

Seleção de espécies bioindicadoras de resíduos de flumioxazina e saflufenacil no solo
Selection of bioindicator species of flumioxazin and saflufenacil residues in the soil
Selección de especies bioindicadoras de residuos de flumioxazina y saflufenacil en el suelo

Recebido: 21/10/2020 | Revisado: 30/10/2020 | Aceito: 05/11/2020 | Publicado: 08/11/2020

Bruno Foganholi de Sousa Jonas

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0597-2859>

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Brasil

E-mail: brunofoganholi@hotmail.com

Adriano Jakelaitis

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0093-9846>

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Brasil

E-mail: adriano.jakelaitis@ifgoiano.edu.br

Carlos Henrique de Lima e Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5173-5224>

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Brasil

E-mail: valadares_ufsj@yahoo.com.br

Victor Garcia Leão

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4663-096X>

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Brasil

E-mail: victorgarcialeao@hotmail.com

Resumo

Herbicidas com atividade residual têm sido utilizados como estratégia de controle de plantas daninhas no período crítico de competição das culturas. Contudo, é necessário monitorar o comportamento dessas substâncias no solo, visto que podem prejudicar cultivos subsequentes. O bioensaio é um método simples, barato, rápido e altamente sensível para detectar resíduos de herbicidas no solo, até mesmo em baixas concentrações. O objetivo deste trabalho foi selecionar espécies vegetais como bioindicadoras da atividade residual dos herbicidas saflufenacil e flumioxazina no solo. Foram avaliadas as espécies *Panicum maximum* cv. Tamani, *Sorghum bicolor*, *Crambe abyssinica*, *Vigna angularis*, *Cucumis sativus* e *Beta*

vulgaris em combinação fatorial com seis doses do herbicida flumioxazina (0; 2,5; 5; 10; 25 e 50 g. ha⁻¹) ou sete doses do herbicida saflufenacil (0; 2,5; 5; 10; 25; 50 e 100 g. ha⁻¹), delineados em blocos ao acaso, com cinco repetições. Para o herbicida saflufenacil as espécies mais sensíveis foram a *B. vulgaris*, *C. abyssinica* e *C. sativus*. Para o herbicida flumioxazina as espécies mais sensíveis foram *B. vulgaris* e *C. abyssinica*. Considerando que as espécies adequadas para bioensaios são de fácil cultivo, rápido crescimento, sensíveis em baixas doses e de fácil visualização dos sintomas de fitointoxicação, a beterraba foi a que melhor apresentou estas características para ambos os herbicidas.

Palavras-chave: Bioensaio; Bioindicador; Herbicidas; Carryover.

Abstract

Herbicides with residual activity have been used as a weed control strategy in the critical period of crop competition. However, it is necessary to monitor the behavior of these substances in the soil, as they can harm subsequent crops. The bioassay is a simple, inexpensive, fast and highly sensitive method for detecting herbicide residues in the soil, even at low concentrations. The objective of this work was to select plant species as bioindicators of the residual activity of the herbicides saflufenacil and flumioxazin in the soil. The species *Panicum maximum* cv. Tamani, *Sorghum bicolor*, *Crambe abyssinica*, *Vigna angularis*, *Cucumis sativus* and *Beta vulgaris* in a factorial combination with six doses of the herbicide flumioxazin (0; 2.5; 5; 10; 25 and 50 g. ha⁻¹) or seven doses of the herbicide saflufenacil (0; 2.5; 5; 10; 25; 50 and 100 g. ha⁻¹), outlined in randomized blocks, with five replications. For the herbicide saflufenacil the most sensitive species were *B. vulgaris*, *C. abyssinica* and *C. sativus*. For the herbicide flumioxazin the most sensitive species were *B. vulgaris* and *C. abyssinica*. Considering that the species suitable for bioassays are easy to grow, fast to grow, sensitive in low doses and easy to visualize the symptoms of phytointoxication, beet was the one that best presented these characteristics for both herbicides.

Keywords: Bioassay; Bioindicator; Herbicides; Carryover.

Resumen

Los herbicidas con actividad residual se han utilizado como estrategia de control de malezas en el período crítico de competencia de cultivos. Sin embargo, es necesario controlar el comportamiento de estas sustancias en el suelo, ya que pueden dañar cultivos posteriores. El bioensayo es un método sencillo, económico, rápido y muy sensible para detectar residuos de herbicidas en el suelo, incluso a bajas concentraciones. El objetivo de este trabajo fue

selecionar especies vegetales como bioindicadores de la actividad residual de los herbicidas saflufenacil y flumioxazin en el suelo. La especie *Panicum maximum* cv. Tamani, *Sorghum bicolor*, *Crambe abyssinica*, *Vigna angularis*, *Cucumis sativus* y *Beta vulgaris* en combinación factorial con seis dosis del herbicida flumioxazin (0; 2.5; 5; 10; 25 y 50 g. ha⁻¹) o siete dosis del herbicida saflufenacil (0; 2,5; 5; 10; 25; 50 y 100 g. ha⁻¹), perfilado en bloques al azar, con cinco repeticiones. Para el herbicida saflufenacil, las especies más sensibles fueron *B. vulgaris*, *C. abyssinica* y *C. sativus*. Para el herbicida flumioxazin, las especies más sensibles fueron *B. vulgaris* y *C. abyssinica*. Considerando que las especies aptas para bioensayos son fáciles de cultivar, de rápido crecimiento, sensibles en dosis bajas y fáciles de visualizar los síntomas de la fitointoxicación, la remolacha fue la que mejor presentó estas características para ambos herbicidas.

Palabras clave: Bioensayo; Bioindicador; Herbicidas; Arrastre.

1. Introdução

A utilização de herbicidas dentro do cronograma de tratos culturais de uma lavoura é indispensável para garantir altas produtividades, e evitar a competição por recursos como água, luz e nutrientes entre a espécie cultivada e as plantas daninhas que ocupam o mesmo espaço. Essa competição interespecífica traz prejuízos mútuos aos organismos envolvidos, mais evidentes na cultura de interesse econômico, que culmina em redução de produtividade (Franco et al., 2017).

Nesse contexto, os herbicidas aplicados em pré-emergência com persistência no solo tem sido uma importante ferramenta para evitar a infestação de plantas daninhas ao longo do ciclo em que a lavoura se encontra no período crítico de interferência, quando a cultura está sujeita à significativas reduções na produtividade (Monquero et al., 2008). Contudo, a depender das características do solo e da substância utilizada, esses herbicidas podem permanecer ativos por um período maior que o esperado, ocasionando o fenômeno conhecido como *carryover*, comprometendo outras espécies cultivadas em sucessão (Mendes et al., 2017).

Para o monitoramento de resíduos de herbicidas no solo antes da utilização da área para cultivo, diversos métodos podem ser aplicados, porém o mais utilizado são os bioensaios. É considerado um método simples, rápido e de baixo custo, consistindo basicamente na utilização de espécies vegetais sensíveis a tais substâncias e posterior avaliação dos sintomas

de intoxicação apresentados, como a fitointoxicação e reduções na altura e massa seca de parte aérea (Melo et al., 2010; Oliveira et al., 2018).

A realização do bioensaio exige a seleção de uma espécie vegetal que atenda aos requisitos de facilidade de cultivo, sensibilidade a um herbicida específico e apresentação de sintomas de fácil visualização (Barcellos Júnior et al., 2019). Com relação aos herbicidas é importante o conhecimento de suas características físico-químicas como a solubilidade, tempo em que a metade do composto é degradado (meia vida), e mecanismo de ação.

O flumioxazina é um produto não-iônico, possui solubilidade em água de $1,79 \text{ mg L}^{-1}$ a 25°C e pressão de vapor de $2,41 \times 10^{-6} \text{ mmHg}$ a 22°C , sua meia vida no solo é de aproximadamente 22 dias (Carbonari et al., 2010). O saflufenacil é um ácido moderado com pKa de 4,3, solubilidade em água em pH 5 e 7 de 30 mg L^{-1} e 2100 mg L^{-1} respectivamente, e meia vida no solo entre 7 a 35 dias (Diesel et al., 2019). Em plantas pulverizadas com flumioxazina e saflufenacil, a protoporfirina IX é acumulada fora dos plastídios, interagindo com o oxigênio e a luz, formando oxigênio singleto, danificando o tecido foliar pela peroxidação lipídica. Estes herbicidas são inibidores da protoporfirinogênio oxidase (PPO), e quando aplicados em pós-emergência, apresentam como sintomas clorose e, em seguida, necrose que surgem um a três dias após a aplicação. Por outro lado, quando aplicados em pré-emergência, o tecido da planta susceptível é danificado por contato com o herbicida, no momento em que a plântula emerge (Oliveira et al., 2018).

Para constatação de resíduos de saflufenacil no solo, Diesel et al. (2019) observaram que a beterraba é mais sensível em comparação ao pepino, em bioensaio realizado para determinar a persistência desse herbicida em Latossolo. Em estudo com 12 espécies, incluindo monocotiledôneas e dicotiledôneas, Faria et al. (2018) verificaram que a beterraba se mostrou a espécie mais sensível ao tembotrione em baixas concentrações no solo e destacaram suas características desejáveis à realização do bioensaio, sendo espécie de rápido crescimento, e apresentando sintomas de fácil visualização. O pepino demonstrou alta sensibilidade quando utilizado em bioensaios para monitoramento de resíduos de ethoxysulfuron (Oliveira et al., 2018), mesotrione (Mendes et al., 2015), trifloxysulfuron-sodium e pyriithiobac-sodium (Guerra et al., 2011) e hexazinone, diuron e sulfometuron (Inoue et al., 2012). Para avaliar a persistência dos herbicidas chlorimuron-ethyl, diclosulam, flumioxazina e saflufenacil no solo, o pepino foi escolhido por demonstrar melhor desempenho como planta bioindicadora (Patel, 2018) e pelo mesmo motivo em ensaio de avaliação da lixiviação e resíduo de saflufenacil, após períodos de seca (Monquero et al., 2012).

Savaris et al. (2019) utilizaram o pepino no monitoramento de amicarbazone e indaziflam em dois tipos de solo com texturas diferentes, sendo argiloso e arenoso, em seis períodos de semeadura após aplicação, o indaziflam causou a morte do pepino em todos os períodos analisados, sendo o maior período de 0 a 100 DAA. Porém em outro estudo, Dias et al. (2019) apontaram o tomate e pepino como plantas promissoras para a utilização em bioensaios com este herbicida.

Outras espécies recomendadas para monitoramento de herbicidas são o milho e o sorgo, sendo o sorgo apontado como adequado para o metribuzin (Mendes et al., 2015) e para detecção de indaziflam (Braga, 2017). Melo et al. (2010) já haviam constatado alta persistência de sulfentrazone em três tipos de solos, usando como bioindicador o sorgo, o qual apresentou sintomas de intoxicação severos, quando semeado aos 60 DAA.

Neste estudo, objetivou-se selecionar espécies vegetais bioindicadoras da atividade residual dos herbicidas saflufenacil e flumioxazina no solo.

2. Metodologia

A natureza deste estudo caracterizou-se como uma pesquisa de abordagem quantitativa em ambiente controlado (Pereira et al., 2018). Dois experimentos foram conduzidos durante o mês de maio de 2020, em casa de vegetação climatizada (Van der Hoeven, modelo Double Poly Pad Fan), com temperaturas variando de 18 a 29°C, localizada nas dependências do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Campus Rio Verde, GO (17° 48' 28.2" Sul e 50° 54' 09.9" Oeste).

O substrato foi preparado a partir de uma mistura de areia e Latossolo Vermelho distroférrico, obtido em área sem histórico de aplicação de herbicidas no município de Rio Verde. A composição físico-química do solo foi de pH 4,9 (SMP), Ca de 1,46 cmolc dm⁻³, Mg de 0,61 cmolc dm⁻³, Al₃₊ de 0,05 cmolc dm⁻³, CTC de 4,20 cmolc dm⁻³ e K de 0,27 cmolc dm⁻³ e P (Melich) de 0,82 mg dm⁻³, matéria orgânica de 3,51 g dm⁻³, B 0,14 mg dm⁻³, Cu 3,08 mg dm⁻³, Mn 68,87 mg dm⁻³, Fe 45,38 mg dm⁻³ e Zn 0,87 mg dm⁻³, saturação por bases de 55,7%, saturação por alumínio de 2,1%, argila de 47%, silte 8% e areia de 45%.

Durante o processo de homogeneização do substrato foram adicionados três partes de solo, uma parte de areia e 180 g de calcário, 30 g de superfosfatos simples, 10 g de cloreto de potássio e 20 g de ureia. Foram utilizados potes plásticos descartáveis de 250 cm³ preenchidos com o substrato até aproximadamente 0,5 cm da borda, sendo cada pote uma parcela. Após o preparo, os potes plásticos foram devidamente acomodados em bancada de metal e a

semeadura dos bioindicadores foi realizada no dia 04/05/2020. Foram semeadas cinco sementes de cada espécie em cada pote e aos 7 dias após emergência (DAE) foi realizado o desbaste, mantendo-se duas plantas por pote.

O delineamento usado foi o inteiramente casualizado em esquema fatorial, com cinco repetições. O primeiro fator foi constituído de seis espécies vegetais: *Panicum maximum* cv. Tamani (capim-colonião), *Sorghum bicolor* (sorgo), *Crambe abyssinica* (crambe), *Vigna angularis* (feijão azuki), *Cucumis sativus* (pepino) e *Beta vulgaris* (beterraba) para ambos os herbicidas. O segundo fator foi constituído de doses, sendo seis doses (0; 2,5; 5; 10; 25 e 50 g. ha⁻¹) de flumioxazina (Sumyzin 500 SC) e sete doses (0; 2,5; 5; 10; 25; 50 e 100 g. ha⁻¹) para o saflufenacil (Heat, 700 g.kg⁻¹ i. a., WG).

Após a semeadura foi realizada a aplicação dos herbicidas, utilizando-se um pulverizador pressurizado a CO₂, com pressão entre 2,5 bar, equipado com barra de 4 pontas TT 110.02 espaçadas em 0,5 m entre si. O volume de calda usado foi o de 232 L.ha⁻¹ e as condições climáticas no momento da aplicação foram de umidade relativa de 53,4%, velocidade do vento de 0,8 m.s⁻² e temperatura do ar de 28,6 °C.

A irrigação nos potes plásticos foi realizada uma vez ao dia, mantendo o solo sempre próximo a capacidade de campo, e para o melhor desenvolvimento das plantas foi feita a fertilização com 10 mL por pote plástico de solução de 2 g L⁻¹ de fertilizante comercial Forth Jardim® da marca Tecnutri do Brasil, contendo N: 13; P₂O₅: 5; K₂O: 13; B: 0,04; Ca: 1; Cu: 0,05; S: 5; Fe: 0,2; Mg: 1; Mn: 0,08; Mo: 0,005 e Zn: 0,15%.

Aos 25 dias após aplicação dos herbicidas (DAA) foram determinadas a porcentagem de fitointoxicação, atribuindo notas de 0 a 100, onde 0 significa ausência de sintomas e 100 a morte total das plantas (SBCPD, 1995), a altura de plantas (AP) e a massa seca de parte aérea (MSPA). A AP foi realizada com auxílio de régua milimetrada, sendo expresso os resultados em centímetros. Para a MSPA, as plantas foram cortadas na região do coleto, acondicionadas em sacos de papel e levadas para secar em estufa de circulação de ar forçada, por 72 horas à 65 °C. Após esse intervalo, as amostras foram pesadas em balança analítica (0,0001g).

As médias referentes à AP e MSPA obtidas pela testemunha de cada espécie (dose zero), dentro de cada dose foram transformadas, atribuindo-se índice igual a 1. Os resultados de porcentagem de fitointoxicação, AP e MSPA dos bioindicadores foram submetidos à análise de variância (p≤0,05) e de regressão. Os modelos de regressão foram escolhidos considerando-se a significância dos coeficientes de regressão e o significado biológico. Para os contrastes entre espécies foi usado o teste de Tukey (p≤0,05).

3. Resultados e Discussão

Para o herbicida saflufenacil foi observado interação significativa entre doses e espécies para a fitointoxicação (Tabela1). Nas menores doses, abaixo de 10 g.ha⁻¹ houve menor sensibilidade ao herbicida para sorgo e feijão azuki e maior sensibilidade para crambe, pepino e beterraba. Nas doses de 50 g.ha⁻¹ e acima desta, os resultados de fitointoxicação foram semelhantes para todas as espécies, com resultados superiores a 87%.

Em relação as doses foi observado para todas as espécies que os valores de fitointoxicação foram ajustados à equação de regressão não-linear do tipo sigmoide de três parâmetros (Tabela 1) modelo $y = a / (1 + \exp(-x-x_0 / b))$, em que: y = variável resposta; x = dose do herbicida; e a , x_0 e b = parâmetros da equação, sendo a a diferença entre os pontos máximo e mínimo da curva, x_0 é a dose que proporciona 50% de resposta da variável e b a declividade da curva. Assim, quanto menor o valor de x_0 maior o potencial de fitointoxicação para a espécie vegetal, sendo observado menores valores para pepino, crambe e beterraba e maiores valores para feijão azuki e sorgo (Tabela 1), caracterizando para os dois últimos maior tolerância.

Tabela 1 - Fitointoxicação dos bioindicadores aos 25 dias após a aplicação em função das doses de saflufenacil.

Espécies	Doses (g ha ⁻¹)							Equação	R ²
	0	2,5	5	10	25	50	100		
Capim tamani	0,0 a ^{1/}	34,0 bcd	48,0 b	52,0 b	68,0 a	87,6 a	88,0 a	$\hat{Y} = 81,0707/1 + \exp(-(x - 5,6967)/4,2990)$	0,932*
Sorgo	0,0 a	16,0 ab	19,0 a	38,0 ab	66,0 a	94,0 a	86,0 a	$\hat{Y} = 89,2123/1 + \exp(-(x - 14,8668)/7,5081)$	0,985*
Crambe	0,0 a	45,0 cd	93,0 c	96,0 c	100,0 b	100,0 a	100,0 a	$\hat{Y} = 98,6139/1 + \exp(-(x - 2,6447)/0,7334)$	0,998*
Feijão azuki	0,0 a	0,0 a	4,0 a	20,0 a	100,0 b	100,0 a	100,0 a	$\hat{Y} = 100,2344/1 + \exp(-(x - 13,2794)/2,3742)$	0,999*
Pepino	0,0 a	52,0 d	84,0 c	97,2 c	98,0 b	100,0 a	100,0 a	$\hat{Y} = 98,2567/1 + \exp(-(x - 2,5123)/0,9688)$	0,993*
Beterraba	0,0 a	28,0 bc	96,0 c	100,0 c	100,0 b	100,0 a	100,0 a	$\hat{Y} = 99,9784/1 + \exp(-(x - 3,0691)/0,6016)$	1,000*

^{1/}Médias seguidas pelas mesmas letras nas colunas são estatisticamente iguais pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. * significativo pelo teste F. Fonte: Autores (2020).

A aplicação de saflufenacil no solo reduziu a altura dos bioindicadores, principalmente a partir da dose de 25 g.ha⁻¹, onde as espécies crambe, feijão azuki, beterraba e pepino foram as mais afetadas (Tabela 2) no índice de altura. Os dados de altura foram ajustados à equação de regressão não-linear exponencial decrescente de dois parâmetros $y = a \cdot \exp(-b \cdot x)$ em que: y = variável resposta; x = dose do herbicida; e a e b = parâmetros da equação, sendo a é o valor máximo estimado para a variável resposta e b a declividade da curva. Desta forma, as maiores quedas no índice de altura foram para pepino, beterraba e crambe, respectivamente (Tabela 2).

O capim tamani e o sorgo foram menos afetados pelo herbicida saflufenacil do que as demais espécies, principalmente nas doses acima de 25 g.ha⁻¹. O comportamento representado por ambas as espécies em função das doses ajustou-se ao modelo linear decrescente com queda nos índices de altura de 7 e 0,4% para capim tamani e sorgo, respectivamente, para cada aumento de um g.ha⁻¹ do herbicida aplicado (Tabela 2).

Interação significativa entre doses e espécies foi observada para a MSPA e queda exponencial verificada para todas as espécies em função das doses de saflufenacil (Tabela 3). Maiores valores de declividade da curva exponencial foram observados para crambe (0,21), beterraba (0,201) e pepino (0,125) demonstrando maior efeito herbicida sobre estas espécies.

Para sorgo, capim tamani e feijão azuki os valores foram 0,018, 0,016 e 0,08, respectivamente, demonstrando sensibilidade para esta variável somente em doses acima de 50 g.ha⁻¹ (Tabela 3). Resultados semelhantes para este herbicida quanto a sensibilidade da beterraba foram constatados por Diesel et al. (2012) e Barcellos Júnior et al. (2019) as quais concluem que esta espécie pode ser considerada como bioindicadora da presença do saflufenacil na solução do solo para estudos da dinâmica ambiental desse herbicida.

A sensibilidade de pepino e da beterraba ao saflufenacil foi reportada por Robinson e McNaughton (2012) que avaliando sintomas causados pelo herbicida proveniente de resíduos no solo, em espécies semeadas um ano após a aplicação do herbicida, observaram redução de massa seca destas espécies em doses mais baixas, quando comparado com outros bioindicadores. A sensibilidade da beterraba ao saflufenacil pode ser explicada devido a redução da enzima glutatona S-transferase, manifestada quando a espécie é tratada com o herbicida (Wei et al., 2010). A glutatona S-transferase no citosol ativa o tripeptídeo glutatona, responsáveis pela conjugação com herbicidas, inativando sua ação (Edwards et al., 2000).

Tabela 2 - Índice de altura dos bioindicadores aos 25 dias após a aplicação em função das doses de saflufenacil.

Espécies	Doses (g.ha ⁻¹)							Equação	R ²
	0	2,5	5	10	25	50	100		
Capim tamani	1,00 a	0,72 ab	0,75 bc	0,89 b	0,54 b	0,45 b	0,48 b	$\hat{Y} = 0,8736 - 0,0733x$	0,854*
Sorgo	1,00 a	1,02 bc	0,98 c	0,87 b	0,74 b	0,36 ab	0,63 b	$\hat{Y} = 0,9319 - 0,0048x$	0,722*
Crambe	1,00 a	0,66 ab	0,40 ab	0,21 a	0,00 a	0,00 b	0,00 a	$\hat{Y} = 0,9974\exp(-0,1685x)$	0,999*
Feijão azuki	1,00 a	1,04 bc	0,98 c	0,89 b	0,00 a	0,00 b	0,00 a	$\hat{Y} = 1,1690\exp(-0,0579x)$	0,944*
Pepino	1,00 a	0,58 a	0,40 ab	0,15 a	0,06 a	0,00 b	0,00 a	$\hat{Y} = 0,9893\exp(-0,1915x)$	0,977*
Beterraba	1,00 a	1,16 c	0,32 a	0,00 a	0,00 a	0,00 b	0,00 a	$\hat{Y} = 1,1652\exp(-0,1787x)$	0,912*

^{1/}Médias seguidas pelas mesmas letras nas colunas são estatisticamente iguais pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. * significativo pelo teste F. Fonte: Autores (2020).

Tabela 3 - Massa seca dos bioindicadores aos 25 dias após a aplicação em função das doses de saflufenacil.

Espécies	Doses (g.ha ⁻¹)							Equação	R ²
	0	2,5	5	10	25	50	100		
Capim tamani	1,00 a	0,66 a	0,64 ab	1,13 b	0,54 bc	0,29 a	0,27 a	$\hat{Y} = 0,8881\exp(-0,0158x)$	0,786*
Sorgo	1,00 a	1,04 a	0,93 b	0,86 b	0,68 c	0,17 a	0,45 a	$\hat{Y} = 1,0207\exp(-0,0177x)$	0,875*
Crambe	1,00 a	0,67 a	0,32 a	0,10 a	0,00 a	0,00 a	0,00 a	$\hat{Y} = 1,0231\exp(-0,2100x)$	0,996*
Feijão azuki	1,00 a	1,05 a	0,89 b	0,84 b	0,00 a	0,00 a	0,00 a	$\hat{Y} = 1,1500\exp(-0,0610x)$	0,953*
Pepino	1,00 a	0,67 a	0,49 ab	0,32 a	0,06 ab	0,00 a	0,00 a	$\hat{Y} = 0,9693\exp(-0,1254x)$	0,996*
Beterraba	1,00 a	0,97 a	0,27 a	0,00 a	0,00 a	0,00 a	0,00 a	$\hat{Y} = 1,1102\exp(-0,2010x)$	0,943*

^{1/}Médias seguidas pelas mesmas letras nas colunas são estatisticamente iguais pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. * significativo pelo teste F. Fonte: Autores (2020).

O feijão azuki foi pouco responsivo para a detecção de baixas concentrações do herbicida safluenacil no solo e apresentou sensibilidade somente nas maiores doses ($> 25 \text{ g.ha}^{-1}$), corroborando com os resultados de Soltani et al. (2010) que constataram que este feijão foi severamente afetado na dose de 100 g.ha^{-1} . O capim tamani e o sorgo demonstraram comportamento semelhante entre si, apresentando-se menos sensíveis ao saflufenacil, o qual justifica-se pela seletividade que a maioria das espécies da família Poaceae possuem ao herbicida.

Para o herbicida flumioxazina foi observada interação significativa entre doses e espécies para fitointoxicação (Tabela 4), sendo o crambe, capim tamani e beterraba as espécies mais sensíveis, principalmente a partir da dose de 5 g.ha^{-1} . A partir da dose de 25 g.ha^{-1} , o sorgo e feijão azuki demonstraram intoxicação mais severa, demonstrando tolerância ao herbicida em doses mais baixas. Para todas as espécies testadas, os efeitos das doses foram explicadas pelo modelo de regressão não-linear do tipo sigmoide de três parâmetros, na qual confirma-se maior sensibilidade ao flumioxazina para as espécies crambe, capim tamani e beterraba, que apresentaram baixos valores de x_0 sendo 0,966; 1,863; e $3,40 \text{ g.ha}^{-1}$, respectivamente. Maior valor foi encontrado para o sorgo que apresentou x_0 de $23,478 \text{ g.ha}^{-1}$, demonstrando que é uma espécie imprópria para a utilização em bioensaios com este herbicida, pois é pouco responsiva nas menores doses e extremamente sensível nas maiores.

A fitointoxicação foi a melhor variável para constatar a sensibilidade das plantas ao flumioxazina pois se ajustou mais adequadamente ao modelo estatístico. Por pertencer ao grupo dos inibidores da PROTOX, os sintomas de intoxicação são visíveis, com destaque para a clorose e necrose nas folhas (Barcellos Júnior et al., 2019). A fitointoxicação foi também a variável recomendada para a constatação da presença de resíduo de 2,4 D no solo e a beterraba se mostrou a espécie mais sensível a este herbicida (Santos et al., 2013).

Foram observadas interações significativas entre doses de flumioxazina e espécies para as variáveis índice de altura e massa seca (Tabelas 5 e 6). A partir da dose de 10 g.ha^{-1} ficou mais evidente as diferenças entre espécies para o índice de altura destacando-se maiores valores para pepino, sorgo e feijão azuki (Tabela 5). Para esta variável, nas maiores doses, os menores valores foram encontrados para capim tamani, crambe e beterraba. Entre espécies observa-se maior tolerância para esta variável em função das doses para sorgo e pepino que apresentaram comportamento linear decrescente com redução de 0,99 e 1,15%, respectivamente, com o acréscimo unitário das doses. As demais espécies tiveram redução exponencial com o aumento das doses, com maiores valores de declividade da curva

exponencial para crambe (0,17), beterraba (0,17), capim tamani (0,07) e feijão azuki (0,03).

Tabela 4 - Fitointoxicação dos bioindicadores aos 25 dias após a aplicação em função das doses de flumioxazina.

Espécies	Doses (g.ha ⁻¹)						Equação	R ²
	0	2,5	5	10	25	50		
Capim tamani	0,0 a	83,0 c	80,0 c	92,0 c	100,0 c	100,0 a	$\hat{Y} = 93,0025/1 + \exp(-(x - 1,8634)/0,3010))$	0,981*
Sorgo	0,0 a	0,0 a	8,0 ab	13,0 a	50,0 a	89,0 a	$\hat{Y} = 90,7120/1 + \exp(-(x - 23,4780)/6,8125)$	0,987*
Crambe	0,0 a	96,6 c	89,0 c	94,8 c	100,0 c	100,0 a	$\hat{Y} = 96,0800/1 + \exp(-(x - 0,9660)/0,0646)$	0,995*
Feijão azuki	0,0 a	5,0 a	2,0 a	10,0 a	78,0 b	100,0 a	$\hat{Y} = 100,1085/1 + \exp(-(x - 19,5286)/4,3463)$	0,999*
Pepino	0,0 a	7,0 a	23,0 b	64,0 b	86,0 bc	97,2 a	$\hat{Y} = 91,5023/1 + \exp(-(x - 7,9046)/2,3724)$	0,995*
Beterraba	0,0 a	38,0 b	73,0 c	100,0 c	99,0 c	99,0 a	$\hat{Y} = 99,1486/1 + \exp(-(x - 3,4060)/1,3436)$	0,999*

^{1/}Médias seguidas pelas mesmas letras nas colunas são estatisticamente iguais pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. * significativo pelo teste F. Fonte: Autores (2020).

Tabela 5 - Índice de altura dos bioindicadores aos 25 dias após a aplicação em função das doses de flumioxazina.

Espécies	Doses (g.ha ⁻¹)						Equação	R ²
	0	2,5	5	10	25	50		
Capim tamani	1,00 a	0,37 ab	0,78 a	0,57 bc	0,00 a	0,00 a	$\hat{Y} = 0,8736\exp(-0,0733x)$	0,859*
Sorgo	1,00 a	0,91 c	0,89 a	0,86 c	0,77 c	0,45 b	$\hat{Y} = 0,9671 - 0,0099x$	0,984*
Crambe	1,00 a	0,17 a	0,54 a	0,30 ab	0,00 a	0,00 a	$\hat{Y} = 0,8488\exp(-0,1714x)$	0,834*
Feijão azuki	1,00 a	0,91 c	0,95 a	0,89 c	0,27 ab	0,16 ab	$\hat{Y} = 1,0665\exp(-0,0386x)$	0,958*
Pepino	1,00 a	1,01 c	0,77 a	0,80 c	0,63 b	0,45 b	$\hat{Y} = 0,9386 - 0,0115x$	0,931*
Beterraba	1,00 a	0,80 bc	0,53 a	0,00 a	0,04 a	0,16 ab	$\hat{Y} = 1,0670\exp(-0,1709x)$	0,951*

^{1/}Médias seguidas pelas mesmas letras nas colunas são estatisticamente iguais pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. * significativo pelo teste F. Fonte: Autores (2020).

Tabela 6 - Índice de massa seca dos bioindicadores aos 25 dias após a aplicação em função das doses de flumioxazina.

Espécies	Doses (g.ha ⁻¹)						Equação	R ²
	0	2,5	5	10	25	50		
Capim tamani	1,00 a	0,24 a	0,63 c	0,76 b	0,00 a	0,00 a	$\hat{Y} = 1,0343\exp(-0,0497x)$	0,638*
Sorgo	1,00 a	0,81 bc	0,78 ab	0,75 b	0,64 a	0,36 a	$\hat{Y} = 0,8887 - 0,0106x$	0,956*
Crambe	1,00 a	0,15 ab	0,51 a	0,21 ab	0,00 a	0,00 a	$\hat{Y} = 0,8931\exp(-0,2361x)$	0,855*
Feijão azuki	1,00 a	1,00 c	1,00 bc	0,77 b	0,22 a	0,09 a	$\hat{Y} = 1,1146\exp(-0,0475x)$	0,971*
Pepino	1,00 a	0,98 c	0,74 a b	0,59 ab	0,43 a	0,23 a	$\hat{Y} = 0,8895 - 0,0148x$	0,920*
Beterraba	1,00 a	0,90 c	0,33 a b	0,00 a	0,03 a	0,04 a	$\hat{Y} = 1,0925\exp(-0,1960x)$	0,953*

^{1/}Médias seguidas pelas mesmas letras nas colunas são estatisticamente iguais pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. * significativo pelo teste F. Fonte: Autores (2020).

Para o índice de massa seca, o comportamento em função das doses para cada espécie assemelhou-se ao observado para o índice em altura com destaque para sorgo e pepino, que apresentaram queda linear nos valores demonstrando maior tolerância em relação as demais espécies, que apresentaram diminuição exponencial (Tabela 6). Das espécies que se apresentaram mais sensíveis e com maiores valores de declividade da curva exponencial foram crambe (0,23), beterraba (0,20), capim tamani (0,04) e feijão azuki (0,04). Em doses igual ou superior a 25 g ha⁻¹, os índices para todas as espécies foram estatisticamente iguais (Tabela 6).

Ao analisar a dose necessária em proporcionar 50% de resposta (C₅₀) para as variáveis, a beterraba e o crambe apresentaram os menores valores para os dois herbicidas, ficando abaixo de 5 % da dose comercial de 100 g ha⁻¹ de flumioxazina e saflufenacil, o que sugere maior sensibilidade dessas espécies (Tabela 7).

Tabela 7 - Dose necessária em proporcionar 50% de resposta (C50) para as variáveis fitointoxicação, índice de altura (IA) e índice de matéria seca da parte aérea (IMS).

Espécies	Saflufenacil		
	C ₅₀ ^{1/} (g.ha ⁻¹)		
	Fitointoxicação	IA	IMS
Capim tamani	5,69	7,60	36,31
Sorgo	14,86	89,80	40,23
Crambe	2,64	4,09	3,43
Feijão azuki	13,27	14,65	13,65
Pepino	2,51	3,56	5,27
Beterraba	3,06	4,73	3,96
Flumioxazina			
Capim tamani	1,86	7,42	14,60
Sorgo	23,47	47,15	36,58
Crambe	0,96	3,08	2,45
Feijão azuki	19,52	19,58	16,87
Pepino	7,90	38,09	26,38
Beterraba	3,40	4,43	3,98

^{1/}Médias seguidas pelas mesmas letras nas colunas são estatisticamente iguais pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. * significativo pelo teste F. Fonte: Autores (2020).

Para o herbicida saflufenacil, além da beterraba e do crambe, o pepino apresentou baixos valores de C50 para todas as variáveis, sendo indicado também como bioindicador para este herbicida. Diesel et al. (2012) constataram maior sensibilidade do pepino e da beterraba ao saflufenacil, corroborando com os resultados obtidos nesta pesquisa. Por outro lado, Barcellos Junior et al. (2019), relataram que além da beterraba, o pepino foi a espécie que apresentou baixo C50 para o saflufenacil em relação a fitointoxicação, porém não foi indicada como sensível ao herbicida, pois o saflufenacil não causou grandes reduções na matéria seca da parte aérea e na matéria seca total do pepino, não sendo suficiente para promover a morte da planta.

Os maiores valores de C50 foram observados para o sorgo e feijão azuki, respectivamente, para os dois herbicidas, o que reforça a tolerância dessas espécies às baixas concentrações de flumioxazina e saflufenacil no solo, não sendo adequadas para a utilização em bioensaios.

4. Considerações Finais

Para o herbicida saflufenacil as espécies mais sensíveis foram a beterraba, o crambe e o pepino.

Para o flumioxazina as espécies mais sensíveis foram a beterraba e o crambe.

Dentre estas espécies, a beterraba pode ser indicada preferencialmente como bioindicadora de ambos os herbicidas pela facilidade de cultivo, crescimento rápido, sensibilidade em baixas doses e permite rápida visualização dos sintomas de intoxicação.

Novos estudos podem ser realizados com outras espécies bioindicadoras com o objetivo de expandir a utilização desse método para ambos os herbicidas.

Referências

Alonso, D. G., Oliveira Júnior, R. S., & Constantin, J. (2013). Potencial de carryover de herbicidas com atividade residual usados em manejo outonal. *Buva: Fundamentos e recomendações para manejo*. Curitiba: Ompipax, 91-104.

Andrade, D. N. D. (2019). Alternativas herbicidas para o controle em pré-emergência de capim amargoso.

Carbonari, C. A., Gomes, G. L. G. C., & Velini, E. D. (2010). Efeitos de períodos sem a ocorrência de chuva na eficácia do flumioxazin aplicado no solo e na palha de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Herbicidas*, 9(3), 81-88.

Cole, D. J. (2001). Weed Science Society of America, 2001. *Pesticide Outlook*, 12(2), 62-63.

Constantin, J., Biffe, D. F., Rios, F. A., de Oliveira Júnior, R. S., Franchini, L., Raimondi, M. A., & Martini, P. (2011). Desempenho de heat aplicado em dessecação antecedendo a semeadura da cultura do algodoeiro para controle de corda-de-viola, trapoeraba e leiteiro. In *Embrapa Algodão-Artigo em anais de congresso (Alice)*. Congresso Brasileiro De Algodão, 8.; Cotton Expo, 1., 2011, São Paulo. Evolução da cadeia para construção de um setor forte: Anais. Campina Grande, PB: Embrapa Algodão, 2011.

Dan, H. A., Barroso, A. L. D. L., Dan, L. G. D. M., Finotti, T. R., Feldkircher, C., & Santos, V. S. (2010). Controle de plantas daninhas na cultura do milho por meio de herbicidas aplicados em pré-emergência. *Pesquisa Agropecuária Tropical (Agricultural Research in the Tropics)*, 10-5216.

Dan, H. A., Dan, L. G. D. M., Barroso, A. L. D. L., Procópio, S. O., Oliveira Jr, R. S., Assis, R. L., & Feldkircher, C. (2011). Atividade residual de herbicidas pré-emergentes aplicados na cultura da soja sobre o milheto cultivado em sucessão. *Embrapa Soja-Artigo em periódico indexado (ALICE)*.

Dan, H. A., Dan, L. G. D. M., Barroso, A. L. D. L., Procópio, S. D. O., Oliveira Júnior, R. S. D., Braz, G. B. P., & Alonso, D. G. (2012). Atividade residual de herbicidas usados na soja sobre o girassol cultivado em sucessão. *Ciência Rural*, 42(11), 1929-1935.

da Silva, A., de Oliveira JR, R., Costa, E., & Ferreira, L. (1999). Efeito residual no solo dos herbicidas imazamox e imazethapyr para as culturas de milho e sorgo. *Planta Daninha*, 17(3), 345-354.

de Oliveira, M. F. (1995). *Adsorção, lixiviação e persistência de flumioxazin e metribuzin em diferentes solos*. UFV.

de Oliveira, T. L., de Paula Senoski, M., Assis, A. C. D. L. P., de Miranda, V. P., Melo, C. A. D., & dos Reis, M. R. (2018). Seleção de espécies bioindicadoras do herbicida ethoxysulfuron. *Revista de Ciências Agrárias Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences*, 61.

Dias, M. A. N., Mondo, V. H. V., & Cicero, S. M. (2010). Vigor de sementes de milho associado à mato-competição. *Revista Brasileira de Sementes*, 32(2), 93-101.

Diesel, F., Trezzi, M. M., Pazuch, D., Xavier, E., Rosin, D., & Pagnoncelli, F. (2012). Seleção de espécies da família Cucurbitaceae e Chenopodiaceae para indicação da presença de saflufenacil no solo. *Pesticidas: Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente*, 22.

Diesel, F., Trezzi, M. M., Rosin, D., Barancelli, M. V. J., Batistel, S. C., & Pagnoncelli, F. D. B. (2016). Seletividade temporal do herbicida saflufenacil à cultura do feijão em latossolo vermelho distroférico. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 38(4), 421-428.

Diesel, F., Trezzi, M. M., Vidal, R. A., Barancelli, M. V. J., & Mizerski, P. (2019). Bioassay for Determining Persistence of the Herbicide Saflufenacil in an Oxisol. *Planta Daninha*, 37.

Edwards, R., Dixon, D. P., & Walbot, V. (2000). Plant glutathione S-transferases: enzymes with multiple functions in sickness and in health. *Trends in plant science*, 5(5), 193-198.

Faria, A. T., Silva, E. M. G., Pereira, G. A. M., Souza, M. F., Silva, A. A., & Reis, M. R. (2018). Selection of Indicator Species of the Tembotrione Sorption in Soils with Different Attributes. *Planta Daninha*, 36.

Franco, J. J., Agostinetto, D., Langaro, A. C., Perboni, L. T., & Vargas, L. (2017). Competitividade relativa de biótipos de capim pé-de-galinha com a cultura da soja. *Revista Caatinga*, 30(2), 271-277.

Gazziero, D. L. P. (1995). *Procedimentos para instalação, avaliação e análise de experimentos com herbicidas*. Sociedade Brasileira da Ciência de Plantas Daninhas.

Grossmann, K., Hutzler, J., Caspar, G., Kwiatkowski, J., & Brommer, C. L. (2011). Saflufenacil (Kixor™): biokinetic properties and mechanism of selectivity of a new protoporphyrinogen IX oxidase inhibiting herbicide. *Weed Science*, 59(3), 290-298.

Guerra, N., de Oliveira Júnior, R. S., Constantin, J., de Oliveira Neto, A. M., de Almeida Dan, H., Alonso, D. G., & de Campos Jumes, T. M. (2011). Seleção de espécies bioindicadoras para os herbicidas trifloxysulfuron-sodium e pyriithiobac-sodium. *Revista Brasileira de Herbicidas*, 10(1), 37-48.

Inoue, M. H., Tschope, M. C., Mendes, K. F., Matos, A., Goulart, B., & Ben, R. (2012). Seleção de bioindicadores para herbicidas residuais aplicados em pré-emergência. *Revista de Ciências Agro-Ambientais*, 10(2), 173-182.

Junior, L. F. R., Gonçalo, T. P., Sousa, B. F., & da Costa, J. L. B. (2018). Tolerância inicial de feijão-caupi a herbicidas aplicados em pré-emergência. *Revista Brasileira de Herbicidas*, 17(3), 603-1.

Júnior, L. H. B., Agazzi, L. R., Pereira, G. A. M., da Silva, E. M. G., Piratoba, A. R. A., de Souza, P. S. R., & da Silva, A. A. (2019). Espécies indicadoras de resíduos de saflufenacil em solos. *Revista Brasileira de Herbicidas*, 18(2), 653-1.

Melo, C. A. D., Medeiros, W. N., Tuffi Santos, L. D., Ferreira, F. A., Ferreira, G. L., Paes, F. A. S. V., & Reis, M. R. (2010). Efeito residual de sulfentrazone, isoxaflutole e oxyfluorfen em três solos. *Planta daninha*, 28(4), 835-842.

Mendes, K. F., de Souza, T. N. R., Possamai, A. C. S., Inoue, M. H., Nunes, A. K. D. A., & Mertens, T. B. (2015). Seleção de plantas indicadoras para o monitoramento do mesotrione e metribuzin em solo argiloso. *Revista de Ciências Agroambientais, Alta Floresta, MT*, 13(1), 53-59.

Mendes, K. F., Dias, R. C., & Reis, M. R. (2017). Carryover e persistência de herbicidas em solos. *Boletim Técnico, Viçosa: SBCPD Comitê de Qualidade Ambiental*.

Monquero, P. A., Binha, D. P., Silva, A. C., Silva, P. V., & Amaral, L. R. (2008). Eficiência de herbicidas pré-emergentes após períodos de seca. *Planta daninha*, 26(1), 185-193.

Monqueiro, P. A., Sabbag, R., Orzari, I., Hijano, N., Galvani Filho, M., Dallacosta, V., ... & Hirata, A. C. (2012). Lixiviação de saflufenacil e residual após períodos de seca. *Planta Daninha*, 30(2), 415-423.

Munhos, T. F., Martins, M. B., Gonzales, P., Ely, M. A., Maciel Jr, F. I., Wotter, V., ... & Andres, A. (2019). Seletividade de latifolicidas aplicados em pré-emergência do arroz irrigado brs pampeira. In *Embrapa Clima Temperado-Artigo em anais de congresso (ALICE)*. In: Congresso Brasileiro De Arroz Irrigado, 11, 2019. Balneário Camboriú, SC. Inovação e desenvolvimento na orizicultura: anais eletrônicos. Itajaí: Epagri/Sosbai, 2019.

- Patel, F. (2018). *Eficiência agrônômica e persistência de herbicidas pré-emergentes na cultura da soja* (Master's thesis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná).
- Pereira, A. S., Shitsuka, D. M., Parreira, F. J., Shitsuka, R. (2018). *Metodologia da pesquisa científica*. [e-book]. Santa Maria: UAB/NTE/UFSM. Recuperado de https://www.ufsm.br/app/uploads/sites/358/2019/02/Metodologia-da-Pesquisa-Cientifica_final.pdf.
- Ribeiro, S. R. S., Barbosa, L. B., de Aguiar Carvalho, J., Scalzer, R. R. C., & Pinho, C. F. (2019, December). Avaliação de residual de herbicidas pré-emergentes em algodão. In *Anais do Congresso Brasileiro de Fitossanidade* (Vol. 5, No. 1).
- Robinson, D. E., & McNaughton, K. E. (2012). Saflufenacil carryover injury varies among rotational crops. *Weed Technology*, 26(2), 177-182.
- Sanchotene, D. M., Dornelles, S. H. B., Bolzan, T. M., Voss, H. M. G., dos Santos Escobar, O., Leon, C. B., & Santiago, A. C. D. A. U. (2017). Desempenho de diferentes herbicidas pré-emergentes para controle de *euphorbia heterophylla* na cultura da soja.
- Santos, D. P. D., Braga, R. R., Guimarães, F. A. R., Passos, A. B. R. D. J., Silva, D. V., Santos, J. B. D., & Nery, M. C. (2013). Determinação de espécies bioindicadoras de resíduos de herbicidas auxínicos. *Revista Ceres*, 60(3), 354-362.
- Savaris, Q. M., Inoue, M. H., Mendes, K. F., Maciel, C. D. G., & Helvig, E. O. (2019). Determination of residual effect of indaziflam and amicarbazone in two soils through bioassay. *Revista Brasileira de Herbicidas*, 18(3), 617-1.
- Silva, F. M. L., Cavalieri, S. D., São José, A. R., Ulloa, S. M., & Velini, E. D. (2011). Atividade residual de 2, 4-D sobre a emergência de soja em solos com texturas distintas. *Revista Brasileira de Herbicidas*, 10(1), 29-36.
- Silva, A. A., Vivian, R., & Oliveira Jr, R. S. (2007). Herbicidas: comportamento no solo. *Tópicos em manejo de plantas daninhas*, 189-citation_lastpage.

Sikkema, P. H., Shropshire, C., & Soltani, N. (2008). Tolerance of spring barley (*Hordeum vulgare* L.), oats (*Avena sativa* L.) and wheat (*Triticum aestivum* L.) to saflufenacil. *Crop Protection*, 27(12), 1495-1497.

Soltani, N., Shropshire, C., & Sikkema, P. H. (2010). Sensitivity of leguminous crops to saflufenacil. *Weed Technology*, 24(2), 143-146.

Wei, D. I. N. G., Cheng, Z., & Bo, T. A. O. (2010). Effect of chlorimuron-ethyl on biochemical mechanism in tolerant sugar beet. *Agricultural Sciences in China*, 9(12), 1771-1776.

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Bruno Foganholi de Sousa Jonas – 40%

Adriano Jakelaitis – 40%

Carlos Henrique de Lima e Silva – 15%

Victor Garcia Leão – 5%