton, Jeferson, Leandro, Lúcia, Luciano, Luiz, Márcia, Margeli, Mirla, Nara, Rafael, Ricardo, Ronaldo, Rubem, Suzy, Victor. Em especial Frederico Vieira, sem o qual nossas apresentações de seminários não teriam contribuições e conselhos tão valiosos como tiveram.

A todos os professores que tive durante a vida, do ensino infantil até o fundamental e médio. Principalmente à Maria Luiza, que me deu as melhores aulas da minha vida. Meu sonho é falar tão bem a língua portuguesa como você.

À minha gata adotiva de São Gabriel, Atheninha. Você foi uma companheira e tanto. Eu teria enlouquecido se não tivesse você para me acordar de madrugada querendo jogar bolinha e indo ronronar no meu peito quando eu estava me sentindo sozinha.

Aos meus bichinhos de Vinhedo, Billy e Nininha. Em quase todas as vezes que eu voltei para casa, vocês foram os primeiros que eu abracei. Meu coração dói só de pensar no tempo que passei longe de vocês, principalmente do meu velhinho.

Sou muito grata por todos vocês, muito obrigada.

“O solo exige que as pessoas também sejam simples para que elas possam amá-lo. Pois se as pessoas se acreditam muito poderosas e importantes, elas se esquecem do solo, elas se esquecem da sua origem, se esquecem de que na realidade também pertencem à natureza. E isso nós não podemos nos esquecer nunca, porque se nos esquecermos disso, então a vida na Terra acaba.”

Ana Maria Primavesi

## RESUMO

O uso excessivo de pesticidas na agricultura no Brasil está ocasionando, cada vez mais, impactos negativos ao meio ambiente. A utilização exclusiva dos herbicidas do grupo químico das imidazolinonas no sistema Clearfield<sup>®</sup>, utilizado em larga escala, principalmente no Rio Grande do Sul, para combater a planta daninha arroz-vermelho na cultura do arroz irrigado, pode causar problemas em culturas sensíveis através de seu efeito residual no solo. Essas substâncias podem causar impactos difíceis de serem previstos por conta da complexidade das relações entre contaminante/solo, além de serem facilmente lixiviados para as águas subterrâneas e superficiais. A biorremediação é uma técnica que utiliza a comunidade microbiana e plantas (fitorremediação) na degradação, extração, estabilização, metabolização e/ou compartimentalização do poluente no solo ou na água. Em vista do exposto, o presente trabalho teve como objetivos: 1) avaliar a emissão de CO<sub>2</sub> de solos de mata nativa e lavoura, com e sem resíduos de cobertura, contaminados com os herbicidas imazetapir e imazapir+imazapique em três diferentes doses; 2) avaliar o potencial remediador das espécies *Lotus corniculatus* e *Lolium multiflorum*, utilizando *Raphanus sativus* como espécie bioindicadora, através da produção da matéria seca da parte aérea das três espécies - incluindo na bioindicadora a análise da taxa de emergência -, em solos de mata nativa e lavoura, contaminados por imazapir+imazapique em três doses. Os resultados demonstraram que no estudo de emissão de CO<sub>2</sub>, sem e com resíduo de cobertura, e no estudo de fitorremediação, o solo foi o principal fator a influenciar na atividade microbiana, sendo o solo de mata nativa o que propiciou a maior emissão de gases, produção de matéria seca da parte aérea das plantas e taxa de emergência. As diferentes doses não influenciaram na taxa de emissão de CO<sub>2</sub>, produção de matéria seca e emergência. O imazapir+imazapique foi responsável pela maior emissão significativa de CO<sub>2</sub> no solo de mata nativa, apresentando diferença estatística quando comparado com o imazetapir no experimento sem resíduo de cobertura. Não houve diferença estatística entre as espécies remediadoras.

Palavras-chave: Remediação de solo. Poluente orgânico. Espécie remediadora. Espécie bioindicadora.

## ABSTRACT

The excessive use of pesticides in agriculture in Brazil is causing many negative impacts on the environment. The exclusive use of herbicides from the chemical group of imidazolinones in the Clearfield® system, used in large scale, mainly in Rio Grande do Sul, to combat red rice weed in flooded rice fields can cause problems in sensitive crops due to their residual effect in the soil. These substances can cause impacts that are difficult to predict due to the complexity of the relationship between contaminant/soil, and are easily leached into groundwater and surface waters. Bioremediation is a technique that uses microbial community and plants (phytoremediation) in the degradation, extraction, stabilization, metabolization and/or compartmentalization of the pollutant in the soil or water. In view of the above, the present work aimed: 1) to evaluate the CO<sub>2</sub> emission of native forest soil and tillage soil, with and without cover residues, contaminated with the herbicides imazethapyr and imazapyr+imazapic in three different doses; 2) to evaluate the remedial potential of the species *Lotus corniculatus* and *Lolium multiflorum* using *Raphanus sativus* as bioindicator, through the dry matter production of the shoot tissue of the three species - including in the bioindicator the germination rate analysis -, in native forest soil and tillage soil, contaminated with imazapyr+imazapic in three doses. The results showed that soil was the main factor influencing the microbial activity in the study of CO<sub>2</sub> emissions, with and without cover residue, and in the study of phytoremediation, being the native forest soil the one who provided the greatest emission of gases, dry matter production of the shoot and germination rate. Different doses did not influence the rate of CO<sub>2</sub> emission, dry matter production and germination. The imazapyr+imazapic was responsible for the greater significant emission of CO<sub>2</sub> in the soil of native forest, presenting statistical difference when compared to imazethapyr in the experiment without cover residue. There was no statistical difference between the mediator species.

Keywords: Soil remediation. Organic pollutant. Mediator specie. Bioindicator specie.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Soma acumulada de emissão de CO <sub>2</sub> por tratamento no experimento sem resíduo de cobertura.....	29
FIGURA 2 - Soma acumulada de emissão de CO <sub>2</sub> por tratamento no experimento com resíduo de cobertura.....	32

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Carbono orgânico total (COT) e granulometria dos solos de mata nativa e lavoura nas camadas de 0 a 20 centímetros de profundidade.....	25
TABELA 2 - Análise de variância da taxa de emissão de CO <sub>2</sub> (mg 100g <sup>-1</sup> ) no experimento sem resíduo de cobertura.....	30
TABELA 3 - Médias de emissão de CO <sub>2</sub> (mg 100g <sup>-1</sup> ) na interação entre os solos de mata nativa e lavoura e os herbicidas imazetapir e imazapir+imazapique nas três doses aplicadas no experimento sem resíduo de cobertura.....	31
TABELA 4 - Análise de variância da taxa de emissão de CO <sub>2</sub> (mg 100g <sup>-1</sup> ) no experimento com resíduo de cobertura.....	33
TABELA 5 - Médias da emissão de CO <sub>2</sub> (mg 100g <sup>-1</sup> ) na interação entre os solos de mata nativa e lavoura e os herbicidas imazetapir e imazapir+imazapique no experimento com resíduo de cobertura.....	34
TABELA 6 - Análise de variância da produção de matéria seca da parte aérea (g) das espécies remediadoras <i>L. corniculatus</i> e <i>L. multiflorum</i> .....	35
TABELA 7 - Médias de produção de matéria seca da parte aérea (g) por vaso na interação entre os solos de mata nativa e lavoura e as espécies remediadoras <i>L. corniculatus</i> e <i>L. multiflorum</i> .....	36
TABELA 8 - Médias da produção de matéria seca da parte aérea (g) por vaso das plantas remediadoras na interação entre os solos de mata nativa e de lavoura e dose de imazapir+imazapique.....	37
TABELA 9 - Análise de variância da taxa de emergência (%) da espécie bioindicadora <i>Raphanus sativus</i> .....	38
TABELA 10 - Médias da taxa de emergência (%) do <i>Raphanus sativus</i> na interação entre os solos de mata nativa e lavoura sem planta, com <i>L. corniculatus</i> e com <i>L. multiflorum</i> .....	39
TABELA 11 - Análise de variância da produção de matéria seca da parte aérea (g) por vaso da espécie bioindicadora <i>Raphanus sativus</i> .....	39

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	13
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	16
2.1 Herbicidas .....	16
2.2 O grupo químico das imidazolinonas .....	17
2.3 Imazetapir e imazapir+imazapique .....	19
2.4 Biorremediação .....	20
2.5 Plantas remediadoras: azevém e cornichão .....	22
2.6 Estudos semelhantes .....	23
2.7 Taxa de emissão de CO <sub>2</sub> .....	24
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	25
3.1 Estudo 1 – Emissão de CO <sub>2</sub> em solo de mata nativa e lavoura contaminados com imazetapir e imazapir+imazapique, com e sem resíduo de cobertura .....	25
3.1.1 Experimento 1 – Sem resíduo de cobertura (SRC) .....	25
3.1.2 Experimento 2 – Com resíduo de cobertura (CRC) .....	27
3.2 Estudo 2 – Fitorremediação de solo de mata nativa e lavoura, contaminados com mistura formulada de imazapir+imazapique.....	27
3.3 Análise estatística .....	28
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	29
4.1 Estudo 1 – Emissão de CO <sub>2</sub> em solo de mata nativa e lavoura contaminados com imazetapir e imazapir+imazapique, com e sem resíduo de cobertura .....	29
4.1.1 Taxa de emissão de CO <sub>2</sub> no experimento sem resíduo de cobertura .....	29
4.1.2 Taxa de emissão de CO <sub>2</sub> no experimento com resíduo de cobertura .....	32
4.2 Estudo 2 - Fitorremediação de solo de mata nativa e lavoura, contaminados com mistura formulada de imazapir+imazapique.....	35
4.2.1 Produção de matéria seca da parte aérea das espécies remediadoras <i>L. corniculatus</i> e <i>L. multiflorum</i> .....	35
4.2.2 Taxa de emergência e produção de matéria seca da parte aérea da espécie bioindicadora <i>Raphanus sativus</i> .....	37
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	41
<b>6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	42

## 1 INTRODUÇÃO

A Revolução Verde teve início em 1966 e a soma de variáveis tecnológicas como investimentos em pesquisa agrícola, infraestrutura, desenvolvimento de mercado, suporte político, melhoramentos genéticos – principalmente nas culturas do trigo, arroz e milho (PINGALI, 2012), abertura de novas fronteiras agrícolas, uso de fertilizantes e agroquímicos, intensificação do uso do solo e adoção de plantios adensados (MANCUSO et al., 2011), proporcionou vantagens e prejuízos em escala mundial. A produção de alimentos aumentou significativamente - o que foi necessário devido ao crescimento da população nas últimas décadas – ao mesmo tempo em que os preços diminuíram. Apesar da população ter dobrado nos últimos 50 anos, a produção de cereais triplicou com um aumento de apenas 30% da área cultivada. Os rendimentos nos países desenvolvidos, entre os anos de 1960 e 2000, cresceram 208% para o trigo, 109% para o arroz, 157% para o milho, 78% para a batata e 36% para a mandioca (PINGALI, 2012).

Sendo o terceiro setor o mais expressivo no Brasil, esse aumento refletiu no crescimento do Produto Interno Bruto (PIB) do país e, conseqüentemente, no lucro dos produtores. Entretanto, a expansão da agricultura culminou também no aumento das emissões de gases de efeito estufa, contaminação e degradação dos recursos hídricos e do solo. A diminuição dos rendimentos agrícolas desde a metade da década de 80 pode, em parte, ser associada à degradação dos recursos necessários à agricultura (PINGALI, 2012). A presença de contaminantes químicos nos solos é responsável pelo desenvolvimento de doenças tanto em animais como em seres humanos, através da entrada do contaminante na cadeia trófica, como pelos desequilíbrios ambientais que pode causar, já que as conseqüências das interferências em um sistema ecológico complexo são difíceis de serem previstas.

Os defensivos agrícolas, também chamados de pesticidas, podem ser divididos de acordo com o grupo de organismo-alvo que combatem: herbicidas, inseticidas, fungicidas, nematicidas e raticida (BRADY & WEIL, 2013). Entre essas classificações, a que mais obtém investimentos financeiros é a dos herbicidas. E, apesar dos prejuízos ambientais, a agricultura brasileira expandiu e se desenvolveu significativamente por conta desse tipo de defensivo (MANCUSO et al., 2011). O excesso na aplicação e a falta de cuidados no armazenamento e disposição final das embalagens desses produtos químicos, aumentaram significativamente os casos de contaminação ambiental, principalmente nas áreas onde o cultivo agrícola é

expressivo, como na Região Sul do Brasil - do arroz produzido em terras brasileiras, mais de 60% provém do estado do Rio Grande do Sul, com o equivalente a 1 milhão de hectares (ZANELLA et al., 2011).

De acordo com Jurado et al. (2011), os herbicidas possuem inúmeros efeitos, alguns desejáveis e outros não. Na lista das vantagens de sua utilização nas lavouras, são citados os itens: matam as plantas indesejadas; ajudam no crescimento da cultura, destruindo as ervas daninhas que competem por água, nutrientes e luz solar; podem ser utilizados com sucesso nos casos em que a capinagem manual ou mecânica pode destruir a plantação; podem ser utilizados em plantios próximos, onde outros métodos não podem ser utilizados; geralmente, uma aplicação do herbicida é suficiente, enquanto outros métodos têm que ser utilizados continuamente; fácil utilização; ação rápida; são relativamente baratos e possuem menor custo em comparação com a capinagem manual; podem limpar áreas onde casas e estradas irão ser construídas, de maneira efetiva; podem matar plantas com enfermidades; alguns são biodegradáveis e se tornam relativamente inofensivos após a decomposição.

Na lista de desvantagens, os itens citados são: todos os herbicidas são ao menos ligeiramente tóxicos; podem causar doenças e até mesmo causar morte acidental ou suicida (como o paraquat); podem ser carregados para os rios através do escoamento da água da chuva ou lixiviados para os armazenamentos de águas subterrâneas, poluindo-os; os herbívoros podem comer as plantas tratadas com herbicidas e então, serem comidos pelos carnívoros - o herbicida tóxico entra na cadeia alimentar e aumenta sua concentração, sendo perigoso para estes animais e seres humanos.

Pesquisas ecotoxicológicas comprovaram nos últimos anos que as substâncias ativas de herbicidas presentes na água e no solo são, mesmo em pequenas quantidades, fitotóxicas (PIOTROWICZ-CIEŚLAK & ADOMAS, 2012). Além do uso excessivo de agroquímicos, o intenso uso do solo e a aplicação de técnicas convencionais de manejo ajudam a piorar os impactos negativos ao meio ambiente. Dessa maneira, faz-se necessário o emprego de técnicas de recuperação das áreas degradadas e, entre elas, incluem-se as de biorremediação – a qual é realizada, como o próprio nome sugere, pelo emprego de seres vivos, geralmente microrganismos ou plantas, na degradação de contaminantes orgânicos ou inorgânicos. Algumas espécies vegetais apresentam resistência natural a certos tipos de herbicidas e demonstram até mesmo potencial para degradar, estabilizar ou transformar esses contaminantes, contribuindo para a recuperação desses locais degradados.

Em vista do exposto, o presente trabalho teve como objetivos: 1) avaliar a atividade microbiana através da emissão de CO<sub>2</sub> de solos de mata nativa e lavoura contaminados por

herbicidas do grupo das imidazolinonas em três diferentes doses, em tratamentos com e sem resíduo de cobertura; 2) comparar duas espécies vegetais com potencial para a fitorremediação em solos de mata nativa e de lavoura contaminados por imazapir+imazapique em três diferentes doses, buscando avaliar, através da produção de matéria seca da parte aérea das espécies indicadoras e bioindicadora, além da taxa de emergência desta, se elas apresentam algum efeito remediador no solo.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Herbicidas

Os herbicidas são utilizados na agricultura para o controle de plantas, especialmente de ervas daninhas. A maioria deles são biodegradáveis e possuem toxicidade baixa em mamíferos. Porém, alguns são altamente tóxicos aos peixes e à fauna edáfica, além de poderem apresentar efeitos indesejáveis à vegetação aquática (BRADY & WEIL, 2013).

Cada herbicida possui um mecanismo e um modo de ação. O mecanismo de ação é o primeiro ponto do metabolismo da planta onde o defensivo atua. O modo de ação é o conjunto desses eventos metabólicos, inclusive os sintomas visíveis na planta. Dessa maneira, os herbicidas são divididos de acordo com o seu mecanismo de ação e grupo químico, com classificação proposta internacionalmente pelo *Herbicide Resistance Action Committee* (HRAC). Atualmente, inúmeras formulações de diferentes grupos químicos são disponibilizadas no mercado, como por exemplo, as imidazolinonas, triazinas, uracilas, carbamatos, sulfonilureias, dinitroanilinas, acetanilidas, entre outros (OLIVEIRA JR. et al., 2011).

De acordo com a sua composição e indicação, podem ser considerados pré e/ou pós emergentes, isto é, são aplicados antes e/ou após a germinação da planta. Além disso, podem ser considerados seletivos ou não seletivos, ou seja, matar apenas algumas espécies ou todas as espécies vegetais, como é o caso do glifosato.

O sistema Clearfield® - o qual não é considerado transgênico, por não conter material genético importado de outras espécies vegetais, animais ou bactérias (KIFIX, [s. a.]) - utiliza genótipos de arroz resistentes aos herbicidas do grupo químico das imidazolinonas para o controle do arroz-vermelho (*Oryza sativa* L.) em cultivos de arroz irrigado. O arroz comercial e o arroz-vermelho fazem parte da mesma família e espécie. Assim, suas características morfofisiológicas e bioquímicas são similares, o que impede o uso de herbicidas convencionais sob o risco de danos à produtividade (GALON et al., 2014; PINTO et al., 2009). Ademais aos prejuízos e elevação nos custos da produção, o arroz-vermelho apresenta dificuldade de controle, extensão e alto grau de infestação das áreas cultivadas, além de depreciar o valor comercial do produto final e das áreas cultivadas com arroz (SANTOS et al., 2007). Assim,

graças ao advento do sistema Clearfield<sup>®</sup>, utilizado em mais de 500 mil hectares no Rio Grande do Sul (IRGA, 2008), esse problema foi parcialmente solucionado.

Entretanto, um dos problemas causados pela utilização extensiva de herbicidas de um mesmo grupo químico é a resistência que as plantas daninhas criam ao produto, ocasionando uma grande dificuldade no seu controle. Segundo Tuesca e Nisensohn (2001), como os herbicidas dos grupos das imidazolinonas possuem alta eficácia, baixa toxicidade em mamíferos, amplo espectro de seletividade e doses de uso relativamente baixas, o seu emprego na agricultura está intensificando e a aplicação repetida dos herbicidas está contribuindo para a seleção natural de biótipos resistentes – o que pode acontecer em um período curto de três a sete anos.

Em pesquisa realizada por Marchesan et al. (2011), os resultados indicaram que após três anos do uso do sistema Clearfield<sup>®</sup> houve uma redução no banco de sementes do arroz-vermelho, mas não houve a sua completa eliminação. Esse fator pode indicar um certo ganho de resistência da planta ao herbicida. Dessa maneira, o autor aconselha manter a área em pousio após o segundo ou terceiro ano do uso do sistema ou realizar o cultivo de outra cultura, que utilize outro herbicida com um mecanismo diferente de ação, para que não haja um aumento na resistência dessa planta daninha aos herbicidas do grupo químico das imidazolinonas e perda da eficiência da tecnologia (MARCHESAN et al., 2011; EMBRAPA, 2006).

## **2.2 O grupo químico das imidazolinonas**

Em relação ao modo de ação, os herbicidas do grupo das imidazolinonas são absorvidos pelas folhas e raízes das plantas, translocando-se pelo xilema e floema e acumulando-se nos meristemas de crescimento. O herbicida provoca a inibição do ácido acetohidróxido (AHAS) ou acetolactatosintase (ALS) - o que acaba interferindo na síntese do DNA e no crescimento celular por causar a interrupção da síntese proteica. Os sintomas visíveis provocados nas plantas, incluem: clorose foliar, morte do ponto de crescimento e morte total das plantas (IMAZETAPIR PLUS NORTOX, [s. a.]).

Os herbicidas deste grupo químico possuem alta persistência no solo, podendo permanecer por até dois anos após a aplicação (RENNER et al., 1998). Em relação à produtividade e diminuição dos custos, a permanência dos herbicidas no solo por um longo período de tempo é desejável, por combater as espécies daninhas sem que seja preciso novas

aplicações do defensivo. Entretanto, também podem causar problemas ambientais por seu efeito residual no solo, na água, nos organismos não-alvo, acumular-se na cadeia trófica (MALADÃO et al., 2013) e causar fitointoxicação em plantas sensíveis (*carryover*) cultivadas em sucessão ou rotação (MARCHESAN et al., 2010; MANCUSO et al., 2011; SOUTO et al., 2013). Mancuso et al. (2011) relata que o imazetapir pode prejudicar o girassol e o milho semeado em sucessão à cultura da soja; e que as espécies sensíveis ao resíduo do produto incluem o pepino, espinafre, brássicas e beterraba.

O imazetapir tende a lixiviar para as camadas mais profundas do solo, já que quando o seu pH está próximo do alcalino é provável que esteja na forma dissociada. Sendo assim, este comportamento dependente do pH aumenta a sua mobilidade. Essa tendência à lixiviação também pode ser ligada à sua meia-vida de 60 dias, baixa degradação microbiana em condições anaeróbicas (SILVA et al., 2011; BUNDT et al., 2014), baixo  $K_{oc}$ , alta solubilidade em água e sua extensiva utilização em áreas agrícolas (ANDRADE et al., 2011) – fatores que também se aplicam ao imazapir e imazapique.

Em um bioensaio realizado por Bundt et al. (2014), comparando a lixiviação entre os herbicidas do grupo das imidazolinonas, os resultados demonstraram que nos testes isolados o imazapique apresentou maior lixiviação, seguido do imazetapir e imazapir. Entre as misturas formuladas, a que apresentou maior lixiviação no solo foi imazapir+imazapique, se comparado ao imazetapir+imazapique – também comprovado por Souto (2014). Resultados semelhantes foram encontrados por Alister & Kogan (2005), onde a lixiviação do imazapir+imazapique foi maior que a do imazapir+imazetapir, independente da dose utilizada no experimento. Segundo os autores, esse efeito pode ser associado com um sinergismo que ocorre quando o imazapique é misturado com outros herbicidas das imidazolinonas.

Silva et al. (2011) analisou amostras de seis regiões produtoras de arroz no Rio Grande do Sul e uma em Santa Catarina. Em cada região foram selecionados 3 municípios, no período de 2007 a 2008. Em todas as regiões amostradas foram encontrados a presença de pelo menos um agrotóxico na água subterrânea, sendo o fipronil o mais detectado em amostras, seguido do imazetapir, clomazone, imazapique e quinclorac. O imazetapir foi encontrado em todas as regiões analisadas. Este fato pode ser explicado por suas características físico-químicas e também devido à grande área cultivada sob o sistema Clearfield®.

Do mesmo modo, em estudo realizado por Andrade et al. (2011) sobre o potencial de lixiviação de herbicidas em solos agrícolas, foi constatado que o imazetapir é o que apresenta o maior potencial, considerando os atributos do Latossolo do município de Rio Paranaíba, MG. Devido à sua alta mobilidade, o risco de contaminação ambiental é muito grande - em especial

dos recursos hídricos subterrâneos. Assim como em Silva et al. (2011), o imazetapir foi encontrado em todas as regiões analisadas na pesquisa, o que também foi atribuído às suas características físico-químicas favoráveis à contaminação.

Em relação à lixiviação em solos de diferentes texturas, Gomes et al. (2008) estudou a movimentação do imazetapir em um Latossolo Vermelho-Amarelo e em um Neossolo Quartzarênico Órtico. Os resultados mostraram que a lixiviação do herbicida foi 17,8 vezes maior no Neossolo em comparação ao Latossolo. Isso pode ser explicado devido à alta relação de micro e macroporos existentes no Neossolo. Tais condições, juntamente com a alta condutividade hidráulica do solo, baixo teor de argila e matéria orgânica, intensificaram o processo de lixiviação. Com o herbicida imazapir, Souza et al. (2000) também reportou que a lixiviação foi maior em solos arenosos do que em solos argilosos.

Os resultados encontrados em pesquisa realizada por Sousa et al. (2012) indicaram que os resíduos da mistura formulada do imazetapir+imazapique puderam causar danos ao tomate, rabanete, pepino e milho, mesmo após 1.100 dias após a sua aplicação no solo na cultura do arroz irrigado – sendo o tomate e o rabanete mais sensíveis ao produto do que as outras duas espécies. Os efeitos negativos dos resíduos do produto comercial Only® no milho, após 540 dias da aplicação do produto, também foi testado e comprovado por Pinto et al. (2009).

### **2.3 Imazetapir e imazapir+imazapique**

O Imazetapir® Plus Nortox ([s. a.]), imazetapir, faz parte do grupo químico das imidazolinonas e é da classe dos herbicidas seletivos de ação sistêmica, de pós-emergência, desenvolvido para controle principalmente de plantas daninhas de folhas largas e gramíneas infestantes na cultura da soja, sendo também indicado para uso no cultivo do arroz irrigado. Possui meia vida de 60 a 90 dias - tempo necessário para que 50% da dose aplicada inicialmente seja dissipada – e é caracterizado como ácido fraco (SOUTO et al., 2015). É apresentado na formulação concentrado solúvel, sendo considerado: perigoso ao meio ambiente (Classe III), altamente móvel - apresentando alto potencial de deslocamento no solo, podendo atingir principalmente águas subterrâneas -, com Classificação Toxicológica I (extremamente tóxico). É recomendado que sejam semeadas em sistema de rotação após o cultivo de soja com aplicação do herbicida, as espécies de inverno: azevém, trigo, ervilha, cevada e aveia; e as culturas de

verão: soja, feijão e amendoim. O imazetapir também é vendido com os nomes comerciais de Pivot<sup>®</sup>, Pivot<sup>®</sup> 70DG e Vezir<sup>®</sup>.

O Kifix<sup>®</sup> ([s. a.]), composto pela mistura formulada dos herbicidas imazapir+imazapique nas concentrações de 525 e 175 g i.a. kg<sup>-1</sup>, respectivamente, faz parte do grupo químico das imidazolinonas e é da classe dos herbicidas sistêmicos, de pré ou pós-emergência, desenvolvido para uso exclusivo no sistema de produção Clearfield<sup>®</sup>, no controle das principais plantas daninhas infestantes da cultura do arroz (incluindo o arroz-vermelho). É considerado: perigoso ao meio ambiente (Classe III); altamente móvel - apresentando alto potencial de deslocamento no solo, podendo atingir principalmente águas subterrâneas -, altamente persistente no meio ambiente, com Classificação Toxicológica II (altamente tóxico). As vias de exposição são: dérmica, inalatória, oral. É recomendado que sejam semeadas em sistema de sucessão/rotação após o cultivo de Arroz Clearfield<sup>®</sup> com aplicação do herbicida, as espécies de inverno (sucessão): azevém, trevo e cornichão; e as culturas de verão (rotação): Arroz Clearfield<sup>®</sup>, arroz não-Clearfield<sup>®</sup>, soja, milho Clearfield<sup>®</sup>. O cultivar de arroz IRGA 422CL é o único que não possui tolerância ao agroquímico. A mistura formulada de imazapir+imazapique possui longa persistência no solo por apresentarem, respectivamente, meia vida de 60 a 90 dias e 120 dias (RECK, 2013). Os dois possuem alta solubilidade em água (SOUTO et al., 2015) e a sua persistência é dependente da degradação fotolítica e microbiana (ALISTER & KOGAN, 2005; KRAUSZ et al., 1994). O imazapique é vendido separadamente sob o nome comercial Plateau<sup>®</sup> e o imazapir pode ser encontrado com os nomes Contain<sup>®</sup>, Arsenal<sup>®</sup> e Chopper Florestal<sup>®</sup>.

## 2.4 Biorremediação

Para além dos métodos físicos e químicos de remediação de solos contaminados, que são os mais utilizados e tradicionais, existem os métodos mediados por agentes biológicos: a chamada biorremediação. De maneira geral, essa técnica utiliza plantas e comunidades microbianas para realizar a degradação do poluente em produtos metabólicos menos prejudiciais ou até mesmo inofensivos. Através dessa tecnologia, pode ser realizada a degradação de inúmeros contaminantes, até mesmo os mais recalcitrantes, como os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, e de muitos compostos sintéticos, como o pentaclorofenol e o tricloroetileno (BRADY & WEIL, 2013).

A remediação do solo contaminado através dos microrganismos pode ser realizada de duas maneiras: através da bioaumentação e da bioestimulação. A bioaumentação é o processo de inoculação no solo de microrganismos selecionados com grande capacidade de degradação de determinado poluente. Assim, esses microrganismos irão reforçar e auxiliar a biomassa microbiana nativa a degradar o contaminante. Já na bioestimulação é fornecido à microbiota natural do solo as condições ótimas para a sua atividade metabólica. Como a taxa de degradação do poluente pode ser baixa devido à falta de nutrientes necessários à degradação das fontes de carbono, é realizado o fornecimento principalmente de N e P, através de adubos minerais, assim como o de oxigênio, em casos de solos pouco aerados. Outros componentes também podem ser fornecidos em casos específicos, por exemplo, como o metano na estimulação da degradação de solventes orgânicos (BRADY & WEIL, 2013).

Algumas espécies vegetais que apresentam resistência a determinado herbicida, podem também realizar a sua degradação sem sofrer com os efeitos negativos. Esse fenômeno é chamado de fitorremediação. Assim, elas podem ajudar a reduzir a contaminação do solo e da água através da remoção, imobilização ou transformação do contaminante em uma forma menos tóxica ou que não ofereça perigo ao meio ambiente. Desse modo, elas utilizam diferentes mecanismos no processo de remediação, dependendo da espécie. Os mecanismos diretos incluem: (1) fitoextração: absorção do composto orgânico ou inorgânico através da raiz e acúmulo em seus tecidos vegetais (nesse caso, faz-se necessário a colheita e a disposição final adequada dos resíduos da planta para evitar a contaminação do ambiente ou entrada do contaminante na cadeia trófica); (2) fitodegradação: degradação ou mineralização dos contaminantes orgânicos dentro de células específicas (deve-se atentar ao fato de que o composto químico resultante da degradação pode ser mais tóxico que o composto original); (3) fitovolatização: extração do contaminante do solo ou da água e sua subsequente liberação para a atmosfera na forma de gases (nesse caso, a planta também pode transformar o componente químico em formas mais prejudiciais ao meio ambiente); (4) rizofiltração: a raiz absorve os poluentes da água, podendo até mesmo precipitá-los. Os mecanismos indiretos são: (5) fitoestimulação/rizodegradação: a raiz libera exsudatos que estimulam o crescimento de microrganismos na rizosfera, como bactérias e fungos, os quais irão realizar a remediação do contaminante; (6) fitoestabilização: o contaminante é incorporado ao húmus do solo, diminuindo sua biodisponibilidade, ou à lignina da parede vegetal (EPA, 2000; MARQUES et al., 2011).

A identificação das espécies que são tolerantes a determinados tipos de contaminantes é feita através da avaliação da taxa de emergência e produção de biomassa da planta em doses

crecentes do contaminante no solo. Essa técnica, conhecida como *screening*, pode identificar quais espécies possuem potencial para a fitorremediação, considerando que nem todas as plantas conseguem sobreviver em ambientes contaminados. Em seguida é preciso identificar quais espécies efetivamente possuem a capacidade de descontaminar o solo. A avaliação é feita pela medição da concentração do contaminante a valores abaixo aos de referência, em determinado período de tempo (MARQUES et al., 2011).

## **2.5 Plantas remediadoras: azevém e cornichão**

O azevém (*Lolium multiflorum* Lam.) é uma gramínea forrageira anual de inverno que, em média, chega a 75 cm de altura – podendo alcançar até 1,20 m. Rústica, bem produtiva e de alto valor nutricional (elevado teor de proteína e de fácil digestão), é uma das gramíneas mais cultivadas no Rio Grande do Sul – juntamente com a aveia preta. É utilizada como pastagem anual no período entre o inverno e a primavera, com época de semeadura estendendo-se de março a junho. Tem o desenvolvimento inicial lento, mas supera as outras forrageiras em quantidade de forragem até o final da primavera. O consórcio de azevém + cornichão + trevo branco é um dos mais tradicionais na região da Campanha gaúcha. Consegue se adaptar na maioria dos tipos de solo e tem melhor desenvolvimento em temperaturas por volta de 20° C (FONTANELI et al., 2012). O azevém é considerado uma planta daninha das culturas do trigo no Brasil.

O cornichão (*Lotus corniculatus* L.) é uma leguminosa forrageira perene de inverno que, geralmente, cresce entre 30 a 70 cm. É considerada uma planta rústica, que consegue se adaptar na maioria das regiões do Rio Grande do Sul e tolera bem as condições adversas do inverno. Por conseguir se desenvolver em solos moderadamente ácidos, não ser tão exigente em termos de fertilidade quanto à alfafa e ter valor nutricional semelhante a esta, é indicado como pastagem permanente em regiões de clima temperado. A época de semeadura estende-se de abril a junho e pode ser pastejado quando atinge a altura de 20 cm, até o início da floração. O cornichão pode ser cultivado em consórcio com o trigo ou ervilhaca + aveia preta (FONTANELI et al., 2012).

## 2.6 Estudos semelhantes

Atualmente, o maior número de pesquisas sobre biorremediação e fitorremediação são realizados em países de clima temperado, onde os investimentos nesse tipo de tecnologia são mais elevados, se comparados com o Brasil. Nos estudos brasileiros, as áreas de maiores concentrações são acerca dos herbicidas e dos metais pesados (MARQUES et al., 2011). Abaixo são citados alguns estudos realizados em nosso país sobre a fitorremediação de solos contaminados com herbicidas do grupo das imidazolinonas:

Ao estudar o potencial de espécies na remediação de solo hidromórfico contaminado com a mistura de imazetapir+imazapique, Souto et al. (2015) obteve resultados mostrando que a soja (*Glycine max*), o azevém (*Lolium multiflorum*) e o cornichão (*Lotus corniculatus*) foram as espécies com maior capacidade de remediação (doses até 4.000 mL ha<sup>-1</sup>) devido à sua boa adaptação a ambientes hidromórficos, como é o caso das culturas de arroz irrigado. A crotolária (*Crotalaria juncea*), o feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*), a mucuna-preta (*Stizolobium aterrimum*), a ervilhaca (*Vicia sativa*), o nabo-forrageiro (*Raphanus sativus*) e o trigo (*Triticum aestivum*), também apresentaram capacidade de remediação, mas o seu desempenho não foi tão satisfatório devido à dificuldade de estabelecimento dessas espécies em ambientes saturados por água.

Apesar do azevém ser utilizado por Souto et al. (2015) como planta potencialmente fitorremediadora e ser citado na bula do Imazetapir<sup>®</sup> Plus Nortox como recomendada de ser utilizada em sistema de rotação após a aplicação do produto, Santos et al. (2007) cita a gramínea como uma das culturas, junto com o sorgo e o milho, que não são tolerantes ao imazetapir. Galon et al. (2014) também testou o efeito da mistura de imazetapir+imazapique no azevém, além da canola (*Brassica napus*), festuca (*Festuca arundinacea*), cornichão (*Lotus corniculatus*), trevo branco (*Trifolium repens*) e ervilhaca (*Vicia sativa*). Independente da dose aplicada, o produto ocasionou a redução de massa seca de todas as espécies e morte das plantas de canola. A ervilhaca foi a espécie vegetal que apresentou melhores resultados.

Em 2013, Souto et al. avaliou a biodegradação da mistura de imazetapir+imazapique em solo rizosférico de 6 espécies vegetais que possuíam potencial para a fitoestimulação - espécies estivais: soja (*Glycine max*), feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*), mucuna-preta (*Stizolobium aterrimum*); espécies hibernais: cornichão (*Lotus corniculatus*), azevém (*Lolium multiflorum*), ervilhaca (*Vicia sativa*). De acordo com os resultados obtidos, todas as espécies apresentaram média de 94% de degradação do herbicida, nas doses de 250 e 500 mL.

Entretanto, na maior dose ( $4.000 \text{ mL ha}^{-1}$ ), o solo rizosférico da mucuna-preta foi o que apresentou a maior taxa de degradação do herbicida, sendo assim considerada a espécie mais promissora para a fitorremediação de solos contaminados com o produto. Entretanto, os autores citam que as adequadas condições de umidade, temperatura e disponibilidade de nutrientes inorgânicos no estudo em laboratório contribuíram para a elevada degradação do herbicida pelos microrganismos e que no campo as porcentagens de biodegradação podem ser menores.

O arroz irrigado IRGA 417 foi utilizado por Bundt et al. (2010) e Souto et al. (2015) em estudos de fitorremediação de imazetapir e imazapique como espécie bioindicadora da presença destes herbicidas. Entretanto, Bundt constatou em seu trabalho que a mistura formulada de imazetapir+imazapique em profundidades maiores que 20 cm da superfície do solo não prejudicou o desenvolvimento de genótipos de arroz não resistentes. A fitotoxicidade foi observada apenas no arroz não resistente alocado próximo à superfície do solo.

## **2.7 Taxa de emissão de CO<sub>2</sub>**

A taxa de respiração do solo depende, em parte, da quantidade de matéria orgânica disponível - queda de folhas, decomposição radicular e da fauna edáfica, exsudatos das raízes, entre outros -, para que a comunidade microbiana possa utilizá-la como alimento. Quando um poluente orgânico é adicionado ao solo, como um herbicida, por exemplo, há um aumento na oferta de matéria orgânica e os microrganismos irão degradá-lo. Assim, as taxas de O<sub>2</sub> diminuem e as de emissão de CO<sub>2</sub> aumentam. Deste modo, a decomposição microbiana é um dos principais mecanismos de remediação de solos contaminados e os estudos de evolução do carbono na forma de CO<sub>2</sub> é um dos meios de avaliar essa dissipação.

A adição de diferentes resíduos de cobertura pode modificar o comportamento microbiano, assim como os gases que são liberados. Outro fator que influencia na taxa de respiração edáfica é a temperatura, já que a atividade microbiana cessa abaixo dos 5° C (também conhecido como o “zero biológico”). Geralmente, a atividade dos microrganismos mais do que dobram a cada 10° C que se eleva, sendo que a temperatura ótima para a decomposição microbiana fica em torno dos 35 e 40° C (BRADY & WEIL, 2013).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Estudo 1 – Emissão de CO<sub>2</sub> em solo de mata nativa e lavoura contaminados com imazetapir e imazapir+imazapique, com e sem resíduo de cobertura

##### 3.1.1 Experimento 1 – Sem resíduo de cobertura (SRC)

A análise de emissão de CO<sub>2</sub> foi realizada no Laboratório de Solos e Ecologia Florestal (LabSEF) da Universidade Federal do Pampa, Campus São Gabriel, utilizando amostras de solo colhido em área de mata nativa (várzea) sem histórico de aplicação de pesticidas e em área de lavoura de arroz irrigado com histórico de aplicação de herbicidas do grupo químico das imidazolinonas. As amostras foram coletadas em solo classificado como Planossolo Háplico, na camada de 0 a 20 cm. O solo foi seco à sombra por 10 dias e peneirado em malha de 2 mm. Os teores de carbono orgânico e a granulometria encontram-se na TABELA 1.

TABELA 1 - Carbono orgânico total (COT) e granulometria dos solos de mata nativa e lavoura nas camadas de 0 a 20 centímetros de profundidade

		Mata nativa			Lavoura		
COT ( $g\ kg^{-1}$ ) 0-20 cm		40,62			19,43		
Camada	Areia	Silte	Argila	Areia	Silte	Argila	
cm	g kg <sup>-1</sup>						
0 - 5	210	637	153	230	563	207	
5 - 10	256	473	271	234	504	262	
10 - 15	243	510	247	272	521	207	
15 - 20	238	500	262	239	556	205	

Fonte: FRANÇA, 2014; Beatriz W. Barbosa (2017).

Os tratamentos foram dispostos em esquema fatorial 2 x 2 x 3, em que constituíram os fatores dois solos: mata nativa e lavoura (MN e LA); dois herbicidas: imazetapir e imazapir+imazapique (IMZ e IMP+IMQ); e três concentrações: 0x, 1x e 2x a dosagem média recomendada por hectare (correspondentes a 0 L ha<sup>-1</sup>, 1,5 L ha<sup>-1</sup> e 3 L ha<sup>-1</sup> para o IMZ; e 0 g ha<sup>-1</sup>, 100 g ha<sup>-1</sup> e 200 g ha<sup>-1</sup> para o IMP+IMQ), com três repetições, totalizando 39 unidades experimentais.

Para determinação da respiração microbiana do solo, foram utilizados frascos respirométricos de vidro com volume de 0,5 L, preenchidos com 100g de solo. Foi adicionado água em todas as amostras para manter a umidade a aproximadamente 100% da capacidade de campo (0,3 g g<sup>-1</sup>). A solução contendo os herbicidas foi misturada a esta água, a qual foi derramada em cima do solo. Os frascos foram hermeticamente fechados e encubados no escuro à temperatura ambiente, durante 37 dias. A respiração microbiana foi estimada aos 3, 9, 16, 23, 30 e 37 dias de incubação. Cada frasco de vidro continha em seu interior um copo de plástico de 50 mL, que foi preenchido com 20 mL de NaOH 1M. Semanalmente, os frascos eram abertos e a solução de NaOH era titulada com solução de HCl 1M, após adição de 1 mL BaCl<sub>2</sub> 1M, com a finalidade de provocar a precipitação dos carbonatos, restando apenas o NaOH para ser titulado, e 3 gotas de fenolftaleína (1%), utilizada como indicador ácido-base. Três frascos foram incubados sem solo, utilizados como prova em branco. A emissão de CO<sub>2</sub> foi quantificada através da fórmula de Stotzky (1965):

$$CO_2 (mg\ 100g^{-1}) = (V\ branco - V\ amostra) * M\ ácido * Eq.g\ CO_2$$

Onde:

V branco = volume de HCl gasto com a prova em branco

V amostra = volume de HCl gasto na amostra

M ácido = concentração do HCl (1)

Eq.g CO<sub>2</sub> = Equivalente grama do CO<sub>2</sub> (22)

### 3.1.2 Experimento 2 – Com resíduo de cobertura (CRC)

O segundo experimento foi realizado da mesma maneira que o primeiro, excetuando as concentrações que foram de 0x, 4x e 8x a dosagem média recomendada por hectare (correspondentes a 0 L ha<sup>-1</sup>, 6 L ha<sup>-1</sup> e 12 L ha<sup>-1</sup> para o IMZ; e 0 g ha<sup>-1</sup>, 400 g ha<sup>-1</sup> e 800 g ha<sup>-1</sup> para o IMP+IMQ) e a adição de 1,154 g de serrapilheira de mata nativa nas amostras com solo de mata e a mesma quantidade de palhada de azevém nas amostras com solo de lavoura. A quantidade de resíduo adicionada aos tratamentos foi equivalente à quantidade encontrada em campo. A solução contendo os herbicidas foi derramada em cima dos resíduos de cobertura. Por fim, foram contabilizadas outras 39 unidades experimentais.

### 3.2 Estudo 2 – Fitorremediação de solo de mata nativa e lavoura, contaminados com mistura formulada de imazapir+imazapique

O cultivo das espécies utilizadas no experimento foi realizado na casa de vegetação da Universidade Federal do Pampa, Campus São Gabriel, com irrigação diária, em sacos plásticos preenchidos com 2,5 Kg de solo - utilizando amostras dos mesmos solos citados no Estudo 1. As espécies hibernais *Lolium multiflorum* Lam. (azevém) e *Lotus corniculatus* L. (cornichão) foram cultivadas no período de 08 de março a 25 de maio de 2017.

O experimento foi conduzido em esquema fatorial 2 x 3 x 3, contendo cinco repetições. Os tratamentos foram compostos pela combinação de amostras de solo de mata nativa e lavoura; onde foram aplicadas três doses da mistura formulada de imazapir+imazapique: 0x, 1x e 2x (0 g ha<sup>-1</sup>, 100 g ha<sup>-1</sup> e 200 g ha<sup>-1</sup>); sendo cultivadas as plantas remediadoras azevém e cornichão, além do tratamento testemunha, o qual não foi cultivado nenhum tipo de planta. Foram totalizadas 90 unidades experimentais.

Dois dias após a aplicação do herbicida, foram semeadas 0,45 g de azevém e 0,65 g de cornichão em cada saco plástico. Foram realizados dois desbastes: 9 e 16 dias após a emergência (DAE). Setenta e cinco DAE, as partes aéreas das plantas remediadoras foram coletadas e secadas em estufa a 65 ° C por 13 dia, até peso constante.

A semeadura da planta bioindicadora *Raphanus sativus* (rabanete) foi realizada 6 dias após a coleta das plantas remediadoras. Foram semeadas 4 sementes por tratamento. 15 DAE

foi realizada a contagem da emergência e as partes aéreas das plantas foram coletadas e secadas em estufa a 65° C por 2 dias, até peso constante, para a quantificação de matéria seca.

### **3.3 Análise estatística**

Após a coleta e tabulação dos dados, a significância dos efeitos dos tratamentos na emissão de CO<sub>2</sub>, emergência e produção de biomassa foram avaliados pela análise de variância ANOVA ( $p \leq 0,05$ ). Quando significativas, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Para a análise estatística foi utilizado o programa computacional Assisat 7.7 (SILVA & AZEVEDO, 2002) e para a confecção dos gráficos de acúmulo e emissão de CO<sub>2</sub> foi utilizado o SigmaPlot® 10.0 (2006).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Estudo 1 – Emissão de CO<sub>2</sub> em solo de mata nativa e lavoura contaminados com imazetapir e imazapir+imazapique, com e sem resíduo de cobertura

#### 4.1.1 Taxa de emissão de CO<sub>2</sub> no experimento sem resíduo de cobertura

Os resultados apontaram que para a emissão acumulada de dióxido de carbono no experimento sem resíduo de cobertura (SRC, FIGURA 1), as maiores taxas de respiração do solo foram todas nos tratamentos de mata nativa (MN), sendo o tratamento IMP+IMQ 2x o maior emissor de CO<sub>2</sub> (316,8 mg 100g<sup>-1</sup>). Os solos de lavoura (LA) apresentaram as menores taxas respiratórias, sendo o IMP+IMQ 2x (146,2 mg 100g<sup>-1</sup>) o tratamento que menos emitiu CO<sub>2</sub>.

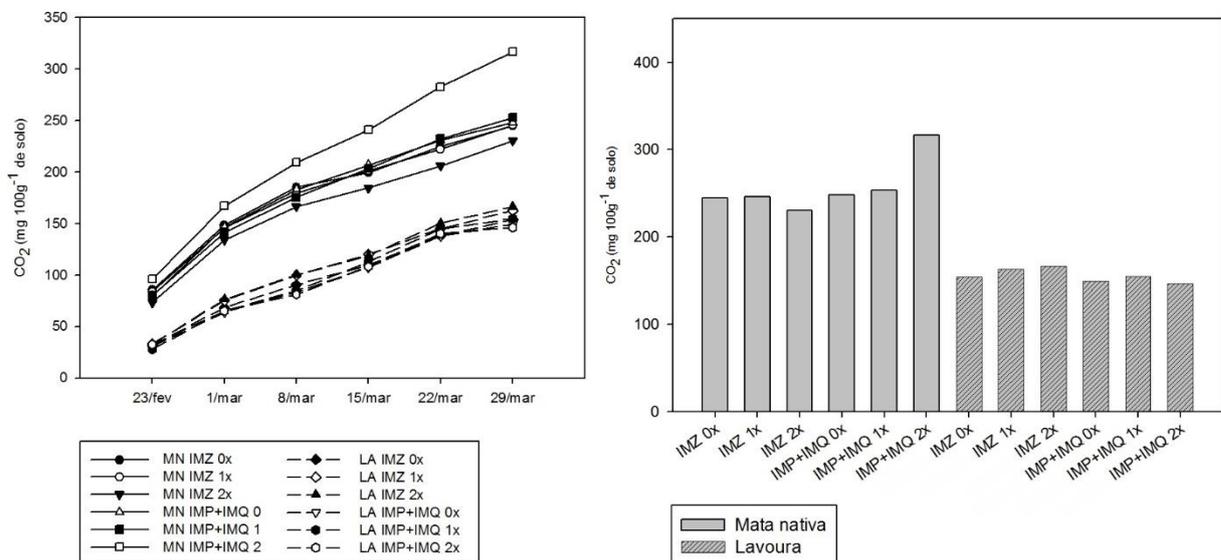


FIGURA 1 - Soma acumulada de emissão de CO<sub>2</sub> por tratamento no experimento sem resíduo de cobertura

Em função do delineamento fatorial, os tratamentos que apresentaram interação significativa foram analisados em associação, já os que não apresentaram significância, os resultados foram analisados individualmente, por tratamento.

Os resultados da análise de variância da emissão de CO<sub>2</sub> no experimento SRC (TABELA 2) mostraram que houve diferença significativa entre os tratamentos, apresentando interação tripla entre o solo, herbicida e a dose. As diferentes concentrações, quando analisadas individualmente, não apresentaram diferença significante.

TABELA 2 - Análise de variância da taxa de emissão de CO<sub>2</sub> (mg 100g<sup>-1</sup>) no experimento sem resíduo de cobertura

<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>SQ</b>	<b>QM</b>	<b>F</b>
<i>Solo (S)</i>	1	93811,01	93811,01	253,49 **
<i>Herbicida (H)</i>	1	2049,41	2049,41	5,53 *
<i>Dose (D)</i>	2	799,12	399,56	1,07ns
<i>Int. SxH</i>	1	3873,34	3873,34	10,46 **
<i>Int. SxD</i>	2	646,47	323,23	0,87ns
<i>Int. HxD</i>	2	2338,23	1169,11	3,15ns
<i>Int. SxHxD</i>	2	2885,92	1442,96	3,89 *
Tratamentos	11	106403,53	9673,04	26,13 **
Resíduo	24	8881,61	370,06	
Total	35	115285,14		

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < .01$ ); \* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 = p < .05$ ); ns não significativo ( $p \geq .05$ ).

Na interação entre os solos e herbicidas em relação à dose aplicada (TABELA 3), a diferença significativa apresentou-se entre o tratamento MN IMP+IMQ 2x o qual emitiu aproximadamente 19% e 14% a mais em comparação aos tratamentos MN IMP+IMQ 0x e 1x, respectivamente. Dessa maneira, pode-se dizer que a aplicação da mistura formulada imazapir+imazapique no solo de mata nativa teve efeito estimulador da atividade microbiana quando estes dois fatores interagem em conjunto.

Nas doses 0x e 1x, o solo de mata nativa emitiu significativamente maior quantidade de dióxido de carbono nos tratamentos tanto com aplicação de imazetapir como de imazapir+imazapique, se comparado com os mesmos tratamentos realizados em solo de lavoura (TABELA 3). Para a maior dose, 2x, houve diferença significativa nos resultados de emissão entre os herbicidas aplicados na mata nativa, sendo o imazapir+imazapique o que proporcionou maior emissão de CO<sub>2</sub> - cerca de 13% a mais em comparação com o imazetapir. Da mesma

maneira, ambos apresentaram diferença significativa e maior produção de CO<sub>2</sub> do que no solo de lavoura para os dois herbicidas.

TABELA 3 - Médias de emissão de CO<sub>2</sub> (mg 100g<sup>-1</sup>) na interação entre os solos de mata nativa e lavoura e os herbicidas imazetapir e imazapir+imazapique nas três doses aplicadas no experimento sem resíduo de cobertura

Solo x Herbicida	Dose		
	0x	1x	2x
<i>MN IMZ</i>	250,61aA	246,14aA	230,88bA
<i>MN IMP+IMQ</i>	253,15aB	268,67aB	313,32aA
<i>LA IMZ</i>	155,97bA	165,90bA	161,71cA
<i>LA IMP+IMQ</i>	154,41bA	157,83bA	154,37cA

Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey. Letras maiúsculas na horizontal e minúsculas na vertical. MN = mata nativa; LA = lavoura. IMZ = imazetapir; IMP+IMQ = imazapir+imazapique; Doses para IMZ: 0x = 0 L ha<sup>-1</sup>; 1x = 1,5 L ha<sup>-1</sup>; 2x = 3 L ha<sup>-1</sup>. Doses para IMP+IMQ: 0x = 0 g ha<sup>-1</sup>; 1x = 100 g ha<sup>-1</sup>; 2x = 200 g ha<sup>-1</sup>. Dms para colunas = 43.3156; dms para linhas = 39.2062.

As médias de emissão de CO<sub>2</sub> para os dois solos mostraram diferença significativa de aproximadamente 39% maior emissão no solo de mata nativa quando comparado ao de lavoura (260,46 e 158,37 mg 100g<sup>-1</sup>, respectivamente). Isso pode ser explicado pelo alto teor de matéria orgânica no solo de mata nativa e quantidade de carbono orgânico total (COT), o qual é maior do que o dobro do solo de lavoura (40,62 e 19,43 mg 100g<sup>-1</sup>, respectivamente). Além disso, o herbicida imazapir+imazapique foi o responsável pela maior atividade microbiana quando comparado com o imazetapir (216,96 e 201,87 mg 100g<sup>-1</sup>, respectivamente).

Os resultados são similares a Souto (2014), onde a autora demonstrou que a produção de CO<sub>2</sub> em um solo de cultivo de arroz irrigado, após a contaminação com imazetapir, imazapir e imazapique, foi maior em solo vegetado do que no solo sem vegetação.

#### 4.1.2 Taxa de emissão de CO<sub>2</sub> no experimento com resíduo de cobertura

Os resultados da emissão acumulada de dióxido de carbono do experimento com resíduo de cobertura (CRC, FIGURA 2) mostraram que as maiores atividades dos microrganismos também foram todas nos tratamentos de mata nativa, sendo o IMP+IMQ 0x o que mais emitiu CO<sub>2</sub> (382,2 mg 100g<sup>-1</sup>). Em relação às menores taxas de respiração microbiana, novamente estas foram todas nos tratamentos de lavoura, onde o IMP+IMQ 4x foi o que menos emitiu CO<sub>2</sub> (236,7 mg 100g<sup>-1</sup>).

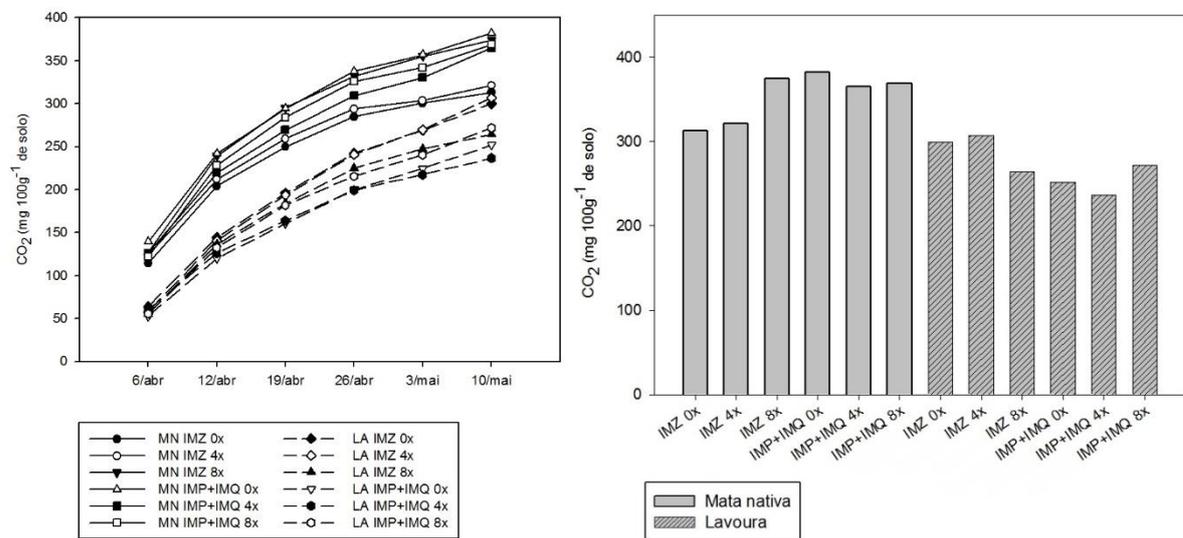


FIGURA 2 - Soma acumulada de emissão de CO<sub>2</sub> por tratamento no experimento com resíduo de cobertura

Os resultados da análise de variância para a taxa de emissão de CO<sub>2</sub> (Tabela 4) demonstraram que o uso do delineamento fatorial apresentou diferença significativa entre os tratamentos, havendo interação dupla entre o solo e o herbicida aplicado, não demonstrando diferença significativa entre as diferentes doses (0x, 4x e 8x), o que pode demonstrar, assim como no experimento SRC, que as concentrações também foram insuficientes para causarem algum efeito ou que o herbicida foi degradado.

TABELA 4 - Análise de variância da taxa de emissão de CO<sub>2</sub> (mg 100g<sup>-1</sup>) no experimento com resíduo de cobertura

<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>SQ</b>	<b>QM</b>	<b>F</b>
<i>Solo (S)</i>	1	50495,33	50495,33	49,57 **
<i>Herbicida (H)</i>	1	646,60	646,60	0,63ns
<i>Dose (D)</i>	2	873,83	436,91	0,42ns
<i>Int. SxH</i>	1	10185,85	10185,85	9,99 **
<i>Int. SxD</i>	2	3360,44	1680,22	1,64ns
<i>Int. HxD</i>	2	1536,58	768,29	0,75ns
<i>Int. SxHxD</i>	2	6929,67	3464,83	3,40ns
Tratamentos	11	74028,34	6729,84	6,60 **
Resíduo	24	24446,81	1018,61	
Total	35	98475,15		

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < .01$ ); \* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 \leq p < .05$ ); ns não significativo ( $p \geq .05$ ).

O solo de mata nativa que recebeu aplicação da mistura formulada de imazapir+imazapique proporcionou diferença significativa na atividade microbiana, emitindo, em média, 11% a mais de CO<sub>2</sub> se comparado com o tratamento onde foi aplicado o imazetapir (Tabela 5). Sendo assim, a interação entre o solo de mata nativa e o imazapir+imazapique estaria indicando, assim como no experimento SRC, efeitos de estimulação da biomassa microbiana. Fernandez et al. (2009) explica que herbicidas com potencial de rápida mineralização, quando aplicados em alta concentração, podem causar esse tipo de efeito ao serem utilizados como substrato para o crescimento de certas populações de microrganismos. O autor elucida que o glifosato, por exemplo, tem tanto referências de inibição como de promoção da atividade da microfauna edáfica. Em sua pesquisa, o metolachlor, o imazetapir e o glifosato apresentaram estímulo à atividade oxidativa do solo. Entretanto, o autor aponta que estes podem ser efeitos iniciais e transitórios, como foi o caso de seu estudo.

TABELA 5 - Médias da emissão de CO<sub>2</sub> (mg 100g<sup>-1</sup>) na interação entre os solos de mata nativa e lavoura e os herbicidas imazetapir e imazapir+imazapique no experimento com resíduo de cobertura

Solo	Herbicida	
	IMZ	IMP+IMQ
MN	333,64 aB	375,76 aA
LA	292,38 bA	267,21 bA

Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey. Letras maiúsculas na horizontal e minúsculas na vertical. MN = mata nativa; LA = lavoura. IMZ = imazetapir; IMP+IMQ = imazapir+imazapique. Dms para colunas (maiúsculas) e linhas (minúsculas) = 31.0647

Além disso, independente do herbicida aplicado, o solo de mata nativa emitiu significativamente o valor aproximado de 21% maior quantidade de dióxido de carbono do que o solo de lavoura (354,70 e 279,79 mg 100g<sup>-1</sup>, respectivamente). Esse comportamento, novamente, pode ser explicado pelo alto teor de carbono no solo de mata nativa e sua maior taxa de matéria orgânica.

O experimento SRC apresentou menor média acumulada de emissão do que o CRC. Isso é explicado pela presença de maior teor de matéria orgânica adicionada ao solo na forma de palhada de azevém e serapilheira, o que favorece a atividade da biomassa microbiana, principalmente se forem incorporados ao solo. Em um estudo sobre a emissão de dióxido de carbono em solos sob diferentes cultivos, Teixeira et al. (2011) mostrou que as emissões foram afetadas pela presença de resíduos de cobertura no solo. No tratamento com enxada rotatória e incorporação de resíduo de cobertura, a emissão foi 40,5% maior que no tratamento com enxada rotatória sem resíduo. Entretanto, o contrário pode ocorrer em condições de campo e o solo descoberto pode emitir mais CO<sub>2</sub> para a atmosfera. Em sua pesquisa, Costa et al. (2008) demonstrou que a ausência de cobertura do solo em sistema de plantio convencional, em comparação com o plantio direto, permitiu a maior emissão de gases pelo aumento da temperatura do solo, já que a incidência dos raios solares era direta, ocasionando a elevação da atividade microbiana.

## 4.2 Estudo 2 - Fitorremediação de solo de mata nativa e lavoura, contaminados com mistura formulada de imazapir+imazapique

### 4.2.1 Produção de matéria seca da parte aérea das espécies remediadoras *L. corniculatus* e *L. multiflorum*

Os resultados da análise de variância para a produção de matéria seca da parte aérea das espécies remediadoras (TABELA 6) demonstraram que o uso do delineamento fatorial apresentou diferença significativa entre os tratamentos, havendo interação dupla entre Solo x Planta Remediadora e Solo x Dose.

TABELA 6 - Análise de variância da produção de matéria seca da parte aérea (g) das espécies remediadoras *L. corniculatus* e *L. multiflorum*

FV	GL	SQ	QM	F
<i>Solo (S)</i>	1	10,43	10,43	62,86 **
<i>Pl. remediadora (PR)</i>	1	0,05	0,05	0,34 ns
<i>Dose (D)</i>	2	1,95	0,97	5,88 **
<i>Int. SxPR</i>	1	0,86	0,86	5,19 *
<i>Int. SxD</i>	2	1,41	0,70	4,25 *
<i>Int. PRxD</i>	2	0,65	0,32	1,96 ns
<i>Int. SxPRxD</i>	2	0,18	0,09	0,55 ns
Tratamentos	11	15,55	1,41	8,51 **
Resíduo	48	7,96	0,16	
Total	59	23,51		

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < .01$ ); \* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 \leq p < .05$ ); ns não significativo ( $p \geq .05$ ).

Na interação solo e espécie de planta remediadora (TABELA 7), os resultados demonstraram que houve diferença significativa entre a média de produção de biomassa no solo de mata nativa remediado com *L. corniculatus* (cornichão), o qual produziu aproximadamente 20% mais matéria seca do que o *L. multiflorum* (azevém).

TABELA 7 - Médias de produção de matéria seca da parte aérea (g) por vaso na interação entre os solos de mata nativa e lavoura e as espécies remediadoras *L. corniculatus* e *L. multiflorum*

Solo	Pl. remediadora	
	<i>L. corniculatus</i>	<i>L. multiflorum</i>
MN	1,58 aA	1,27 aB
LA	0,50 bA	0,68 bA

Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey. Letras maiúsculas na horizontal e minúsculas na vertical. MN = mata nativa; LA = lavoura. Dms para colunas e linhas = 0,2992

Na comparação entre os solos, o de mata nativa apresentou maior crescimento significativo da biomassa nas duas espécies remediadoras, sendo 68% maior para o *L. corniculatus* e aproximadamente 46% para o *L. multiflorum*.

Na interação entre solo e dose (TABELA 8), não houve diferença significativa entre as doses quando aplicados no solo de lavoura. Já no solo de mata nativa, a diferença apresentou-se entre o tratamento sem aplicação do herbicida e os tratamentos com a presença do contaminante (dose 1x e 2x). Dessa maneira, os resultados podem apontar uma inibição do crescimento das plantas remediadoras devido à aplicação do imazapir+imazapique em solo de mata nativa. Similarmente, em 11 culturas testadas por Alister & Kogan (2005) sobre o efeito residual do imazetapir+imazapique, nove apresentaram redução na produção de massa da matéria seca da parte aérea.

TABELA 8 - Médias da produção de matéria seca da parte aérea (g) por vaso das plantas remediadoras na interação entre os solos de mata nativa e de lavoura e dose de imazapir+imazapique

Solo	Dose		
	0x	1x	2x
MN	1,89 aA	1,15 aB	1,23 aB
LA	0,63 bA	0,62 bA	0,52 bA

Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey. Letras maiúsculas na horizontal e minúsculas na vertical. MN = mata nativa; LA = lavoura. 0x = 0 g ha<sup>-1</sup>; 1x = 100 g ha<sup>-1</sup>; 2x = 200 g ha<sup>-1</sup>. Dms para colunas = 0,3665; dms para linhas = 0,4406

Do mesmo modo, a análise da produção média de biomassa das duas espécies remediadoras, quando comparadas entre diferentes doses, mostrou que os tratamentos que não receberam aplicação da mistura formulada imazapir+imazapique apresentaram significância de 12% a mais na produção de biomassa em comparação àqueles que receberam alguma dose do contaminante (1,26 g para a dose 0x e 0,88 g para as doses 1x e 2x).

Provavelmente os solos de lavoura apresentaram menor produção de biomassa da parte aérea na presença do imazapir+imazapique, pois as propriedades do solo, como o pH, umidade, textura, fertilidade, teor e adsorção dos contaminantes pela matéria orgânica podem influenciar a persistência dos herbicidas do grupo químico das imidazolinonas (SOUSA et al., 2012). Como a atividade microbiana é a principal via de decomposição desses herbicidas, as condições favoráveis ao seu desenvolvimento e à biodisponibilidade dos herbicidas aumentam a degradação das imidazolinonas. Baixo teor de matéria orgânica provavelmente não favorece as condições para o desenvolvimento dos microrganismos, podendo justificar os resultados encontrados. Solos estéreis degradam o imazapir de 2,3 a 4,4 vezes mais lentamente do que os solos em condições naturais (SOUSA et al., 2012). Isto também ajuda a explicar porque o solo de mata nativa teve desempenho superior aos solos de lavoura em todos os tratamentos.

#### **4.2.2 Taxa de emergência e produção de matéria seca da parte aérea da espécie bioindicadora *Raphanus sativus***

O resultado da análise de variância para a taxa de emergência da espécie bioindicadora *Raphanus sativus* (TABELA 9) demonstrou que o delineamento fatorial apresentou diferença entre os tratamentos, havendo interação significativa entre os solos e as plantas remediadoras. As diferentes doses utilizadas não demonstraram efeito significativo na taxa de plantas germinadas.

Na comparação entre as sementes que foram cultivadas no solo de mata nativa e no solo de lavoura, os resultados mostraram que o primeiro apresentou maior taxa de emergência em todos os tratamentos (TABELA 10).

TABELA 9 - Análise de variância da taxa de emergência (%) da espécie bioindicadora *Raphanus sativus*

FV	GL	SQ	QM	F
Solo (S)	1	58777,77	58777,77	120,91 **
Pl. remediadora (PR)	2	291,66	145,83	0,30ns
Dose (D)	2	500	250	0,51ns
Int. SxPR	2	13,88	6,94	0,01 *
Int. SxD	2	55,55	27,77	0,05ns
Int. PRxD	4	1958,33	489,58	1,00ns
Int. SxPRxD	4	902,77	225,69	0,46ns
Tratamentos	17	62500	3676,47	7,56 **
Resíduo	72	35000	486,11	
Total	89	97500		

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < .01$ ); \* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 = < p < .05$ ); ns não significativo ( $p \geq .05$ ).

TABELA 10 - Médias da taxa de emergência (%) do *Raphanus sativus* na interação entre os solos de mata nativa e lavoura sem planta, com *L. corniculatus* e com *L. multiflorum*

Solo	Pl. remediadora		
	Sem planta	<i>L. corniculatus</i>	<i>L. multiflorum</i>
MN	83,33 aA	81,66 aA	86,66 aA
LA	31,66 bA	31,66 bA	35,00 bA

Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey. Letras maiúsculas na horizontal e minúsculas na vertical. MN = mata nativa; LA = lavoura. Dms para colunas (minúsculas) = 16,0536; dms para linhas (maiúsculas) = 19,2795

Quanto à análise de variância para a produção de matéria seca da parte aérea da planta (TABELA 11), os resultados apresentaram diferença entre os tratamentos, havendo diferença significativa entre os solos. A mata nativa apresentou, em média, aproximadamente 72% maior produção de biomassa em comparação ao solo de lavoura (0,075 e 0,021 g, respectivamente).

TABELA 11 - Análise de variância da produção de matéria seca da parte aérea (g) por vaso da espécie bioindicadora *Raphanus sativus*

<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>SQ</b>	<b>QM</b>	<b>F</b>
<i>Solo (S)</i>	1	0,0654	0,0654	138,1206 **
<i>Pl. remediadora (PR)</i>	2	0,0025	0,0012	2,6720 ns
<i>Dose (D)</i>	2	0,0018	0,0009	1,9280 ns
<i>Int. SxPR</i>	2	0,0017	0,0008	1,8877 ns
<i>Int. SxD</i>	2	0,0007	0,0003	0,8209 ns
<i>Int. PRxD</i>	4	0,0016	0,0004	0,8515 ns
<i>Int. SxPRxD</i>	4	0,0022	0,0005	1,1796 ns
Tratamentos	17	0,0762	0,0044	9,4625 **
Resíduo	72	0,0341	0,0004	
Total	89	0,1103		

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < .01$ ); \* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 \leq p < .05$ ); ns não significativo ( $p \geq .05$ ).

Neste estudo não foram encontradas diferenças significativas entre as doses de imazapir+imazapique na taxa de emergência e produção de biomassa da parte aérea do rabanete. Entretanto, Sousa et al. (2012) evidenciou que o aumento das doses de imazetapir+imazapique em sua pesquisa reduziu drasticamente a altura das plantas de rabanete – além do milho, pepino e tomate -, indicando os efeitos fitotóxicos do herbicida nessa espécie que, juntamente com o tomate, foram as mais sensíveis à presença do produto.

Como não foi encontrada diferença significativa nas taxas de emergência e produção de biomassa da parte aéreas do rabanete entre os tratamentos com cornichão e azevém e o tratamento sem a presença de nenhuma espécie remediadora, os resultados indicam possíveis hipóteses: as duas espécies não ajudaram a remediar o solo contaminado com imazapir+imazapique ou o herbicida foi degradado. Entretanto, deve-se salientar que esse comportamento pode ter ocorrido devido ao pouco tempo de cultivo do rabanete, que poderia apresentar diferenças significativas entre os tratamentos tardiamente. Outras hipóteses são as de que grande parte do herbicida possa ter sido lixiviado, não afetando a planta, ou a dose aplicada foi insuficiente para causar efeitos fitotóxicos no rabanete.

Como o tipo de solo foi o único fator significativo no desempenho do rabanete, esse efeito indica que o maior estoque de carbono e de matéria orgânica do solo de mata nativa pode ter contribuído para a maior degradação do imazapir+imazapique, como também para o melhor

crescimento do rabanete em comparação ao solo de lavoura. Outro fator que pode explicar esse comportamento no solo de mata nativa é, provavelmente, a maior diversidade microbiana, demonstrado em estudo por Figueiredo (2015), onde o solo de mata nativa apresentou maior diversidade de microrganismos do que os solos de horta e de cultivo de capim-forrageiro. Assim, no solo de mata nativa haveria maior chance de existir microrganismos degradadores do poluente do que no solo de lavoura.

Além disso, de acordo com Stürmer et al. (2011), o teor de matéria orgânica no solo é severamente afetado pelo uso e manejo que se faz deste. Solos de lavoura são constantemente revolvidos, o que acelera o processo de degradação da matéria orgânica e diminui os estoques de carbono - além de geralmente apresentarem maiores taxas de retirada de matéria orgânica do que de adição. O solo de mata nativa possui a constante degradação da serapilheira na camada superficial, o que eleva os estoques de carbono no solo. A matéria orgânica por ajudar a melhorar a agregação do solo, ser fonte de carbono, elétrons, energia e atuar como fonte de nutrientes, propicia o melhor desenvolvimento das espécies vegetais que ali são cultivadas, como as das espécies remediadoras e bioindicadoras analisadas neste trabalho.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No estudo de emissão de CO<sub>2</sub>, sem e com resíduo de cobertura, o solo foi o principal fator a influenciar na atividade microbiana, sendo o solo de mata nativa o que propiciou a maior emissão de CO<sub>2</sub>. As diferentes doses não influenciaram na taxa de emissão.

O imazapir+imazapique foi responsável pela maior emissão significativa de CO<sub>2</sub> no solo de mata nativa, apresentando diferença estatística quando comparado com o imazetapir no experimento sem resíduo de cobertura.

No estudo de fitorremediação, o solo foi o principal fator de diferença significativa entre os tratamentos, sendo o solo de mata nativa o que mais produziu matéria seca na parte aérea das espécies remediadoras *Lotus corniculatus* e *Lolium multiflorum* e na bioindicadora *Raphanus sativus*. A taxa de emergência do *Raphanus sativus* também foi significativamente maior no solo de mata nativa. Não foram encontradas diferenças significativas entre as espécies remediadoras, podendo indicar quatro hipóteses: a degradação do herbicida; a não descontaminação do solo pelas plantas remediadoras; a lixiviação do herbicida; ou doses insuficientes para causarem algum efeito fitotóxico nas plantas.

Em trabalhos posteriores, sugere-se que tanto a espécie remediadora quanto a bioindicadora seja cultivada por um maior período de tempo, já que os efeitos da remediação e a aparição de sintomas possam se manifestar ou ser mais acentuados tardiamente. Além disso, recomenda-se que outros experimentos sejam realizados utilizando apenas os fatores que apresentaram diferença significativa neste trabalho, para um melhor delineamento experimental e resultados mais promissores. Além disso, também é indicado em futuros trabalhos a análise global da dissipação do contaminante, avaliando sua quantidade no solo, na planta e no lixiviado.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALISTER, C.; KOGAN, M. Efficacy of imidazolinone herbicides applied to imidazolinone-resistant maize and their carryover effect on rotational crops. **Crop Protection**, n. 24, p. 375-379, 2005. Disponível em: <<http://www.periodicos.capes.gov.br>>. Acesso em: 08 jan. 2017.

ANDRADE, A. S. et al. Potencial de lixiviação de herbicidas em solos agrícolas na região do Alto Paranaíba (MG). **Pesticidas: Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente**, Curitiba, v. 21, p. 95-102, jan./dez. 2011. Disponível em: <<http://www.periodicos.capes.gov.br>>. Acesso em: 19 jan. 2017.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

BUNDT, A. et al. Lixiviação de imidazolinonas em resposta a diferentes manejos de irrigação em solo de cultivo de arroz irrigado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 44, n. 11, p. 1943-1949, nov. 2014. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/cr/v44n11/0103-8478-cr-44-11-01943.pdf>>. Acesso em: 22 jan. 2017.

BUNDT, A. et al. Profundidade de localização do herbicida imazetapir+imazapique no solo sobre a fitotoxicidade em de plantas de arroz não resistente. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 40, n. 9, p. 1867-1873, set. 2010. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/cr/v40n9/a719cr3219.pdf>>. Acesso em: 22 jan. 2017.

COSTA, F. S. et al. **Estoque de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no sul do Brasil**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 32, p. 323-332, 2008.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Identificação e manejo de plantas daninhas resistentes a herbicidas**. Documentos online, n. 60, set. 2006. Disponível em: <[https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/recursos/p\\_do60ID-6NZVdLomwB.pdf](https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/recursos/p_do60ID-6NZVdLomwB.pdf)>. Acesso em: 27 jan. 2017.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. **Introduction to Phytoremediation**. [S.l., s.n.], fev. 2000. 104 p. Disponível em: <<https://clu-in.org/download/remed/introphyto.pdf>>. Acesso em: 23 jan. 2017.

FERNANDEZ, G. et al. Evolução de CO<sub>2</sub> e atividades enzimáticas em amostras de solo tratado com herbicidas. **Planta Daninha**, Viçosa-MG, v. 27, n. 3, p. 601-608, 2009.

FIGUEIREDO, B. P. **Efeito do adubo orgânico na diversidade bacteriana de solos.** Dissertação (Mestrado em Microbiologia Agropecuária) – Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal. 2015. 103 f. Disponível em: <<http://www.athena.biblioteca.unesp.br/exlibris/bd/cathedra/20-08-2015/000845457.pdf>>. Acesso em: 09 jul. 2017.

FONTANELI, R. S. et al. (Ed.). **Forrageiras para integração lavoura-pecuária-floresta na região sul-brasileira.** 2 ed. Brasília, DF: Embrapa, 2012. 544 p. Disponível em: <<http://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1010247/forrageiras-para-integracao-lavoura-pecuaria-floresta-na-regiao-sul-brasileira>>. Acesso em: 27 mai. 2017.

FRANÇA, J. S. **Retenção de água em solos de várzea e coxilha sob diferentes usos na Região Sul do Rio Grande do Sul.** Monografia (Graduação em Gestão Ambiental) – Universidade Federal do Pampa, São Gabriel. 2014. 51 f.

GALON, L. et al. Influência de herbicidas do grupo das imidazolinonas em características fisiológicas de plantas cultivadas no inverno. **Revista Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v. 20, ns. 1/2, p. 42-51, 2014. Disponível em: <[http://www.fepagro.rs.gov.br/upload/1434658801\\_05.pdf](http://www.fepagro.rs.gov.br/upload/1434658801_05.pdf)>. Acesso em: 10 jan. 2017.

GOMES, M. A. F. et al. Movimento do herbicida Imazetapir em um Neossolo Quartzarênico Típico e em um Latossolo de textura média nas nascentes do Rio Araguaia, município de Mineiros (GO). **Pesticidas: Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente**, Curitiba, v. 18, p. 115-122, jan./dez. 2008. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/web/mobile/publicacoes/-/publicacao/31625/movimento-do-herbicida-imazetapir-em-um-neossolo-quartzarenico-tipico-e-em-um-latossolo-de-textura-media-das-nascentes-do-rio-araguaia-municipio-de-mineiros-go>>. Acesso em: 13 fev. 2017.

IMAZETAPIR PLUS NORTOX: imazetapir. Arapongas: NORTOX S.A, [s. a.]. Bula de herbicida.

INSTITUTO RIO GRANDENSE DO ARROZ – IRGA. Uso desordenado do Clearfield pode comprometer a tecnologia. **Revista Lavoura arrozeira**, v. 56, n. 445, p. 21-23, 2008.

JURADO, A. S. et al. Herbicides: the Face and the Reverse of the Coin. An in Vitro Approach to the Toxicity of Herbicides in Non-Target Organisms, Herbicides and Environment. In: KORTEKAMP, A. (Ed.). **Herbicides and Environment**. InTech, 2011. p. 03-44. Disponível em: <<http://www.intechopen.com/books/herbicides-and-environment/herbicides-the-face-and-the-reverse-of-the-coin-an-in-vitro-approach-to-the-toxicity-of-herbicides-i>>. Acesso em: 19 jan. 2017.

KIFIX: imazapir e imazapique. São Paulo: BASF S.A., [s. a.]. Bula de herbicida.

KRAUSZ, R.F. et al. Soybean (*Glycine max*) and rotational crop response to PPI chlorimuron, clomazone, imazaquin, and imazetapir. **Weed Technology**, v. 8, n. 2, p. 224-230, 1994. Disponível em: <[https://www.jstor.org/stable/3988095?seq=1#page\\_scan\\_tab\\_contents](https://www.jstor.org/stable/3988095?seq=1#page_scan_tab_contents)>. Acesso em: 27 jan. 2017.

MALADÃO, J. C. et al. Susceptibilidade de espécies de plantas com potencial de fitorremediação do herbicida sulfentrazone. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 60, n.1, p. 111-121, jan./fev., 2013. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rceres/v60n1/16.pdf>>. Acesso em: 27 jan. 2017.

MANCUSO, M. A. C. et al. Efeito residual de herbicidas no solo (“Carryover”). **Revista Brasileira de Herbicidas**, v.10, n.2, p.151-164, mai./ago. 2011. Disponível em: <<http://www.rbherbicidas.com.br/index.php/rbh/article/view/106/pdf>>. Acesso em: 26 jan. 2017.

MARCHESAN, E. et al. Arroz tolerante a imidazolinonas: Banco de sementes de arroz-vermelho e fluxo gênico. **Planta Daninha**, Viçosa-MG, v. 29, p. 1099-1105, 2011. Número Especial. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/pd/v29nspe/v29nspea17.pdf>>. Acesso em: 23 jan. 2017.

MARCHESAN, E. et al. Carryover of imazetapir and imazapique to nontolerant rice. **Weed Technology**, v. 24, n. 1, p. 6-10, 2010. Disponível em: <<http://www.bioone.org.ez96.periodicos.capes.gov.br/doi/pdf/10.1614/WT-08-153.1>>. Acesso em: 23 jan. 2017.

MARQUES, M. et al. Desafios técnicos e barreiras sociais, econômicas e regulatórias na fitorremediação de solos contaminados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 1, jan./fev. 2011. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v35n1/a01v35n1.pdf>>. Acesso em: 04 jan. 2017.

OLIVEIRA JR., R. S. Capítulo 7: Mecanismos de ação de herbicidas. In: OLIVEIRA JR., R. S. et al. (Ed.). **Biologia e manejo de plantas daninhas**. [S. l.]: Omnipax, 2011. p. 141-191. Disponível em: <<http://omnipax.com.br/livros/2011/BMPD/BMPD-livro.pdf>>. Acesso em: 04 jun. 2017.

PINGALI, P. L. Green Revolution: Impacts, limits, and the path ahead. **PNAS**, v. 109, n. 31, p. 12302-12308, jul./2012. Disponível em: <<http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0912953109>>. Acesso em: 24 mai. 2017.

PINTO, J. J. O. et al. Milho (*Zea mays*) como espécie bioindicadora da atividade residual de (imazetapir+imazapique). **Planta Daninha**, v. 27, n. esp., p. 1005-1014, 2009. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/pd/v27nspe/v27nspea14.pdf>>. Acesso em: 22 jan. 2017.

PIOTROWICZ-CIEŚLAK, A. I.; ADOMAS, B. Herbicide Phytotoxicity and Resistance to Herbicides in Legume Plants. In: ALVAREZ-FERNANDEZ, R. (Ed.). **Herbicides: Environmental Impact Studies and Management Approaches**. InTech, 2012. p. 19-44. Disponível em: <<http://www.periodicos.capes.gov.br>>. Acesso em: 10 jan. 2017.

RECK, L. **Os herbicidas imazapir e imazapique causam alterações reversíveis na comunidade fitoplanctônica em lavoura de arroz**. Dissertação (Mestrado em Agrobiologia) – Centro de Ciências Naturais e Exatas, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2013. 65 f. Disponível em: <<http://w3.ufsm.br/ppgagrobio/Liange.pdf>>. Acesso em: 27 mai. 2017.

RENNER, K. A. et al. Effect of tillage application method on corn (*Zea mays*) response to imidazolinone residues in soil. **Weed Technology**, n. 12, p. 281-285, 1998. Disponível em: <<http://www.jstor.org>>. Acesso em: 18 fev. 2017.

SANTOS, F. M. et al. Controle químico de arroz-vermelho na cultura do arroz irrigado. **Planta Daninha**, v. 25, n. 2, p. 405-412, 2007. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/pd/v25n2/a22v25n2.pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2017.

SIGMAPLOT. **For windows, version 10.0**. Systat Software, 2006.

SILVA, D. R. O. et al. Ocorrência de agrotóxicos em águas subterrâneas de áreas adjacentes a lavoura de arroz irrigado. **Química Nova**, v. 34, n. 5, p. 748-752, 2011. Disponível em: <<http://www.periodicos.capes.gov.br>>. Acesso em: 19 jan. 2017.

SILVA, F. A. S.; AZEVEDO, C. A. V. Versão do programa computacional Assistat para o sistema operacional Windows. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.4, n.1, p. 71-78, 2002.

SOUSA, C. P. et al. Crescimento de espécies bioindicadoras do residual do herbicida (imazetapir+imazapique), semeadas em rotação com arroz Clearfield. **Planta Daninha**, v. 30, n. 1, p. 105-111, 2012. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/pd/v30n1/v30n1a12.pdf>>. Acesso em: 22 jan. 2017.

SOUTO, K. M. et al. Biodegradação dos herbicidas imazetapir e imazapique em solo rizosférico de seis espécies vegetais. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 43, n. 10, p. 1790-1796, out. 2013. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/cr/v43n10/a29913cr2012-1161.pdf>>. Acesso em: 22 jan. 2017.

SOUTO, K. M. et al. Phytoremediation of lowland soil contaminated with a formulated mixture of Imazetapir and Imazapique. **Revista Ciência Agronômica**, v. 46, n. 1, p. 185-192, jan./mar.

2015. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rca/v46n1/0045-6888-rca-46-01-0185.pdf>>. Acesso em: 22 jan. 2017.

SOUTO, K. M. **Fitorremediação de solo de terras baixas contendo imidazolinonas**. Tese (Doutorado em Agronomia) – Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2014. 106 p. Disponível em: <[http://cascavel.ufsm.br/tede//tde\\_arquivos/4/TDE-2014-11-11T210330Z-5626/Publico/SOUTO,%20KELEN%20MULLER.pdf](http://cascavel.ufsm.br/tede//tde_arquivos/4/TDE-2014-11-11T210330Z-5626/Publico/SOUTO,%20KELEN%20MULLER.pdf)>. Acesso em: 22 jan. 2017.

SOUZA, A. P. et al. Lixiviação de glyphosate e imazapir em solos com diferentes texturas e composição química. I– Método do bioensaio. **Planta Daninha**, v. 18, n. 1, p. 5-16, 2000. Disponível em: <<http://www.periodicos.capes.gov.br>>. Acesso em: 23 jan. 2017.

STÜRMER, S. L. K. et al. Variações nos teores de carbono orgânico em função do desmatamento e revegetação natural do solo. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 2, p. 241-250, abr./jun. 2011. Disponível em: <<http://www.periodicos.capes.gov.br>>. Acesso em: 28 jun. 2017.

TEIXEIRA, L. G. et al. Soil CO<sub>2</sub> emission as related to incorporation of sugarcane crop residues and aggregate breaking after rotary tiller. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 6, p. 1075-1084, nov./dez. 2011.

TUESCA, D.; NISENSOHN, L. Resistencia de Amaranthus quitensis a imazetapir y clorimurón-etil. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v. 36, n. 4, p. 601-606, abr. 2001. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/pab/v36n4/5141.pdf>>. Acesso em: 23 jan. 2017.

ZANELLA, R. et al. Herbicides Persistence in Rice Paddy Water in Southern Brazil. In: KORTEKAMP, A. (Ed.). **Herbicides and Environment**. InTech, 2011. p. 03-44. Disponível em: <<http://www.intechopen.com/books/herbicides-and-environment/herbicides-the-face-and-the-reverse-of-the-coin-an-in-vitro-approach-to-the-toxicity-of-herbicides-i>>. Acesso em: 19 jan. 2017.