

**POTENCIAL DE LIXIVIAÇÃO DO IMAZETAPIR + FLUMIOXAZINA  
SUBMETIDOS A DIFERENTES SIMULAÇÕES DE PRECIPITAÇÃO**

**LEACHING POTENTIAL OF IMAZETAPYR + FLUMIOXAZINE SUBJECTED  
TO DIFFERENT PRECIPITATION SIMULATIONS**

**POTENCIAL DE LIXIVIACIÓN DEL IMAZETAPIR + FLUMIOXAZINA SOMETIDOS A  
DIFERENTES SIMULACIONES DE PRECIPITACIÓN**

 <https://doi.org/10.56238/arev7n6-008>

**Data de submissão:** 02/05/2025

**Data de publicação:** 02/06/2025

**Mateus Alves Vizentin**  
Graduado em Agronomia  
Universidade do Estado de Mato Grosso – UNEMAT  
E-mail: mateusvizentin@gmail.com

**Bruno da Silva Santos**  
Mestrando em Ambiente e Sistemas de Produção Agrícola  
Universidade do Estado de Mato Grosso – UNEMAT  
E-mail: santos.bruno@unemat.br

**Karollynne Miranda Rubim**  
Graduada em Agronomia  
Universidade do Estado de Mato Grosso – UNEMAT  
E-mail: karollynne.rubim@unemat.br

**Amanda Isabel Soares**  
Graduada em Agronomia  
Universidade do Estado de Mato Grosso – UNEMAT  
E-mail: isabel.amanda@unemat.br

**Beatriz Aparecida Blanco Gonsales**  
Mestranda em Ambiente e Sistemas de Produção Agrícola  
Universidade do Estado de Mato Grosso – UNEMAT  
E-mail: biablancoo@hotmail.com

**Miriam Hiroko Inoue**  
Doutora em Agronomia  
Universidade do Estado de Mato Grosso – UNEMAT  
E-mail: miriam@unemat.br

**Adriana Matheus da Costa de Figueiredo**  
Doutora em Estatística e Experimentação Agropecuária  
Universidade do Estado de Mato Grosso – UNEMAT  
E-mail: adrianasorato@unemat.br

## RESUMO

No Brasil, para assegurar altas produções de soja são utilizados herbicidas para o controle de plantas daninhas. No entanto, diante sua lixiviação no perfil do solo, os herbicidas podem causar a contaminação do solo e do lençol freático. O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência da precipitação pluvial na lixiviação do imazetapir + flumioxazina em Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico. O ensaio constituiu-se na aplicação do imazetapir + flumioxazina ( $172 + 60 \text{ g i.a. ha}^{-1}$ ) na dose recomendada de  $0,6 \text{ L ha}^{-1}$  do produto comercial. Os tratamentos foram arranjados em esquema fatorial  $10 \times 4$ , sendo dez profundidades ( $0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25, 25-30, 30-35, 35-40, 40-45$  e  $45-50 \text{ cm}$ ), avaliados dentro de quatro lâminas de irrigação ( $0, 30, 60$  e  $90 \text{ mm}$ ). As avaliações foram realizadas aos 7, 14 e 21 dias após a aplicação dos tratamentos. Foi utilizado como planta bioindicadora o pepino (*Cucumis sativus L.*) semeadas ao longo das colunas. Observou-se maiores severidades de fitointoxicação nas precipitações mais elevadas. Para a variável altura, as precipitações de  $60$  e  $90 \text{ mm}$  foram mais prejudiciais para o desenvolvimento das plantas, e para a massa seca ocorreu diferença significativa somente na precipitação de  $0 \text{ mm}$ . Concluiu-se que o herbicida avaliado tem tendência a ser lixiviado por influência das precipitações pluviais ou de irrigações artificiais, em que essa movimentação no perfil do solo pode determinar a eficiência no controle de plantas daninhas, assim como o potencial de contaminação de águas subterrâneas.

**Palavras-chave:** Contaminação. Herbicida. Impacto ambiental. Soja.

## ABSTRACT

In Brazil, herbicides are used to control weeds in order to ensure high soybean yields. However, due to their leaching into the soil profile, herbicides can cause contamination of the soil and groundwater. The objective of this study was to evaluate the influence of rainfall on the leaching of imazethapyr + flumioxazine in dystrophic red-yellow Latosol. The test consisted of applying imazethapyr + flumioxazine ( $172 + 60 \text{ g a.i. ha}^{-1}$ ) at the recommended dose of  $0.6 \text{ L ha}^{-1}$  of the commercial product. The treatments were arranged in a  $10 \times 4$  factorial design, with ten depths ( $0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25, 25-30, 30-35, 35-40, 40-45$ , and  $45-50 \text{ cm}$ ), evaluated within four irrigation rates ( $0, 30, 60$ , and  $90 \text{ mm}$ ). The evaluations were performed 7, 14, and 21 days after the application of the treatments. Cucumber (*Cucumis sativus L.*) was used as a bioindicator plant, sown along the columns. Greater severity of phytotoxicity was observed at higher rainfall levels. For the height variable, rainfall levels of  $60$  and  $90 \text{ mm}$  were more harmful to plant development, and for dry mass, a significant difference occurred only at a rainfall level of  $0 \text{ mm}$ . It was concluded that the herbicide evaluated tends to be leached by rainfall or artificial irrigation, in which this movement in the soil profile can determine the efficiency of weed control, as well as the potential for groundwater contamination.

**Keywords:** Contamination. Herbicide. Environmental impact. Soybean.

## RESUMEN

En Brasil, para garantizar una alta producción de soja, se utilizan herbicidas para controlar las malas hierbas. Sin embargo, debido a su lixiviación en el perfil del suelo, los herbicidas pueden contaminar el suelo y el agua subterránea. El objetivo de este trabajo fue evaluar la influencia de la precipitación pluvial en la lixiviación de imazetapir + flumioxazina en Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico. El ensayo consistió en la aplicación de imazetapir + flumioxazina ( $172 + 60 \text{ g i.a. ha}^{-1}$ ) en la dosis

recomendada de 0,6 L ha<sup>-1</sup> del producto comercial. Los tratamientos se dispusieron en un esquema factorial 10 x 4, con diez profundidades (0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25, 25-30, 30-35, 35-40, 40-45 y 45-50 cm), evaluadas dentro de cuatro láminas de riego (0, 30, 60 y 90 mm). Las evaluaciones se realizaron a los 7, 14 y 21 días después de la aplicación de los tratamientos. Se utilizó como planta bioindicadora el pepino (*Cucumis sativus* L.) sembrado a lo largo de las columnas. Se observaron mayores severidades de fitotoxicidad en las precipitaciones más elevadas. Para la variable altura, las precipitaciones de 60 y 90 mm fueron más perjudiciales para el desarrollo de las plantas, y para la masa seca solo se observó una diferencia significativa en la precipitación de 0 mm. Se concluyó que el herbicida evaluado tiende a ser lixiviado por la influencia de las precipitaciones pluviales o de los riegos artificiales, en los que este movimiento en el perfil del suelo puede determinar la eficacia en el control de las malas hierbas, así como el potencial de contaminación de las aguas subterráneas.

**Palabras clave:** Contaminación. Herbicida. Impacto ambiental. Soja.

## 1 INTRODUÇÃO

Nas últimas safras, o Brasil tem se destacado mundialmente como o maior produtor de soja (*Glycine max L.*). Atualmente, a soja é a cultura de maior importância para o agronegócio brasileiro, sendo que na safra 2022/2023 o Brasil cultivou esta *commodity* em 44.062,6 milhões de hectares (Mha), produzindo cerca de 154.566,3 milhões de toneladas do grão (CONAB, 2023; EMBRAPA, 2023).

Neste cenário de alta produção, o agronegócio brasileiro destaca-se como um dos principais pilares de sua economia, representando no ano de 2023 cerca de 23,8% de seu Produto Interno Bruto (PIB) (CEPEA, 2024). No Brasil, o estado de Mato Grosso é o maior produtor nacional do grão representando aproximadamente 32,2% da produção nacional, na safra 2021/2022, o estado obteve uma produção recorde de 40.746,6 milhões de toneladas, em uma área correspondente a 10.909,4 Mha (CONAB, 2022).

Apesar desta expressiva produção e representatividade econômica do cultivo e comercialização da soja, o custo de produção ainda é alto, impulsionado principalmente pela necessidade do uso frequente de produtos fitossanitários e fertilizantes, chegando a representar 20% dos gastos de produção da soja (Nunes e Souza, 2016). Neste contexto, o custo para produção da soja pode variar por vários fatores, como a região de cultivo, cenário econômico, sementes, implementos agrícolas, análises de solo, fertilidade, adubação, colaboradores, tratores, despesas administrativas e insumos agrícolas (AEGRO, 2023).

Além disso, alguns fatores abióticos como a luz, umidade e temperatura contribuem para que ocorra a quebra de dormência de sementes de plantas daninhas presentes no solo. A presença de plantas indesejáveis na lavoura pode acarretar sérios prejuízos, como a competição por água, luz, nutrientes e espaço físico (Paulino *et al.*, 2012), que além de reduzir a produção, aumenta os custos e reduz a qualidade dos grãos. O controle destas plantas torna-se essencial para obter bons resultados na lavoura, em que o controle químico com a utilização de herbicidas é o método mais utilizado pelos produtores rurais no Brasil (Bewley *et al.*, 2013).

A aplicação de herbicidas no controle químico pode ser em pré-plantio (PP), pré-plantio incorporado (PPI), pré-emergência (PRÉ) e em pós-emergência (PÓS). Tendo como exemplos de herbicidas pré-emergentes de folhas largas diclosulam, flumioxazin e sulfentrazone; e os de folhas estreitas s-metolachlor, trifluralina, clomazone, entre outros (Placido, 2019). O imazetapir + flumioxazina é um herbicida pré e pós-emergente de amplo espectro de controle, podendo ser aplicado em plantas daninhas de folhas largas e estreitas.

No entanto, com o controle químico, a principal problemática é a possibilidade de contaminação de organismos não alvo da aplicação, como espécies dicotiledôneas sensíveis (soja, feijão e algodão) (Silva *et al.*, 2007). Além disso, a contaminação ambiental do lençol freático também é outra problemática, causada pela lixiviação (transporte de moléculas pelo fluxo da água) para as camadas mais profundas do perfil do solo (Santos *et al.*, 2006).

Neste contexto, a utilização correta dos herbicidas é fator primordial para o sucesso da cadeia produtiva, pois o setor agrícola vem sendo fortemente julgado do ponto de vista ambiental em função destes impactos causados (Possamai, 2012). Assim, é fundamental que estes compostos químicos sejam adequadamente aplicados promovendo a qualidade final dos produtos colhidos assim como a preservação dos recursos naturais que sustentam a produção, tais como a água e o solo (Silva *et al.*, 2007).

Para compreender a atividade das moléculas de herbicidas no solo, têm sido realizados bioensaios, os quais consistem na utilização de plantas sensíveis ao herbicida estudado, fazendo com que os resíduos do herbicida no solo possam ser evidenciados através das alterações de características agronômicas da planta-teste (Mancuso *et al.*, 2011).

Diante da importância do uso de herbicidas para garantir a produção agrícola e dos impactos que o uso incorreto destes compostos químicos podem causar, objetivou-se determinar a lixiviação do herbicida imazetapir + flumioxazina em colunas de PVC preenchidos com solo, submetidos a diferentes precipitações de chuvas, sendo utilizado o pepino (*Cucumis sativus L.*) como planta bioindicadora.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 ÁREA DE ESTUDO

O experimento foi conduzido no Laboratório de Plantas Daninhas da Amazônia Meridional (LAPDAM) da Universidade do Estado de Mato Grosso, Campus de Alta Floresta. O município de Alta Floresta, é localizado entre a Latitude 09°52'32"S e Longitude 56°05'10"W, na região Norte do Estado de Mato Grosso, inserido no Sul da Amazônia brasileira, formado por uma área de 8.953 quilômetros quadrados (km<sup>2</sup>) (IBGE, 2020a).

A temperatura varia entre 20°C a 38°C com média de 26°C, sendo o clima classificado como “Am” baseado na classificação de Köppen (Alvares *et al.*, 2013), e solos classificados como Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico e Neossolo Quartzarênico Órtico (IBGE, 2020b). Como o município de estudo está localizado no sul da Amazônia brasileira, uma região de ecótono entre os domínios dos Cerrados e Amazônia, o município de Alta Floresta possui um quadro florístico formado por floresta

ombrófila aberta e densa, floresta estacional e enclaves de fitofisionomias de cerrado (Sasaki *et al.*, 2010; Zappi *et al.*, 2011).

## 2.2 COLETA DE DADOS

O experimento foi conduzido durante o período de fevereiro a agosto de 2023, em casa de vegetação pertencente ao LAPDAM na Universidade do Estado de Mato Grosso, Campus Universitário de Alta Floresta. As amostras de solos foram retiradas das profundidades de 0-20 cm de um solo classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico (EMBRAPA, 2018), o qual foi seco e peneirado em malha de 2 mm.

A análise química apresentou pH de 5,4 em CaCl<sub>2</sub>, 28,1 g dm<sup>-3</sup> de matéria orgânica, 28 g dm<sup>-3</sup> de P resina, 73,9 de V% e teores de K, Ca, Mg, H + Al e SB de 0,17; 5,6; 1,1; 2,4; e 6,9 mmolc dm<sup>-3</sup>, respectivamente. Já a análise física apresentou 518 g kg<sup>-1</sup> de argila, 427 g kg<sup>-1</sup> de areia e 55 g kg<sup>-1</sup> de silte.

As unidades experimentais constaram de dezesseis colunas de solo montadas em tubos de PVC de 10 cm de diâmetro e 50 cm de comprimento. Os tubos foram envoltos internamente por uma camada de parafina, a fim de evitar escorrimento lateral da solução do solo. Na parte basal, para reter o solo e permitir a drenagem, foram colocados tecidos do tipo Oxford. As colunas de solo foram submetidas à irrigação até este se apresentar saturado, permitindo-se em seguida o escoamento da água durante 48 horas para restaurar sua capacidade de campo.

O ensaio constituiu na aplicação do herbicida imazetapir + flumioxazina (172 + 60 g i.a ha<sup>-1</sup>) na dose recomendada de 0,6 L ha<sup>-1</sup> do produto comercial. Foi utilizado o delineamento experimental inteiramente casualizado (DIC), em que os tratamentos foram arranjados em esquema fatorial duplo (10 x 4), sendo dez profundidades (0-5; 5-10; 10-15; 15-20; 20-25; 25-30, 30-35, 35-40, 40-45, 45-50 cm), avaliados dentro de quatro lâminas de irrigação (0, 30, 60 e 90 mm), com 4 repetições.

O herbicida imazetapir + flumioxazina foi aplicado no período vespertino na ausência de vento, com temperatura de 32,9°C e umidade relativa de 40%. Para aplicação foi utilizado um pulverizador costal pressurizado com CO<sub>2</sub>, provido de uma lança de pulverização contendo um bico tipo leque Jacto 110.02, com volume de aplicação de 200 L ha<sup>-1</sup>. Logo após a aplicação do herbicida foi simulado chuva, com intensidade de precipitação de 1 mm min<sup>-1</sup> durante o tempo necessário para aplicar as lâminas de 0, 30, 60 e 90 mm.

Após a simulação, as colunas ficaram em repouso por 72 horas, quando então foram colocadas na posição horizontal. Cada coluna foi cortada em dez seções de 5 cm, medidas a partir da superfície onde o herbicida foi aplicado, esses cortes laterais permitiram a transfixação de pequenas placas de

plástico para separar as camadas de solo, impedindo que as raízes das plantas bioindicadoras passassem de uma camada para outra, dispensando assim a etapa de retirada do solo para transferência em vasos.

Em cada seção foi semeada uma linha contínua de sementes de pepino (*C. sativus L.*), cuja planta é indicadora de injúrias e sensível aos herbicidas. As sementes utilizadas são da marca TOPSEED Premium, apresentando uma germinação de 90% e pureza de 99%. Aos 7, 14 e 21 dias após a semeadura, foram observadas visualmente possíveis alterações nas plântulas de pepino que pudessem ser caracterizadas como efeitos tóxicos do herbicida.

As avaliações foram baseadas em critérios qualitativos utilizando uma escala percentual de notas, em que 0 corresponde a nenhuma injúria na planta e 100 à morte das plantas. Ao final dos 21 dias, as plantas foram cortadas rente ao solo, ensacadas em pacotes de papel e levadas para estufa de ventilação forçada a 70°C por 72 horas, e avaliadas o peso seco das amostras.

### 2.3 ANÁLISE DOS DADOS

Ao final do experimento, os dados de profundidade de lixiviação dos herbicidas no solo foram ajustados a modelos matemáticos e os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) com comparação de médias pelo teste de Tukey a 5%. Para isso, todas as análises foram desenvolvidas no software R 3.4.3 (R Development Core Team, 2017).

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O imazetapir associado ao flumioxazina apresentou efeito significativo para os fatores isolados, precipitação e profundidade na coluna, bem como interação entre eles em relação a fitointoxicação aos 7, 14 e 21 dias após a emergência (DAE) das plantas. Aos 7 DAE, na precipitação de 0 mm, só ocorreu fitointoxicação nas profundidades 0-5 e 5-10 cm (Tabela 1).

**Tabela 1.** Porcentagem da fitointoxicação do pepino (*C. sativus* L.) após aplicação do imazetapir + flumioxazina aos 7 DAE em Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico.

Profundidade (cm)	Precipitação (mm)			
	0	30	60	90
0-5	20,00 aC	46,67 aB	45,00 aB	60,00 aA
5-10	10,00 bD	35,00 bC	41,67 bB	50,00 bA
10-15	0,00 cD	35,00 bC	40,00 bB	50,00 bA
15-20	0,00 cD	30,00 cC	40,00 bB	51,67 bA
20-25	0,00 cD	20,00 dC	40,00 bB	50,00 bA
25-30	0,00 cD	10,00 eC	30,00 cB	50,00 bA
30-35	0,00 cD	5,00 fC	30,00 cB	50,00 bA
35-40	0,00 cC	0,00 gC	10,00 dB	50,00 bA
40-45	0,00 cA	0,00 gA	0,00 eA	0,00 cA
45-50	0,00 cA	0,00 gA	0,00 eA	0,00 cA

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem pelo teste de Tukey a 5% de significância. (CV = 3,51% e F = 12386,7\*\*).

Na precipitação de 30 mm ocorreu fitointoxicação nas profundidades de 0-5 até 30-35 cm, tendo maior fito na profundidade de 0-5 cm. Já nas precipitações de 60 e 90 mm ocorreram fitointoxicação nas profundidades de 0-5 até 35-40 cm, com maior teor de fitointoxicação na profundidade de 0-5 cm. O maior percentual de fitointoxicação na profundidade de 0-5 cm, ocorreu na precipitação de 90 mm (Tabela 1).

Aos 14 DAE e aos 21 DAE, são observados fitointoxicação nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm na precipitação de 0 mm. Nas precipitações de 30 e 90 mm ocorreu fitointoxicação em todas as profundidades avaliadas, enquanto, na precipitação de 60 mm ocorreu fitointoxicação nas profundidades de 0-5 até 25-30 cm, sugerindo que esta precipitação promoveu lixiviação do herbicida até 30 cm de profundidade no solo (Tabela 2 e 3).

**Tabela 2.** Porcentagem da fitointoxicação do pepino (*C. sativus* L.) após aplicação do imazetapir + flumioxazina aos 14 DAE em Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico.

Profundidade (cm)	Precipitação (mm)			
	0	30	60	90
0-5	40,00 aB	55,00 abA	58,33 aA	60,00 aA
5-10	28,30 bB	55,00 abA	55,00 aA	60,00 aA
10-15	0,00 cB	55,00 abA	50,00 aA	50,00 abA
15-20	0,00 cC	56,67 aA	35,00 bB	55,00 aA
20-25	0,00 cC	55,00 abA	30,00 bB	55,00 aA
25-30	0,00 cC	45,00 bcA	33,33 bB	41,67 bcAB
30-35	0,00 cB	40,00 cdA	0,00 cB	35,00 cdA
35-40	0,00 cC	35,00 cdeA	0,00 cC	25,00 dB
40-45	0,00 cC	33,33 deA	0,00 cC	10,00 eB
45-50	0,00 cC	25,00 eA	0,00 cC	10,00 eB

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem pelo teste de Tukey a 5% de significância.

**Tabela 3.** Porcentagem da fitointoxicação do pepino (*C. sativus* L.) após aplicação do imazetapir + flumioxazina aos 21 DAE em Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico.

Profundidade (cm)	Precipitação (mm)			
	0	30	60	90
0-5	40,00 aB	55,00 aA	59,33 aA	60,00 aA
5-10	33,33 aB	55,00 aA	55,00 aA	60,00 aA
10-15	0,00 bB	53,33 aA	50,00 aA	50,00 abA
15-20	0,00 bC	56,67 aA	35,00 bB	55,00 aA
20-25	0,00 bC	55,00 aA	30,00 bB	55,00 aA
25-30	0,00 bC	45,00 abA	33,33 bB	41,67 bAB
30-35	0,00 bB	40,00 bA	0,00 cB	38,33 bA
35-40	0,00 bB	35,00 bcA	0,00 cB	25,00 cA
40-45	0,00 bB	33,33 bcA	0,00 cB	10,00 dB
45-50	0,00 bB	25,00 cA	0,00 cB	10,00 dB

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Quanto à altura da planta, observou-se que nas avaliações das precipitações de 0 e 30 mm não ocorreram diferença significativa entre as profundidades avaliadas, enquanto na precipitação de 60 mm ocorreu diferença significativa nas profundidades de 10-15, 15-20 e 20-25 cm, apresentando menor desenvolvimento, o que sugere fitointoxicação (Tabela 4).

Na precipitação de 90 mm, foi constatado diferença significativa entre o crescimento da planta nas profundidades de 25-30, 30-35 e 35-40 cm, indicando que estas são as profundidades mais afetadas pela lixiviação, acumulando os herbicidas. Dentre as interações de profundidades e precipitações, observa-se que na profundidade de 20-25 cm e na precipitação de 60 mm, teve o maior efeito de lixiviação do herbicida afetando o desenvolvimento das plantas (Tabela 4).

**Tabela 4.** Altura (cm) do pepino (*C. sativus* L.) após aplicação do imazetapir + flumioxazina aos 21 DAE em Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico.

Profundidade (cm)	Precipitação (mm)			
	0	30	60	90
0-5	6,43 aA	7,33 aA	6,33 abA	7,90 aA
5-10	5,60 aA	6,00 aA	5,83 abcA	7,23 abA
10-15	5,60 aA	5,07 aA	3,83 bcA	5,67 abA
15-20	4,70 aA	6,13 aA	4,67 bcA	5,33 abA
20-25	5,80 aA	5,73 aA	3,23 cB	5,33 abAB
25-30	6,50 aA	6,20 aA	6,17 abA	4,70 bA
30-35	5,93 aA	6,77 aA	5,83 abcA	4,73 bA
35-40	6,10 aA	6,40 aA	5,33 abcA	4,90 bA
40-45	4,53 aB	6,20 aA	7,67 aA	5,83 abAB
45-50	7,20 aA	6,00 aA	6,50 abA	6,00 abA

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Quanto a massa seca do pepino após a aplicação dos herbicidas, observa-se que foi identificado efeitos significativos na precipitação de 0 mm, nas profundidades de 0-5, 5-10 e 40-45 cm, onde

ocorreram menor produção de massa seca, comparado a profundidade de 15-20 cm. Nas precipitações de 30, 60 e 90 mm não ocorreram diferença significativa entre as profundidades associado aos volumes de precipitações (Tabela 5).

**Tabela 5.** Massa seca ( $\text{g planta}^{-1}$ ) do pepino (*C. sativus* L.) após aplicação do imazetapir + flumioxazina aos 21 DAE em Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico.

Profundidade (cm)	Precipitação (mm)			
	0	30	60	90
0-5	0,16 bA	0,09 aA	0,11 aA	0,15 aA
5-10	0,13 bA	0,11 aA	0,20 aA	0,21 aA
10-15	0,23 abA	0,13 aAB	0,09 aB	0,22 aA
15-20	0,35 aA	0,12 aB	0,10 aB	0,12 aB
20-25	0,21 abA	0,14 aAB	0,08 aB	0,14 aAB
25-30	0,25 abA	0,14 aA	0,17 aA	0,15 aA
30-35	0,24 abA	0,21 aA	0,18 aA	0,13 aA
35-40	0,22 abA	0,18 aA	0,18 aA	0,20 aA
40-45	0,13 bA	0,17 aA	0,21 aA	0,20 aA
45-50	0,25 abA	0,12 aB	0,16 aAB	0,12 aB

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Entre as profundidades, apresentaram diferença significativa a 10-15, 15-20 e 20-25 cm nas precipitações de 30 e 60 mm, sugerindo que ocorreu o acúmulo do herbicida nessas profundidades (10 a 25 cm), e para a precipitação de 90 mm nas profundidades de 15 a 25 cm. Na profundidade de 45-50 cm ocorreu redução da massa seca das plantas nas precipitações de 30, 60 e 90 mm, mostrando que estes volumes geram lixiviação dos herbicidas (Tabela 5).

As plantas de pepino aos 7 DAE apresentaram fitointoxicação mais intensa a 0-5 cm de profundidade e 90 mm de precipitação. Aos 14 DAE e aos 21 DAE, os maiores percentuais de fitointoxicação ocorreram nas profundidades de 0-5 até 20-25 cm nas precipitações de 30 e 90 mm, e nas profundidades de 0-5 até 10-15 cm na precipitação de 60 mm (Tabelas 1, 2 e 3).

Não ocorreram diferença significativa para a variável altura nas precipitações de 0 e 30 mm, e com precipitação de 60 mm ocorreram alterações no desenvolvimento das plantas a 20-25 cm de profundidade. Com 90 mm ocorreu alteração do tamanho das plantas nas profundidades de 25-30, 30-35 e 35-40 cm quando comparadas a profundidade 0-5 cm, sugerindo o acúmulo dos herbicidas nestas profundidades (Tabela 4).

Para massa seca, ocorreu diferença significativa somente para 0 mm de precipitação, com maior massa seca na profundidade de 15-20 cm, quando comparada com as profundidades 0-5, 5-10 e 40-45 cm, sendo que as demais profundidades e precipitações avaliadas não diferiram estatisticamente (Tabela 5).

Diante destes resultados, pode-se observar que com zero precipitação, a presença de fitointoxicação ocorrem nas camadas mais superficiais do solo (até 10 cm). Em contraste, com precipitações mais elevadas, ocorrem fitointoxicação até nas camadas mais profundas do solo, mostrando o potencial de lixiviação dos herbicidas imazetapir + flumioxazina. A menor adsorção do produto devido aos lugares adsortivos do solo estarem ocupados pela água, com precipitação maior e a diluição do imazetapir + flumioxazina devido sua solubilidade, podem ter contribuído positivamente para maior descida do produto (Savage, 1976).

Um estudo realizado por Oliveira *et al.* (1999), avaliou a mobilidade do flumioxazin em solos Podzólico Vermelho-Amarelo Câmbico fase terraço (PVc) e Latossolo Vermelho-Amarelo textura média (LVM), quando o flumioxazin foi aplicado no LVM seco ao ar, não foi verificado efeito significativo quanto às lâminas, demonstrando que não houve diferenças na produção de biomassa de pepino com a simulação das lâminas de 45 e 90 mm, após aplicação do flumioxazin.

O modelo que melhor explicou o movimento do flumioxazin neste solo foi o cúbico, verificando que ocorreu menor produção de biomassa nos 10 cm superficiais da coluna, o que evidencia a presença do herbicida nesta profundidade. A menor adsorção do flumioxazin nesse solo sugere sua maior percolação (Oliveira, 1995).

A atividade biológica e o seu movimento no solo são fortemente influenciados por fatores do solo, tais como textura, umidade e pH, que afetam diretamente a adsorção e a mobilidade do imazapyr no perfil do solo (Ismail e Ahmad, 1994). D'antonino *et al.* (2009), ao estudarem a lixiviação do picloram em solos com pH de 4,9 submetidos a chuva simulada de 40 mm, observaram fitointoxicação do herbicida em 90% das plantas cultivadas na parte superior da coluna, sendo a 5 cm de profundidade, essa intensidade foi decrescente até 35 cm de profundidade, no entanto, verificaram níveis de intoxicação em toda coluna.

No solo quando os herbicidas são aplicados em pré-emergência, podem sofrer processos de sorção, lixiviação e/ou degradação por efeitos físicos, químicos e biológicos, além de serem absorvidos pelas plantas daninhas e/ou plantas cultivadas (Velini, 1992). O processo de lixiviação é a principal forma de transporte dos herbicidas no solo. Essas moléculas se deslocam no perfil do solo, acompanhando o fluxo de água, o qual é governado pela diferença de potencial de água entre dois pontos (Prata *et al.*, 2003).

Além da pluviometria, o movimento descendente dos herbicidas no solo é influenciado pelo teor e tipo de matéria orgânica, composição, tamanho e distribuição das partículas do solo, pH e densidade do solo, tamanho e distribuição dos poros, além da solubilidade em água das moléculas dos herbicidas e pelo índice de precipitação pluvial (Prata *et al.*, 2003).

Para herbicidas de elevada capacidade adsorptiva, o conteúdo de matéria orgânica do solo é geralmente um fator importante, pois, quanto mais alto, maior será a adsorção do herbicida e, com isso, menor a lixiviação. Em solos arenosos, a lixiviação geralmente é ainda maior do que em solos siltosos ou argilosos (Rossi *et al.*, 2005).

O herbicida imazapyr com 80 mm de chuva apresentou fitotoxicidade no bioindicador até 25 cm de profundidade, ou seja, à medida que o índice pluviométrico aumentou, a profundidade de ação também aumentou (Monquero *et al.*, 2008). Wehtje *et al.* (1987) observaram maior mobilidade do imazapyr em solos argilosos, a qual diminuiu com a redução da umidade e do pH do solo.

A diferença na mobilidade entre herbicidas no solo, pode também ser influenciadas pelas características físico-químicas das moléculas do ingrediente ativo, como a solubilidade e o coeficiente de sorção normalizado conforme o teor de carbono orgânico (Koc). O Koc permite estimar a quantidade sorvida de uma dada substância por unidade de carbono orgânico, índice que serve para comparar a disponibilidade de pesticidas no solo (Vieira *et al.*, 1999).

O Kow refere-se ao grau de afinidade da molécula de herbicida pelas fases polar (representada pela água) e apolar (representada pela substância 1-octanol). Por ser uma medida da lipofilicidade de moléculas, essa propriedade é utilizada para medir a atividade de herbicidas na solução do solo, ou seja, o quanto da molécula está livre em água (fase polar) ou associada a outras substâncias orgânicas em solução (fase apolar) (Oliveira *et al.*, 2001). Segundo Nicholls (1991), quanto menor for o valor de Kow do herbicida maior será o seu potencial de lixiviação, em contraste, quanto maior for o Koc, maior será sua sorção no solo.

Moléculas de herbicidas que são altamente solúveis são rapidamente distribuídas no ciclo hidrológico. Os valores de Koc do aminocyclopyrachlor, por exemplo, é de 28 mg g<sup>-1</sup> e do indaziflam oscila entre 434 e 1339 mg g<sup>-1</sup> (Alonso *et al.*, 2011). Estes valores indicam que o indaziflam possui maior tendência a se ligar aos colóides do solo que o aminocyclopyrachlor, justificando o maior potencial de mobilidade no perfil do solo deste último herbicida. Assim, observa-se que a lixiviação de herbicidas sofre forte influência da quantidade e da época de ocorrência de chuvas após a aplicação, como já foi constatado para metribuzin (Banks e Robinson, 1982), e no presente estudo para imazetapir + flumioxazina.

Isso é altamente importante para a agricultura da região da área de estudo deste trabalho (sul da Amazônia brasileira), pois nas regiões tropicais de predomínio de Latossolos e Argissolos de elevado grau de intemperização (Fontes *et al.*, 2001), são frequentes os períodos de excesso de chuva nos meses de verão, que não raro superam 200 mm em poucas semanas (Inoue *et al.*, 2003), indicando

que há expressivo potencial de contaminação de corpos d'água em razão do uso inadequado de pesticidas.

A mobilidade do herbicida no solo pode alterar a sua capacidade e eficiência no controle de plantas daninhas e, principalmente a sua dissipaçāo no ambiente (Silva *et al.*, 2007). Assim, estudos dessa natureza constituem um importante e relevante contribuição para avaliar os impactos ambientais destes produtos e seus efeitos futuros, já que muitos herbicidas são frequentemente detectados em estudos de qualidade de águas superficiais e subterrâneas (Tanabe *et al.*, 2001).

#### **4 CONCLUSÕES**

Foram observadas maiores severidades de fitointoxicação nas precipitações mais elevadas e nas profundidades mais superficiais do solo. O desenvolvimento em altura das plantas foi mais afetado nas precipitações de 60 e 90 mm, enquanto para a variável massa seca, ocorreu diferença significativa somente para a precipitação de 0 mm.

Assim, concluiu-se que o imazetapir + flumioxazina apresentam tendência a serem lixiviados por influência das precipitações pluviais ou de irrigações artificiais, cuja movimentação no perfil do solo pode determinar a seletividade e/ou a eficiência no controle de plantas daninhas, assim como o potencial de contaminação de águas subterrâneas.

## REFERÊNCIAS

AEGRO. *Como identificar e combater as 6 principais plantas daninhas da soja*. Porto Alegre: aegro, 2023. Disponível em: <https://aegro.com.br/>. Acesso em: 10 jul. 2023.

Alonso, D. G. et al. Sorption-desorption of indaziflam in selected agricultural soils. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 59, n. 4, p. 3096-3101, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf203014g>.

Alvares, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.

Banks, P. A.; Robinson, E. L. The influence of straw mulch on the soil reception on persistence of metribuzin. *Weed Science*, v. 30, n. 2, p. 164-168, 1982.

Bewley, J. D. et al. *Seeds: physiology of development, germination and dormancy*. New York: Sprong-Verlag, 2013.

CEPEA - Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. *PIB do Agronegócio Brasileiro*. Piracicaba: CEPEA, 2024. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx#:~:text=Considerando%2Dse%20os%20desempenhos%20da,%2C6%25%20registra,dos%20em%202021>. Acesso em: 12 jun. 2024.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. *Histórico da Soja - Mato Grosso*. Brasília: Conab, 2023. Disponível em: [www.conab.gov.br](http://www.conab.gov.br). Acesso em: 05 jun. 2024.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. *Safra 2022/23: Produção de grãos pode chegar a 308 milhões de t impulsionada pela boa rentabilidade de milho, soja e algodão*. Brasília: Conab, 2022. Disponível em: [www.conab.gov.br](http://www.conab.gov.br). Acesso em: 03 jun. 2024.

D'antonino, L. et al. Lixiviação do picloram em Argissolo-Vermelho Amarelo e Latossolo Vermelho-Amarelo com diferentes valores de pH. *Planta Daninha*, v. 27, n. 3, p. 589-600, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582009000300021>.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 5. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2018. 353 p.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. *Soja em números (safra 2022/23)*. Brasília: EMBRAPA, 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dados-economicos>. Acesso em: 05 jun. 2024.

Fontes, M. P. F.; Camargo, O. A.; Sposito, G. Eletroquímica das partículas coloidais e sua relação com a mineralogia de solos altamente intemperizados. *Scientia Agricola*, v. 58, n. 3, p. 627-646, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162001000300029>.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rio de Janeiro: IBGE, 2020a. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mt/alta-floresta/panorama>. Acesso em: 05 jun. 2024.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rio de Janeiro: IBGE, 2020b. Disponível em: <https://mapas.ibge.gov.br/tematicos/solos>. Acesso em: 05 jun. 2024.

Inoue, M. H. et al. Critérios para avaliação do potencial de lixiviação dos herbicidas comercializados no estado do Paraná. *Planta Daninha*, v. 21, n. 2, p. 313-323, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582003000200018>.

Ismail, B. S.; Ahmad, A. R. Attenuation of the herbicidal activities of glufosinate -ammonium and imazapir in two soils. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 47, p. 279-285, 1994.

Mancuso, M. A. C.; Negrisoli, E.; Perim, L. Efeito residual de herbicidas no solo (“Carryover”). *Revista Brasileira de Herbicidas*, v. 10, n. 2, p. 151-164, 2011. DOI: <https://doi.org/10.7824/rbh.v10i2.106>.

Monquero, P. A. et al. Potencial de lixiviação de herbicidas no solo submetidos a diferentes simulações de precipitação. *Planta Daninha*, v. 26, n. 2, p. 403-409, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582008000200017>.

Nicholls, P. H. Organic contaminants in soils and groundwaters. In: JONES, K. C. (Ed.). *Organic contaminants in the environment: environmental pathways and effects*. London: Elsevier Applied Science, 1991. p. 87-132.

Nunes, C. D.; Souza, R. C. T. *Metodologia para identificação do percevejo marrom na lavoura de soja com base em visão computacional e aprendizagem de máquina*. 2016. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento de Tecnologia) - Universidade Federal do Paraná, Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, Curitiba, 2016.

Oliveira, M. F. *Adsorção, lixiviação e persistência de flumioxazin e metribuzin em diferentes solos*. 1995. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1995.

Oliveira, M. F. et al. Efeito da palha e da mistura atrazine e metolachlor no controle de plantas daninhas na cultura do milho, em sistema de plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 36, n. 1, p. 37-41, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2001000100005>.

Oliveira, M. F. et al. Lixiviação de flumioxazin e metribuzin em dois solos em condições de laboratório. *Planta Daninha*, v. 17, n. 2, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-83581999000200005>.

Paulino, V. T. et al. Impactos ambientais da exploração pecuária em sistemas intensivos de pastagem. *Informe Agropecuário*, v. 33, n. 266, p. 17-24, 2012.

Placido, H. *Herbicidas pré-emergentes para soja: Os melhores produtos e suas orientações*. Porto Alegre: aegro, 2019. Disponível em: <https://aegro.com.br/>. Acesso em: 15 ago. 2023.

Possamai, A. C. S. *Potencial de lixiviação dos herbicidas diuron e (diuron + hexazinone + sulfometuron) em solos com texturas contrastes*. 2012. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Unidade Universitária de Aquidauana, Universidade do Estado de Mato Grosso do Sul, Aquidauana, 2012.

Prata, F. et al. Glyphosate sorption and desorption in soils with different phosphorous levels. *Scientia Agricola*, v. 60, n. 1, p. 175-180, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162003000100026>.

R Development Core Team. *A language and environment for statistical computing*, 2017.

Rossi, C. V. S.; Alves, P. L. C. A.; Marques Júnior, J. Mobilidade do sulfentrazone em Latossolo Vermelho e em Chernossolo. *Planta Daninha*, v. 23, n. 4, p. 701-710, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582005000400019>.

Santos, M. V. et al. Eficácia e persistência no solo de herbicidas utilizados em pastagem. *Planta Daninha*, v. 24, n. 2, p. 391-398, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582006000200024>.

Sasaki, D. et al. *Vegetação e Plantas do Cristalino*: Um Manual. Alta Floresta: Royal Botanic Gardens, KEW/Fundação Ecológica Cristalino, 2010. 128 p.

Savage, K. E. Adsorption and mobility of metribuzin in soil. *Weed Science*, v. 24, n. 5, p. 525- 528, 1976. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0043174500066601>.

Silva, A. A.; Vivian. R.; Oliveira Júnior, R. S. Herbicidas: comportamento no solo. In: Silva, A. A.; Silva, J. F. (Eds.). *Tópicos em manejo de plantas daninhas*. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2007. p. 189-248.

Tanabe, A. et al. Seasonal and special studies on pesticide residues in surface waters of the Shinano river in Japan. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 49, n. 7, p. 3847-3852, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf010025x>.

Velini, E. D. Comportamento de herbicidas no solo. In: SIMPÓSIO NACIONAL SOBRE MANEJO DE PLANTAS DANINHAS EM HORTALIÇAS, 1992, Botucatu. *Resumos...* Botucatu: p. 44-64, 1992.

Vieira, E. M. et al. Estudo da adsorção/dessorção do ácido 2,4 diclorofenoxyacético (2,4-D) em solo na ausência e presença de matéria orgânica. *Química Nova*, v. 22, n. 1, p. 305-308, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-40421999000300002>.

Wehtje, G. et al. Sorption and mobility of sulfometuron and imazapyr in five Alabama soils. *Weed Science*, v. 35, n. 6, p. 858-864, 1987.

Zappi, D. C. et al. Plantas vasculares da região do Parque Estadual Cristalino, norte de Mato Grosso, Brasil. *Acta Amazônica*, v. 41, n. 1, p. 29-38, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0044-59672011000100004>.