

Detecção de resíduo biodisponível de S-metolachlor no solo pelo método de bioensaio

Detection of bioavailable residue of S-metolachlor in the soil by bioassay method

Mariana D. Rodrigues^a, Kassio F. Mendes^{a*}, Ivan F. Furtado^a, Wendel M. de Souza^a

^aDepartamento de Agronomia, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil.

Resumo: Introdução: A seleção de plantas bioindicadoras pode auxiliar na determinação de resíduos de herbicidas no solo.

Objetivo: Analisar os níveis de injúrias e redução de biomassa em plantas bioindicadoras na presença de resíduo de S-metolachlor no solo.

Métodos: Quatro potenciais espécies bioindicadoras foram avaliadas: pepino (*Cucumis sativus*), rabanete (*Raphanus sativus*), sorgo (*Sorghum bicolor*) e abobrinha (*Cucurbita pepo*), em seis doses do S-metolachlor (0; 180,5; 360; 720; 1440 e 2880 g ha⁻¹). As plantas foram avaliadas, 21 dias após a semeadura (DAE), quanto aos níveis de injúria e porcentagem de biomassa da matéria seca da parte aérea com relação ao tratamento controle, sem aplicação do herbicida.

Resultados: O *C. sativus* se comportou como uma espécie extremamente sensível, com redução de 100% em matéria seca a partir da metade da dose recomendada (1440 g ha⁻¹) do herbicida, e foi a única espécie que teve >80% de controle comparada com as demais plantas bioindicadoras. O *S. bicolor* foi a espécie que apresentou o menor valor de dose para redução de seu crescimento, precisando de apenas 5% da dose recomendada para reduzir em 80% seu crescimento e atingindo 50% de controle com uma dose aproximada de 14% da recomendada. As espécies *R. sativus* e *C. pepo*, não apresentam potencial como plantas bioindicadoras devido à alta tolerância ao herbicida.

Conclusões: O *C. sativus* e *S. bicolor* apresentaram maior potencial para uso como plantas bioindicadoras em estudos comportamentais em solo contaminado com resíduo biodisponível de S-metolachlor e/ou para produtores realizarem testes rápidos com bioensaios analisando o *carryover* deste herbicida no solo.

Palavras-chave: níveis de injúrias, redução de biomassa, espécies bioindicadoras, herbicida.

Abstract: Background: The selection of bioindicator plants can help in the determination of herbicide residues in the soil.

Objective: To analyze the levels of injuries and biomass reduction in bioindicator plants in the presence of S-metolachlor residue in the soil.

Methods: Four potential bioindicator species were evaluated: cucumber (*Cucumis sativus*), radish (*Raphanus sativus*), sorghum (*Sorghum bicolor*) and zucchini (*Cucurbita pepo*), in six doses of S-metolachlor (0, 180.5, 360, 720, 1440, and 2880 g ha⁻¹). The plants were evaluated, 21 days after emergence (DAE), regarding the levels of injury and percentage of shoot dry matter biomass in relation to the control treatment, without herbicide application.

Results: *C. sativus* behaved as an extremely sensitive species, with a 100% reduction in dry matter from recommended half dose (1440 g ha⁻¹) of herbicide, and it was the only species that had >80% control compared to other bioindicator plants. *S. bicolor* was the species that presented the lowest dose value to reduce its growth, needing only 5% of the recommended dose to reduce its growth by 80% and reaching 50% of control with a dose of approximately 14% of recommended dose. The species *R. sativus* and *C. pepo*, do not present potential as bioindicator plants due to the high tolerance to herbicide.

Conclusions: *C. sativus* and *S. bicolor* showed higher potential for use as bioindicator plants in behavioral studies in soil contaminated with bioavailable residue of S-metolachlor and/or for producers to perform rapid tests with bioassays analyzing the carryover of this herbicide in the soil.

Keywords: injuries levels, biomass reduction, bioindicator species, herbicide.

Journal Information:

ISSN: 2763-8332

Website: <https://www.weedcontroljournal.org/>

Jornal da Sociedade Brasileira da Ciência das Plantas Daninhas

Como citar: Rodrigues MD, Mendes KF, Furtado IF, Souza WM. Detecção de resíduo biodisponível de S-metolachlor no solo pelo método de bioensaio. Weed Control J. 2021;20:e202100723.

<https://doi.org/10.7824/wcj.2021;20:00723>

Aprovado por:

Editor-Chefe: Daniel Valadão Silva

Editor Associado: Paulo da Silva

Conflitos de interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesses em relação à publicação deste manuscrito.

Recebido: Junho 05, 2020

Aprovado: Agosto 20, 2021

* Corresponding author:

<kfmendes@ufv.br>



Este é um artigo de acesso aberto distribuído sob os termos da Licença de Atribuição Creative Commons, que permite o uso irrestrito, distribuição e reprodução em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Copyright: 2021

1. Introdução

A aplicação de herbicidas em pré-emergência é bastante eficiente no controle de fluxos germinativos de sementes/propágulos de plantas daninhas nas culturas, na camada agricultável do solo. No entanto, apesar dos benefícios do uso de herbicidas aplicados em pré-emergência, é necessário que se conheça a dinâmica desses produtos no solo, mais precisamente seu efeito residual (*carryover*) e suas principais formas de degradação e sorção no solo para que se evite a injúria de culturas plantadas posteriormente na área, causando perdas de produtividade, prejuízos econômicos e contaminação ambiental (Mendes et al., 2019).

Para entender a dinâmica do herbicida no solo, é necessário que se conheça sua biodisponibilidade que é o tempo em que o produto permanece ativo no solo (Curran, 2001) sem a degradação de sua molécula e consequentemente com suas características físico-químicas ativas no ambiente, podendo intoxicar culturas posteriores cultivadas na área. A biodisponibilidade pode ser determinada encontrando o tempo de meia-vida de um herbicida, que é definido RL₅₀ (Residue Lifetime), como o tempo necessário para que ocorra a dissipação de 50% da quantidade inicial do herbicida aplicado, nível de resíduo (Lewis e Tzilivakis, 2017). O RL₅₀ varia de acordo com o tipo de solo, pH do solo, condições climáticas e sistemas de cultivo (Mendes et al., 2017) e para padronizar os estudos com bioensaio usando espécies vegetais e obter-se um valor experimental médio que não oscile muito, convencionou-se um valor experimental médio aritmético da taxa de dissipação do herbicida na planta expresso em meia-vida e baseado no RL₅₀, denominado DT₅₀ (*Degradation Time*, tempo de meia-vida em que 50% da quantidade de herbicida aplicada inicialmente no solo é degradada).

Dentre os herbicidas aplicados em pré-emergência, o S-metolachlor (2-chloro-N-(2-ethyl-6-methylphenyl)-N-((1S)-2-methoxy-1-methylethyl)acetamide) é recomendado nas culturas de soja, milho e algumas variedades de

feijão para o controle de plantas daninhas monocotiledôneas e dicotiledôneas (Soltani et al., 2008), como capim-colchão, capim-colonião, trapoeraba e fedegoso.

Para avaliar o efeito residual (*carryover*) de herbicidas no solo, podem ser usados diferentes métodos. As técnicas cromatográficas e radiometria são muito utilizadas pela sua eficiência na obtenção dos resultados quantitativos (Mendes et al., 2017; Mendes, 2021). Porém, demandam um maior investimento na obtenção dos equipamentos necessários, sendo inviável em estudos com um orçamento reduzido. Assim, a utilização de bioensaios é largamente utilizada na detecção de herbicidas no solo, devido à facilidade de condução e menor custo requerido, mostrando que a técnica de bioensaio com plantas é capaz de fornecer respostas eficientes simulando condições próximas da verificada em campo, em que as espécies bioindicadoras apresentam sintomas de injúrias relacionados aos níveis de herbicida presentes na solução do solo. Contudo, necessita da obtenção de curvas de calibração (dose-resposta) para a determinação da biodisponibilidade do herbicida (Marchesan, 2011). Por meio das curvas de dose-resposta, determinam-se os valores de C_{50} (Control, dose do herbicida necessária para controlar 50% da população) e de GR_{50} (Growth Reduction, dose do herbicida responsável pela redução de 50% da biomassa da planta) (Carvalho et al., 2005). Para realizar as curvas de dose-resposta e encontrar os valores referentes a C_{50} e a GR_{50} é necessário a aplicação de diferentes doses do herbicida para analisar os diferentes níveis de injúrias e reduções na biomassa da matéria seca em cada espécie estudada. Dessa forma, é possível investigar qual planta possui o melhor desempenho para detectar os resíduos biodisponíveis (não sorvidos ou ligados) herbicida no solo.

As espécies que possuem potencial para serem detectoras de herbicida no solo são chamadas de bioindicadoras e devem ser sensíveis à presença do herbicida e ao mesmo tempo apresentarem suficiente tolerância para que se desenvolvam, mostrando os sintomas e efeitos potenciais do herbicida (Marchesan, 2011). Além disso,

devem possuir alta taxa de crescimento, pois permitirá rápida visualização dos sintomas ocorridos (Nunes e Vidal, 2009). As espécies, abobrinha (*Cucurbita pepo*), pepino (*Cucumis sativus*) e rabanete (*Raphanus sativus*) foram previamente testadas como potenciais bioindicadoras para o S-metolachlor nos solos em um estudo realizado por Nunes e Vidal (2009), demonstrando grande variabilidade nos resultados. O sorgo (*Sorghum bicolor*) também é sensível ao S-metolachlor, como citado por Silva et al (2014) que realizou um estudo utilizando protetor (*safener*) na aplicação de S-metolachlor em plantas daninhas na cultura do sorgo, podendo então ser utilizado como uma planta bioindicadora.

Diante da necessidade da realização de estudos referentes a mensuração do efeito residual de diferentes herbicidas, a determinação de espécies bioindicadoras que melhor representem a presença e o comportamento de determinado ingrediente ativo no solo, viabiliza o estudo da dinâmica do herbicida pela técnica de bioensaio. Assim, o objetivo desse estudo foi analisar os níveis de injúrias e redução de biomassa em plantas bioindicadoras na presença de resíduo de S-metolachlor em solo argiloso, para que se obtenha uma espécie que melhor represente a biodisponibilidade desse herbicida na solução do solo.

2. Material e Métodos

O estudo foi realizado em casa de vegetação, no período entre março e abril de 2020. O solo de textura argilosa utilizado foi coletado em uma área em pousio (Viçosa, MG) e as características físico-química estão presentes na Tabela 1. As amostras de solo coletadas foram peneiradas em uma peneira de 4 mm para a separação de torrões e resíduos vegetais e colocadas em recipientes de plástico de 300 cm³, em que foram semeadas 4 sementes de cada espécie por vaso a uma profundidade de 1-2 cm, sem a necessidade de adubação.

Tabela 1. Características físico-químicas do solo usado neste estudo.

pH	P	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+ Al	SB	(t)	(T)	V	m	MO	Prem
H ₂ O	mg/dm³		cmol _c /dm³							%		dag/kg	mg/L
5,4	12	116	1,8	0,65	0,2	4,29	2,8	3	7	39	7	1,88	23,49
Argila						Silte				Areia			
%													
54						10				36			

Al³⁺: acidez trocável; H+Al: acidez potencial; SB: soma de bases; V%: saturação por bases; t: CTC efetiva; T: CTC a pH 7,0; m%: saturação por alumínio; MO: matéria orgânica. Fonte: Laboratório de Análise de Solos Viçosa LTDA, Viçosa, MG.

Os tratamentos foram constituídos por seis doses do herbicida S-metolachlor (Dual Gold, EC, 960 g/L i.a., Syngenta), 0 (controle); 180,5; 360; 720; 1440 e 2880 g ha⁻¹ (a dose máxima utilizada é recomendada para a cultura da cana-

de-açúcar conforme o fabricante) e por quatro espécies, *Cucumis sativus*, *Raphanus sativus*, *Cucurbita pepo* e *Sorghum bicolor*, consideradas sensíveis ao herbicida conforme Nunes e Vidal (2009) e Silva et al. (2014). Utilizou-se o delineamento

inteiramente casualizado com quatro repetições.

Após a semeadura, os vasos foram irrigados mantendo a umidade próxima a capacidade de campo e após 12 horas procedeu-se a aplicação do herbicida. Ao longo do estudo, a irrigação foi realizada sempre que necessária com o objetivo de manter a umidade necessária ao desenvolvimento das plantas. A aplicação do herbicida foi realizada com um pulverizador costal pressurizado com CO₂ com duas pontas tipo leque TT11002 a uma pressão de 2,0 kgf cm⁻², 54% de umidade relativa do ar, 22,6°C de temperatura, velocidade do vento de 5,5 km h⁻¹ e com um volume de calda correspondente a 160 L ha.

As avaliações das plantas foram realizadas após 21 dias decorridos da semeadura e executada a partir da observação do nível de injúria das espécies utilizando como base a escala visual recomendada pela Sociedade Brasileira da Ciência de Plantas Daninhas (SBCPD, 1995), em que 0% representa ausência de sintomatologia e 100% equivale a morte das plantas. As plantas foram secas em estufa com circulação de ar forçado a 65°C, durante um período de 72 h até a obtenção da massa constante e pesadas em balança de precisão para se estabelecer uma relação da matéria seca entre o tratamento controle e o com resíduo do herbicida.

Por meio dos dados obtidos no experimento foram criadas curvas de dose-resposta que foram ajustadas ao modelo de regressão não linear do tipo log-logístico realizadas no software SigmaPlot® (versão 11.0 para Windows, Systat Software Inc., Point Richmond, CA, EUA). Para avaliar o nível de injúria, ajustou-se a variável segundo o modelo proposto por Streibig et al. (1988), conforme a Equação 1:

$$\gamma = \frac{a}{\left[1 + \left(\frac{x}{b}\right)^c\right]} \quad (1)$$

Em que γ = porcentagem de controle; x = dose do herbicida e a , b e c = parâmetros da curva de tal forma que a = distância entre as duas assíntotas, b = ponto de inflexão da curva, que corresponde à 50% da resposta da variável e c = declividade da curva.

Para a variável matéria seca foi adotado o modelo proposto por Seefeldt et al. (1995), conforme a Equação 2:

$$\gamma = a + \frac{b}{\left[1 + \left(\frac{x}{c}\right)^d\right]} \quad (2)$$

Em que, γ = porcentagem de controle; x = dose do herbicida em g ha⁻¹ e a , b , c e d são parâmetros da curva, de forma que a = limite inferior da curva, b = a diferença entre o ponto máximo e o mínimo da curva, c é a dose que proporciona 50% de resposta da variável dependente e d é a declividade da curva.

Para corrigir eventuais distorções do modelo matemático log-logístico, foram realizados cálculos matemáticos para normalizar a curva de dose-resposta, segundo o modelo proposto por Carvalho et al. (2005), em

que é realizada a inversão do modelo log-logístico, deixando-o em função de γ . Dessa forma, foi encontrada a dose do herbicida que proporciona 50% de controle e redução de crescimento e como complemento ao estudo, encontrou-se a dose correspondente a 80% de controle e redução de crescimento, que é o mínimo de controle considerado satisfatório. Por meio da Equação 3, determinou-se a C_{50} e C_{80} por meio da Equação 4 determinou-se a GR_{50} e GR_{80} , substituindo o γ por 50 e 80, respectivamente.

$$x = b * \sqrt[c]{\frac{a}{\gamma} - 1} \quad (3)$$

$$x = c * \sqrt[d]{\frac{b}{\gamma - a} - 1} \quad (4)$$

3. Resultados e Discussão

Após os dados da variável controle (nível de injúria) das potenciais espécies bioindicadoras de resíduos biodisponíveis de S-metolachlor no solo, serem submetidos e ajustados ao modelo de regressão não linear log-logístico, foram obtidas as curvas de dose-resposta de cada espécie estudada, conforme apresentado na Figura 1.

As espécies *C. sativus* e *S. bicolor* mostraram-se mais sensíveis aos efeitos fitotóxicos do S-metolachlor. A espécie *C. sativus* demonstrou elevada sensibilidade a esse herbicida, sendo a única espécie a apresentar controle acima de 80%, enquanto a espécie *S. bicolor* não atingiu 80% de controle em nenhuma dose aplicada, porém, manteve os valores de sensibilidade estáveis e maiores que 60% a partir de 25% da dose recomendada (720 g ha⁻¹). Da mesma forma, quando utilizadas as mesmas doses, maior tolerância ao herbicida foi verificada nas espécies *R. sativus* e *C. pepo*, não ultrapassando 60% de controle (Figura 1). A espécie *R. sativus* foi a única espécie que precisou de uma dose maior do que a recomendada do S-metolachlor para atingir 50% de controle (Figura 1).

Os dados de redução de matéria seca (crescimento) das potenciais espécies bioindicadoras de resíduos biodisponíveis de S-metolachlor no solo também foram submetidos e ajustados ao modelo de regressão não linear log-logístico, e assim foram obtidas as curvas de dose-resposta de cada espécie estudada, conforme apresentado na Figura 2.

A espécie *C. sativus* apresentou a maior redução de matéria seca em relação as demais espécies, atingindo a morte total das plantas a partir da metade da dose recomendada (1440 g ha⁻¹) do herbicida. Assim como o *C. sativus*, o *S. bicolor* também apresentou grande redução de matéria seca, sendo observado o menor valor de dose do herbicida para reduzir pela metade a sua matéria seca. Em plantas de *R. sativus*, foi observada uma redução progressiva da matéria seca com o aumento da dose de S-metolachlor, atingindo valores menores que 20% de redução da sua matéria seca na maior dose aplicada do herbicida. Para a mesma variável, a

espécie *C. pepo* demonstrou maior tolerância aos resíduos biodisponíveis de do S-metolachlor, sendo necessária uma dose maior que a recomendada (2880 g ha⁻¹) para a redução

de 50% da matéria seca (Figura 2). Portanto, o S-metolachlor pode ser uma nova alternativa aos herbicidas residuais já registrados para a *C. pepo* (Besançon et al., 2020).

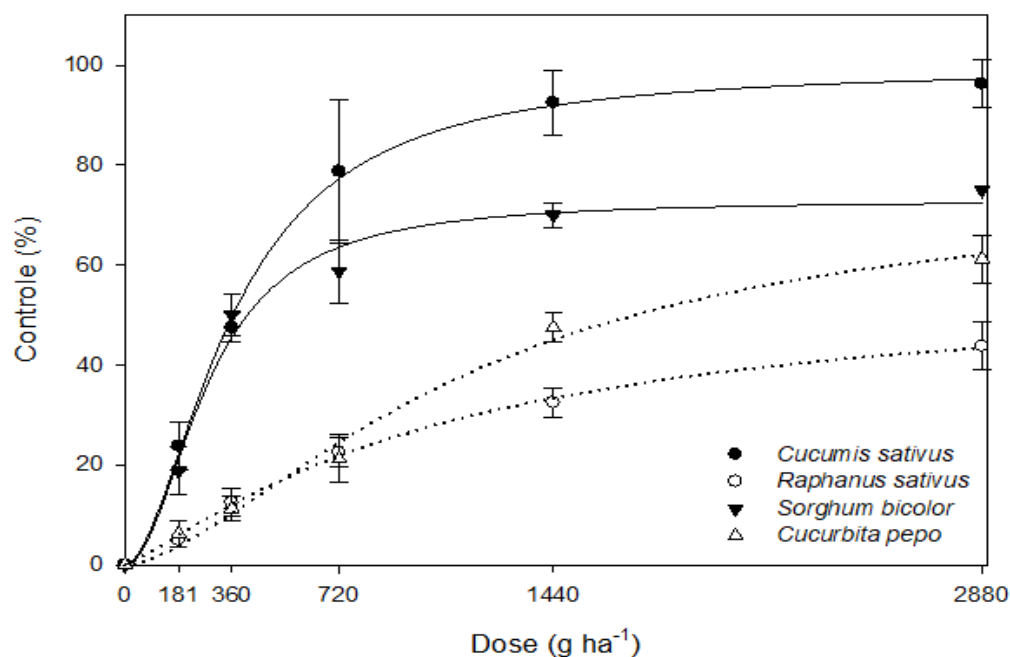


Figura 1. Controle (%) das espécies *Cucumis sativus*, *Raphanus sativus*, *Sorghum bicolor* e *Cucurbita pepo* com aplicação de S-metolachlor (0; 180,5; 360; 720; 1440 e 2880 g ha⁻¹). As barras verticais em cada símbolo representam o desvio padrão da média ($n = 4$).

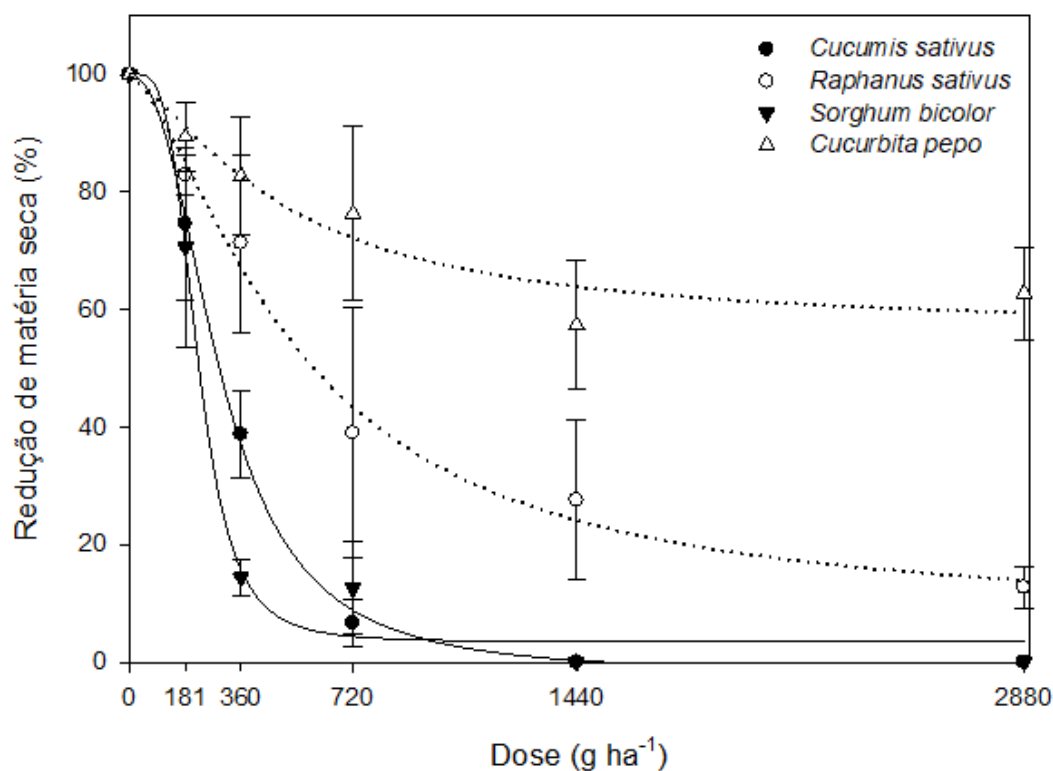


Figura 2. Redução da matéria seca (%) das espécies *Cucumis sativus*, *Raphanus sativus*, *Sorghum bicolor* e *Cucurbita pepo* com aplicação de S-metolachlor (0; 180,5; 360; 720; 1440 e 2880 g ha⁻¹). As barras verticais em cada símbolo representam o desvio padrão da média ($n = 4$).

A partir dos valores dos parâmetros da curva de dose-resposta com aplicação de S-metolachlor foram obtidas a C_{50} e GR_{50} de cada espécie estudada, para o controle e redução de matéria seca, respectivamente (Tabela 2). As médias observadas para ambas as variáveis foram bem ajustadas pelas médias estimadas (curvas), com elevado coeficiente de

determinação ($R^2 > 0,94$) e p -valor significativo. Como forma de complementar o estudo, realizou-se o cálculo da dose do herbicida, que proporcionaria 80% de controle e de redução da biomassa das espécies estudadas, C_{80} e GR_{80} , visto que 80% pode ser considerado o mínimo de controle de plantas daninhas segundo a SBCPD (1995).

Tabela 2. Estimativa dos parâmetros a, b, c e d, coeficiente de determinação (R^2) e valores de C_{50} , GR_{50} , C_{80} e GR_{80} para as espécies *Cucumis sativus*, *Raphanus sativus*, *Sorghum bicolor* e *Cucurbita pepo* no controle e redução de crescimento (matéria seca) com aplicação de S-metolachlor (0; 180,5; 360; 720; 1440 e 2880 g ha⁻¹).

Espécie	Parâmetros de controle							
	a	b	c	d	C_{50}	C_{80}	R^2	p -valor
<i>Cucumis sativus</i>	99,4914	360,5909	-1,8038	-	362,64	788,84	0,9986	<0,0001
<i>Raphanus sativus</i>	56,1541	1048,9201	-1,2135	-	>2880	>2880	0,9982	<0,0001
<i>Sorghum bicolor</i>	73,0269	280,5226	-2,0246	-	411,42	>2880	0,9873	0,0014
<i>Cucurbita pepo</i>	76,2668	1147,5428	-1,6052	-	1713,67	>2880	0,9917	0,0008
Espécie	Parâmetros de redução de matéria seca							
	a	b	c	d	GR_{50}	GR_{80}	R^2	p -valor
<i>Cucumis sativus</i>	-1,9061	101,4792	295,5537	2,3932	289,92	162,508	0,9987	0,0019
<i>Raphanus sativus</i>	7,4033	92,1974	538,7301	1,5310	595,04	229,06	0,9908	0,0138
<i>Sorghum bicolor</i>	3,5228	96,6130	221,0153	3,9723	225,27	157,95	0,9893	0,0159
<i>Cucurbita pepo</i>	56,3886	42,9013	492,8496	1,4394	>2880	428,27	0,9425	0,0850

A espécie *C. sativus* mostrou-se muito sensível ao S-metolachlor, como já reportado nas Figuras 1 e 2, apresentando sintomas de redução e distorção no crescimento. O *C. sativus* foi muito sensível ao S-metolachlor com retardo de crescimento persistindo até 7 semanas após o plantio, e perda de produção em resposta à aplicação do herbicida na dose de 1400 g ha⁻¹ (Besançon et al., 2020). Em folhas largas afetadas por resíduos de herbicidas do grupo das cloroacetamidas, como o S-metolachlor, a emergência é mais lenta e as folhas podem ficar enrugadas ou em forma de concha (Figura 3) devido à inibição da divisão e alongação celular promovida. Esses sintomas podem ser vistos logo após a emergência já que a maior parte da absorção desse herbicida se dá por meio do coleóptilo.

Em plantas de *C. sativus*, para atingir cerca de 50% de controle foi necessária apenas 12% da dose recomendada de S-metolachlor (2880 g ha⁻¹), ou seja 362,64 g ha⁻¹ e com a utilização de 27% (788 g ha⁻¹) da dose recomendada do ingrediente ativo, observou-se controle acima de 80%. Os valores percentuais alcançados referentes a cada dose foram representados na Figura 1. Em uma análise de redução de matéria seca, o *C. sativus* atingiu uma redução de 80% de seu crescimento com apenas 6% (162 g ha⁻¹) da dose recomendada de 2880 g ha⁻¹ e foi necessária uma dose aproximada de 290 g ha⁻¹ de S-metolachlor ou 10% da dose recomendada para a redução pela metade da matéria seca das plantas emergidas (Tabela 2).

Os resultados evidenciam que o *C. sativus* pode ser utilizado como planta bioindicadora da presença de resíduo de S-metolachlor biodisponível no solo. Esse resultado corrobora com o estudo realizado por Silva Júnior et al. (2015), que utilizaram o *C. sativus* como uma espécie bioindicadora de S-metolachlor em solos argilosos para determinar a lixiviação do herbicida, devido a espécie apresentar um bom potencial de detecção do produto em profundidade do perfil do solo. Os valores de redução de massa seca equivalentes a cada dose estudada foram representados na Figura 2. As espécies indicadas como potenciais bioindicadoras, detectam apenas resíduos biodisponíveis do herbicida na solução do solo não sendo possível detectar os resíduos ligados ou sorvidos, pois estão inativos e não biodisponíveis na solução do solo. O S-metolachlor é considerado um composto não iônico (neutro), e permanece em sua forma molecular na solução do solo, não sofrendo influência do pH do solo (Westra et al., 2020) e possui baixa capacidade de sorção (Weber, 2018) no qual correlaciona-se positivamente com o conteúdo de ácidos húmicos, matéria orgânica e argilas (Bedmar et al., 2011; Alletto et al., 2013; Gannon et al., 2013).

As plantas de *S. bicolor* também se mostraram bastante sensíveis ao S-metolachlor, como já reportado nas Figuras 1 e 2, e o efeito fitotóxico do herbicida foi observado após a germinação das plântulas. Em gramíneas, as folhas podem não emergir do coleóptilo e quando emergem, elas

geralmente não se desenrolam completamente, prendendo a ponta da próxima folha em desenvolvimento e fazendo-a formar um laço, como é o caso do *S. bicolor* sensível ao S-metolachlor (Machado et al., 2016; Pimentel et al., 2019).

Essa sintomatologia é típica de herbicidas do grupo das cloroacetamidas, e esse enrolamento pode ser explicado pelo maior crescimento do limbo foliar em relação a nervura central (Karam et al., 2004), de acordo com a Figura 3.

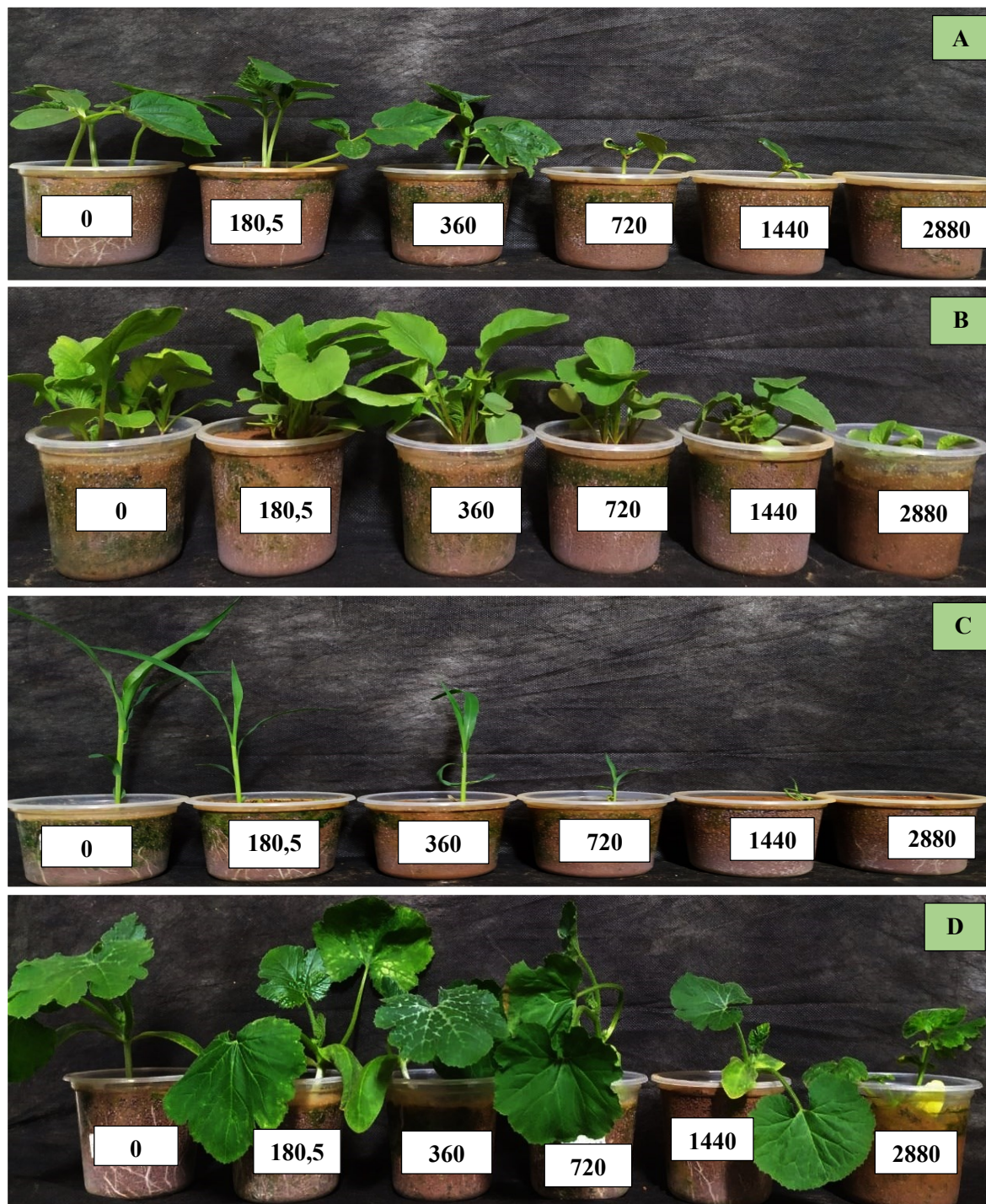


Figura 3. Nível de injúria visual das espécies *Cucumis sativus* (A), *Raphanus sativus* (B), *Sorghum bicolor* (C) e *Cucurbita pepo* (D) com aplicação de S-metolachlor (0; 180,5; 360; 720; 1440 e 2880 g ha⁻¹).

Assim como a espécie *C. sativus*, o *S. bicolor* também apresentou alta sensibilidade ao herbicida, atingindo 50% de controle com uma dose aproximada de 400 g ha⁻¹ ou 14% da dose recomendada do herbicida. No entanto, para um

controle de 80% seria necessária uma dose maior do que a recomendada. Na variável matéria seca, o *S. bicolor* foi a espécie que apresentou o menor valor de dose para redução da sua matéria seca, precisando de apenas 5% (157,95 g ha⁻¹)

e 8% (225,27 g ha⁻¹) da dose recomendada do herbicida para reduzir em 80% e 50% da sua matéria seca, respectivamente (Tabela 2). Com esse resultado, a detecção de resíduo de S-metolachlor em solo contaminado torna-se possível com o *S. bicolor*. Esse resultado vai ao encontro do encontrado por Procópio et al. (2001) que analisou a lixiviação de S-metolachlor em solo arenoso, observando sintomas de intoxicação nas plantas de *S. bicolor* em todas as profundidades avaliadas.

A espécie *R. sativus* apresentou alta tolerância ao S-metolachlor, necessitando de uma dose superior a 2880 g ha⁻¹ para a obtenção de 50% e 80% de controle (C₅₀ e C₈₀, respectivamente) (Tabela 2). Para a redução pela metade da sua matéria seca, foi necessária uma dose de 595 g ha⁻¹, quase 3 vezes superior à dose necessária para reduzir 50% do *S. bicolor* e para redução de 80% da matéria seca, o *R. sativus* precisou de uma dose equivalente a 8% (229,06 g ha⁻¹) da dose recomendada. Esses resultados dificultam a seleção do *R. sativus* como espécie bioindicadora. Segundo o estudo de Nunes e Vidal (2009), a espécie *R. sativus* var. *sativus*, mesma utilizada neste estudo, não permitiu a quantificação de S-metolachlor no solo, entretanto, a variedade *oleiferus* Metzger demonstrou ser uma potencial bioindicadora. Essa diferença de sensibilidade entre as variedades ao herbicida pode ser explicada por alguns fatores, entretanto, esse caso específico da espécie *R. sativus* var. *sativus* e *oleiferus* Metzger ainda não foi estudado. No entanto, existem algumas hipóteses, como a variabilidade de susceptibilidade entre as variedades, como já foi verificada em híbridos de milho por Wychen et al. (1999); uma outra possibilidade seria a velocidade de emergência entre as variedades, já que Cottingham e Hatzios (1992) afirmaram ter correlação positiva entre a velocidade de emergência de híbridos de milho e a toxicidade ao S-metolachlor, em que quanto mais rápido ocorrer a emergência, menor será a absorção do herbicida.

O mesmo ocorreu com a *C. pepo*, que se mostrou bastante tolerante ao S-metolachlor (Figuras 1 e 2), com sintomas brandos como um leve amarelecimento e redução do crescimento das folhas verdadeiras (Figura 3). Como observado na Tabela 2, essa espécie precisa de uma dose acima da dose recomendada para o controle de 80% das plantas. No entanto, para controlar 50% das plantas foi necessária uma dose de 1713 g ha⁻¹. Para reduzir 80% da sua matéria seca, a *C. pepo* necessitou de 428 g ha⁻¹ ou aproximadamente 15% da dose recomendada, isso equivale a quase 3 vezes mais do que a dose necessária para reduzir 80% do crescimento do *S. bicolor*, sensível ao herbicida, conforme já reportado. Com base nesses resultados, não é possível a visualização dos sintomas do herbicida, assim como visto na Figura 3 e corroborado pela Tabela 2, tornando difícil a seleção da *C. pepo*, como espécie bioindicadora de resíduo biodisponível de S-metolachlor no solo. Esse resultado

também está de acordo com o estudo realizado por Nunes e Vidal (2009), em que o S-metolachlor não causou efeito em plântulas de *C. pepo*. No entanto, a *C. pepo* é uma espécie com potencial bioindicadora da presença do metribuzin (herbicida inibidor do fotossistema II, grupo químico das triazinonas), além de ser utilizada também em bioensaio baseado no desenvolvimento radicular e de plântulas realizado para verificar a atividade diferencial de compostos isolados de *Secale cereale* (centeio).

Na Figura 3 estão os dados qualitativos com sintomas do S-metolachlor em diferentes doses nas quatro potenciais espécies bioindicadoras analisadas, porém, os dados quantitativos já foram relatados nas Figuras 1 e 2, juntamente com a Tabela 2. Assim, os dados qualitativos (nível de injúria visual) estão de acordo com os dados quantitativos (controle e redução de matéria seca), aumentando a confiabilidade dos resultados destacados neste estudo.

A realização de estudos com bioensaio em solos contaminados é eficiente, rápida e de baixo custo, possibilitando a detecção de resíduos de herbicidas como forma de evitar a perda de produtividade e até mesmo a morte de culturas em rotação e/ou sucessão afetadas pelo efeito residual (*carryover*). Dessa forma, como cada herbicida possui propriedades físico-químicas específicas que podem variar quanto às propriedades físico-químicas do solo, e condições ambientais, é necessário avaliar o comportamento de cada herbicida em cada situação específica. Para viabilizar esses estudos, é necessário avaliar e selecionar a melhor espécie bioindicadora que represente a sintomatologia e a ação desses herbicidas sob as diversas condições submetidas. Além disso, a seleção de plantas bioindicadoras por meio de estudos de sensibilidade é a primeira prática requerida para que estudos posteriores de lixiviação, sorção, efeito residual (*carryover*) e volatilização possam ser efetivados com sucesso pelos pesquisadores.

4. Conclusão

Por meio da técnica de bioensaio é possível realizar a detecção do S-metolachlor de forma rápida e prática. Neste estudo, as espécies *Cucumis sativus* e *Sorghum bicolor* apresentaram alta sensibilidade à presença de resíduo biodisponível do S-metolachlor aplicado em pré-emergência no solo, sendo possível utilizar essas duas espécies como bioindicadoras em estudos comportamentais do herbicida no solo. As espécies *Raphanus sativus* e *Cucurbita pepo* apresentaram tolerância ao herbicida, não sendo possível visualizar os sintomas típicos nas plantas, o que torna essas espécies inviáveis para a detecção de S-metolachlor no solo.

Referências

Alletto L, Benoit P, Bolognesi B, Couffignal M, Bergheaud V, Dumény V, et al. Sorption and mineralisation of S-metolachlor in soils from fields cultivated with different conservation tillage systems. *Soil Tillage Res.* 2013;128:97-103. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.11.005>

Bedmar F, Daniel PE, Costa JL, Giménez D. Sorption of acetochlor, S-metolachlor, and atrazine in surface and subsurface soil horizons of Argentina. *Environ. Toxicol. Chem.* 2011;30(9):1990-1996. Available from: <https://doi.org/10.1002/etc.602>

- Besançon TE, Wasacz MH, Carr BL. Weed control and crop tolerance with S-metolachlor in seeded summer squash and cucumber. *Weed Technol.* 2020;34(6):849–856. Available from: <https://doi.org/10.1017/wet.2020.72>
- Carvalho SJP, Lombardi BP, Nicolai M, López-Ovejero RF, Christoffoleti PJ, Medeiros D. Curvas de dose-resposta para avaliação do controle de fluxos de emergência de plantas daninhas pelo herbicida imazapic. *Planta Daninha* 2005;23(3):535–542. Portuguese. Available from: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582005000300018>
- Cottingham CK, Hatzios KK. Basis of differential tolerance of two corn hybrids (*Zea mays*) to metolachlor. *Weed Sci.* 1992;40(3):359–363. Available from: <https://doi.org/10.1017/S0043174500051742>
- Curran WS. Persistence of herbicides in soil. *Agronomy Facts* 36. Published by Penn State College of Agricultural Sciences research and extension programs, 2001. 4 p.
- Gannon TW, Hixson AC, Weber JB, Shi W, Yeverton FH, Rufty TW. Sorption of simazine and S-metolachlor to soils from a chronosequence of turfgrass systems. *Weed Sci.* 2013;61(3):508–514. Available from: <https://doi.org/10.1614/WS-D-12-00173.1>
- Karam D, Lara FR, Cruz MB, Filho IA, Pereira FT. Características do Herbicida S-metolachlor nas Culturas de Milho e Sorgo. Sete Lagoas, MG: EMBRAPA Milho e Sorgo, 2004.
- Lewis K, Tzilivakis J. Development of a data set of pesticide dissipation rates in/on various plant matrices for the Pesticide Properties Database (PPDB). *Data* 2017;2(3):e28. Available from: <https://doi.org/10.3390/data2030028>
- Machado FG, Jakelaitis A, Gheno EA, Oliveira Jr RS, Rios FA, Franchini LHM, et al. Performance de herbicidas para o controle de plantas daninhas no sorgo. *Rev. Brasil. Herbicidas* 2016;15(3):281–289. Portuguese. Available from:
- Marchesan, E. D. Seleção de espécies bioindicadoras para uso em bioensaios de lixiviação e persistência de atrazina no solo. *Pesticidas: Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente*, v. 21, p. 47–54, 2011. Portuguese. Available from: <https://doi.org/10.7824/rbh.v15i3.476>
- Mendes KF, Martins BAB, Reis FC, Dias ACR, Tornisiolo VL. Methodologies to study the behavior of herbicides on plants and the soil using radioisotopes. *Planta Daninha* 2017;35:e017154232. Available from: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582017350100049>
- Mendes KF. Radioisotopes in Weed Research. 1st ed. Boca Raton: CRC Press, 2021. 224 p.
- Mendes KF, Sousa RN, Dias RC, Reis MR. Efeito Residual de Herbicidas em Solos Agrícolas. In: Tornisiolo VL, Vilca FZ, Guimarães ACD, Mendes KF. (Org.). *Contaminantes Orgânicos: da Análise à Biorremediação*. 1. ed. Piracicaba: FEALQ, 2019. p. 157–182.
- Nunes AL, Vidal RA. Seleção de plantas quantificadoras de herbicidas residuais. *Pesticidas Rev. Ecotoxicol. Meio Ambiente* 2009;19:19–28. Portuguese. Available from: <http://dx.doi.org/10.5380/pes.v19i0.16550>
- Pimentel GV, Guimarães DF, Moreira SG, Ávila MOT, Martins IA, Bruzi AT. Selectivity and effectiveness of herbicides in the grain sorghum crop. *Planta Daninha* 2019;37:e019187771. Available from: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582019370100069>
- Procópio SO, Silva AA, Santos JB, Ferreira LR, Miranda GV, Siqueira JG. Efeito da irrigação inicial na profundidade de lixiviação do herbicida S-metolachlor em diferentes tipos de solo. *Planta Daninha* 2001;19(3):409–417. Portuguese. Available from: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582001000300014>
- Seefeldt SS, Jensen SE, Fuerst EP. Loglogistic analysis of herbicide dose-response relationship. *Weed Technol.* 1995;9(1):218–227. Available from: <https://doi.org/10.1017/S0890037X00023253>
- Silva Júnior AC, Pereira MR, Martins D. Evaluating percolation of the herbicide S-metolachlor with bioindicator plants. *Amazonian J. Agric. Environ. Sci.* 2015;58(1):36–44. Available from: <http://dx.doi.org/10.4322/rca.1719>
- Silva JRV, Martins CC, Silva Júnior AC, Martins D. Fluxofenim used as a safener on sorghum seed for S-metolachlor herbicide. *Repositório Produção Científica* 2014;30(3):158–167.
- Sociedade Brasileira Da Ciência Das Plantas Daninhas - SBCPD. Procedimentos para instalação avaliação e análise de experimentos com herbicidas. Londrina - PR: SBCPD, 1995. 42 p.
- Soltani N, Nurse R, Robinson D, Sikkema P. Response of pinto and small red Mexican bean to postemergence herbicides. *Weed Technol.* 2008;22(1):195–199. Available from: <https://doi.org/10.1614/WT-07-091.1>
- Streibig JC. Herbicide bioassay. *Weed Res.* 1988;28(6):479–484. Available from: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1988.tb00831.x>
- Weber JB. Properties and Behavior of Pesticides in Soil. In: Honeycutt R. Mechanisms of Pesticide Movement Into Ground Water. Chapter 2. Boca Raton: CRC Press, p.14–42, 2018.
- Westra EP, Shaner DL, Barbarick KA, Khosla R. Evaluation of sorption coefficients for pyroxasulfone, S-metolachlor, and dimethenamid-*p*. *Air Soil Water Res.* 2020;8(1):9–15, 2020. Available from: <https://doi.org/10.1177/ASWR.S19682>

Wychen LR, Harvey RG, Rabaey TL, Bach DG. Tolerance of sweet corn (*Zea mays*) hybrids to RPA 201772. Weed Technol. 1999;13(2):221-226. Available from: <https://doi.org/10.1017/S0890037X00041646>