

BIORREMEDIAÇÃO DE SOLO CONTAMINADO COM HERBICIDAS INIBIDORES DE FOTOSSISTEMA II (FS II) E PROTOPORFIRINOGÊNIO OXIDASE (PROTOX)

EDUARDA B. GIACOMOLLI^{1,2}, DOUGLAS A. HABOSKI^{1,2}, ALINE D.R. ANJOS^{1,2},
GILSON L. MULLER^{1,2}, LUCAS TEDESCO^{1,2}, OTÁVIO A. DASSOLER^{1,2}, AMANDA
B. REMPEL^{1,2}, LEANDRO GALON^{2,3}

1 Introdução

Entre as técnicas investigadas para a despoluição do solo, a fitorremediação se destaca como uma das mais promissoras (BARROSO et al., 2023). Essa abordagem utiliza plantas para a remoção de herbicidas do solo (SILVA et al., 2020). A seleção das espécies para fitorremediação é a etapa inicial do processo e deve ser realizada com cuidado, sendo necessário escolher plantas com características que favoreçam a absorção dos poluentes e a descontaminação do solo. Além disso, essas plantas devem apresentar rápido crescimento, fácil adaptação e bom estabelecimento inicial (SILVA et al., 2020). A hipótese do trabalho é de que as espécies, mucuna-preta (*Stizolobium aterrimum*), feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*), crotalária (*Crotalaria juncea*), aveia de verão (*Sorghum sudanense*), brachiaria (*Brachiaria decumbens*) e milho (*Pennisetum glaucum*) apresentam potencial de descontaminar solo poluído com os herbicidas, diuron, sulfentrazone e diuron+sulfentrazone.

2 Objetivos

Avaliar o potencial fitorremediador dos herbicidas diuron, sulfentrazone e diuron+sulfentrazone, efetuada pelas espécies vegetais utilizadas como pastagens, cobertura do solo ou para a produção de grãos.

3 Metodologia

O experimento foi conduzido a campo na área experimental da UFFS, Campus Erechim/RS, no ano agrícola 2022/23. Utilizou-se diferentes espécies de plantas para identificar o potencial de tolerar a aplicação de diuron, sulfentrazone e a mistura comercial de ambos (diuron+sulfentrazone) para posterior emprego como fitorremediadoras de áreas

1 Acadêmica (o) do curso de Agronomia, Universidade Federal da Fronteira Sul, Campus Erechim, contato: giacomolliduda@gmail.com.

2 Grupo de Pesquisa: Manejo Sustentável dos Sistemas Agrícolas (MASSA).

3 Doutor, Universidade Federal da Fronteira Sul, Campus Erechim, **Orientador**.

contaminadas pelos herbicidas. O delineamento experimental foi de blocos casualizados, em esquema bifatorial ($3 \times 7 + 1$), com quatro repetições. O fator A foi composto pelos herbicidas diuron (490 g ha^{-1}), sulfentrazone (245 g ha^{-1}) e diuron+sulfentrazone ($490+245 \text{ g ha}^{-1}$), aplicados em pré-emergência das culturas e o B pelas espécies; mucuna-preta, feijão-deporco, crotalária, aveia de verão, brachiaria e milheto e a mistura de todas essas espécies. Adicionalmente foi utilizado um tratamento com aplicação dos herbicidas sem a semeadura de qualquer espécie vegetal com potencial fitorremediador.

A semeadura das espécies foi realizada com semeadora/adubadora em parcelas de $3 \times 6 \text{ m}$ (18 m^2), um dia antes da aplicação dos herbicidas. Os herbicidas foram aplicados utilizando-se um pulverizador costal de precisão, pressurizado a CO_2 , com quatro pontas do tipo leque DG 110.02, com vazão de 150 L ha^{-1} . Aos 14 e 28 dias após a emergência (DAE) realizou-se avaliações de fitotoxicidade dos herbicidas sobre as espécies. Para isso foram atribuídas notas percentuais de zero (0%) a cem (100%), onde zero corresponde a ausência de fitotoxicidade e cem a morte das plantas.

Para a segunda etapa do experimento a área foi dessecada com glyphosate+saflufenacil ($1440+70 \text{ g ha}^{-1}$) + óleo mineral (0,5% v/v), 10 dias antes da semeadura do sorgo, cultura bioindicadora de possível resíduo de herbicida no solo. Adubou-se no sulco de semeadura à quantidade de 375 kg ha^{-1} da fórmula 04-24-12 de N-P-K, de acordo com a análise química e recomendações técnicas para a cultura. Foram semeadas 6 linhas de sorgo, cultivar ACA 717 BMR, espaçadas a 0,50 m, na densidade de 17,5 sementes m^{-1} . Aos 52 dias após a semeadura (DAS) do sorgo foram aferidas as variáveis fisiológicas, taxa fotossintética ($A - \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), condutância estomática de vapores de água ($G_s - \text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e a eficiência do uso da água (EUA - $\text{mol CO}_2 \text{ mol H}_2\text{O}^{-1}$). A colheita e determinação da massa seca da parte aérea foi realizada aos 125 DAE, em área de $0,5 \times 0,5 \text{ m}^2$.

Os dados foram submetidos a análise de variância pelo teste F, em sendo significativos, aplicou-se o teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$).

4 Resultados e Discussão

Observou-se que todas as espécies demonstraram seletividade ao se aplicar diuron, pois aos 14 DAE observou-se máximo de 10% de fitotoxicidade e ausência de sintomas do herbicida sobre as plantas aos 28 DAE (Tabela 1). Dos 14 aos 28 DAE ocorreu maior fitotoxicidade à aveia de verão e a mistura das espécies ao se aplicar o sulfentrazone e o diuron+sulfentrazone. A crotalária apresentou a maior seletividade a todos os herbicidas aplicados, já que aos 28 DAE não foi observado fitotoxicidade dos produtos sobre a espécie.

A fitotoxicidade dos herbicidas para as demais espécies ficou em patamares intermediários, ou seja, entre as que demonstraram elevada injúria e a crotalária que não apresentou sintomas de danos dos produtos a partir dos 28 DAE. Ao se comparar os herbicidas, dentro de cada espécie, observou-se que o sulfentrazone e a mistura comercial apresentaram as maiores fitotoxicidades em relação aos demais tratamentos ao serem aplicados sobre o milheto, brachiaria, mucuna, feijão de porco, aveia de verão e a mistura de espécies (Tabela 1). A aplicação de diuron ocasionou baixa fitotoxicidade das espécies, mucuna-preta, nabo, crotalária e tremoço ao serem utilizadas como plantas de cobertura (TEÓFILO et al., 2020).

Tabela 1. Fitotoxicidade (%) das coberturas com potencial fitorremediador aos 14 e 28 dias após emergência (DAE) em função da aplicação de herbicidas. UFFS, Erechim-RS.

Tratamentos	Fitotoxicidade aos 14 DAE				Fitotoxicidade aos 28 DAE			
	Test.	Diuron	Sulfent.	Diu.+sulf.	Test.	Diuron	Sulfent.	Diu.+sulf.
Milheto	0,00 D ^{ns}	5,00 Cb	31,67 Bb	46,67 Aa	0,00 C ^{ns}	0,00 C ^{ns}	21,67 Bb	36,67 Aa
Brachiaria	0,00 D	8,33 Ca	20,78 Bc	25,00 Ac	0,00 C	0,00 C	11,89 Bc	16,67 Ad
Mucuna	0,00 C	10,00 Ba	13,00 Ad	15,00 Ad	0,00 B	0,00 B	5,00 Ad	5,00 Ae
Feijão de porco	0,00 C	7,00 Ba	11,00 Ad	11,67 Ae	0,00 A	0,00 A	2,50 Ad	1,67 Af
Aveia de verão	0,00 D	3,33 Cb	40,00 Aa	35,00 Bb	0,00 C	0,00 C	30,00 Aa	21,67 Bc
Mistura	0,00 D	8,33 Ca	31,67 Bb	35,00 Ab	0,00 C	0,00 C	21,67 Bb	25,00 Ab
Crotalária	0,00 C	5,00 Bb	10,00 Ad	7,00 Bf	0,00 A	0,00 A	0,00 Ae	0,00 Af
Sem cobertura	---	---	---	---	---	---	---	---
CV(%)			16,00				25,95	
Média Geral			13,59				7,12	

¹ Médias seguidas de letras diferentes maiúsculas na linha e minúscula na coluna diferem entre si pelo teste de Scott-Knott, a $p < 0,05$, respectivamente. Ns: não significativo a $p < 0,05$. Test.: Testemunha; Sulfent.: Sulfentrazone; Diu.+sulf.: Diuron + Sulfentrazone.

Ao se analisar as variáveis fisiológicas, observou-se que a Gs, a A e a EUA foram maiores no tratamento sem cobertura e o pior desempenho onde se cultivou anteriormente a esse mucuna (Tabelas 2 e 3). A aplicação de diuron+sulfentrazone ocasionou menor A das plantas de sorgo ao se cultivar anteriormente a esse mucuna. Não houve diferenças entre os tratamentos, testemunha sem herbicidas, diuron, sulfentrazone e diuron+sulfentrazone ao se usar as plantas de milheto, brachiaria e a mistura de espécies para as variáveis fisiológicas Gs, A e EUA do sorgo (Tabelas 2 e 3). Para todas as espécies semeadas anteriormente ao sorgo, não ocorreu diferenças entre a testemunha sem herbicida, o uso de diuron, sulfentrazone e diuron+sulfentrazone para o Gs e EUA das plantas de sorgo. Os herbicidas utilizados atuam no aparato fotossintético das plantas, o diuron agindo na proteína D1 e o sulfentrazone atuando na síntese de clorofila. Esses produtos interferem diretamente na transpiração, podendo reduzir a condutância estomática pelo fechamento dos estômatos por efeitos de fatores bióticos, abióticos ou mesmo herbicidas (TORRES et al., 2012).

Tabela 2. Condutância estomática de vapores de água (Gs) e taxa fotossintética (A) do sorgo

em função da aplicação dos herbicidas e uso de plantas com potencial fitorremediador de solo.

Tratamentos	Gs (mol m ⁻² s ⁻¹)				A (μmol m ⁻² s ⁻¹)			
	Test.	Diuron	Sulfent.	Diu.+sulf.	Test.	Diuron	Sulfent.	Diu.+sulf.
Milheto	0,18 Ab ¹	0,16 Ab	0,18 Ab	0,19 Ab	17,91 Ac	14,54 Bd	19,10 Ab	19,89 Ab
Brachiaria	0,12 Ab	0,14 Ab	0,11 Ab	0,13 Ab	15,36 Ac	16,78 Ac	14,53 Ac	14,39 Ac
Mucuna	0,12 Ab	0,13 Ab	0,10 Ab	0,08 Ab	7,34 Bd	12,21 Ad	7,42 Bd	3,86 Cd
Feijão de porco	0,23 Aa	0,20 Ab	0,26 Aa	0,25 Aa	21,19 Ab	21,22 Ab	24,01 Aa	16,44 Bc
Aveia de verão	0,24 Aa	0,25 Aa	0,17 Ab	0,26 Aa	25,56 Aa	24,02 Ab	12,90 Bc	26,16 Aa
Mistura	0,26 Aa	0,18 Ab	0,20 Ab	0,15 Ab	18,70 Ac	18,43 Ac	18,19 Ab	18,34 Ab
Crotalária	0,12 Ab	0,16 Ab	0,14 Ab	0,12 Ab	16,92 Ac	13,27 Bd	12,57 Bc	16,15 Ac
Sem cobertura	0,28 Aa	0,29 Aa	0,27 Aa	0,31 Aa	22,58 Bb	26,82 Aa	24,39 Ba	27,10 Aa
CV(%)		35,50				12,49		
Média Geral		0,19				17,76		

¹ Médias seguidas de letras diferentes maiúsculas na linha e minúscula na coluna diferem entre si pelo teste de Scott-Knott, a $p < 0,05$, respectivamente. Test.: Testemunha; Sulfent.: Sulfentrazone; Diu.+sulf.: Diuron + Sulfentrazone.

Os resultados demonstram que o tratamento sem cultivo para a testemunha sem herbicidas, milho e brachiaria para diuron, feijão de porco e a mistura de coberturas para sulfentrazone, aveia de verão e crotalária para o diuron+sulfentrazone foram os tratamentos que ocasionaram o maior acúmulo de massa seca da parte aérea do sorgo (Tabela 3). Os demais tratamentos apresentaram resultados inferiores.

Tabela 3. Eficiência do uso da água (EUA) e massa seca do sorgo em função da aplicação dos herbicidas e uso de plantas com potencial fitorremediador de solo. UFFS, Erechim-RS.

Tratamentos	EUA (mol CO ₂ mol H ₂ O ⁻¹)				Massa seca do sorgo (g)			
	Test.	Diuron	Sulfent.	Diu.+sulf.	Test.	Diuron	Sulfent.	Diu.+sulf.
Milheto	7,36 Aa ¹	6,04 Aa	6,84 Aa	7,95 Aa	270,14 B	300,78 Aa	182,86 Ce	292,02 Ab
Brachiaria	4,98 Aa	4,18 Ab	5,13 Aa	3,88 Ab	245,20 B	318,34 Aa	297,40 Ab	252,35 Bc
Mucuna	1,78 Ab	2,47 Ab	1,49 Ac	1,56 Ac	208,64 C	238,12 Bc	289,52 Ab	234,09 Bd
Feijão de porco	5,88 Aa	6,72 Aa	6,26 Aa	4,76 Ab	228,74 B	252,76 Bb	312,94 Aa	229,33 Bd
Aveia de verão	6,32 Aa	5,90 Aa	3,93 Ab	5,88 Aa	229,26 C	264,35 Bb	251,82 Bc	327,44 Aa
Mistura	5,05 Aa	4,65 Ab	4,14 Ab	5,25 Ab	208,58 C	267,62 Bb	319,78 Aa	248,34 Bc
Crotalária	4,49 Aa	3,21 Ab	3,40 Ab	4,87 Ab	287,45 B	220,36 Cc	218,04 Cd	313,19 Aa
Sem cobertura	7,17 Aa	8,03 Aa	7,49 Aa	7,74 Aa	314,88 A	223,74 Cc	267,90 Bc	221,14 Cd
CV(%)		30,65				6,62		
Média Geral		5,15				260,53		

¹ Médias seguidas de letras diferentes maiúsculas na linha e minúscula na coluna diferem entre si pelo teste de Scott-Knott, a $p < 0,05$, respectivamente. Test.: Testemunha; Sulfent.: Sulfentrazone; Diu.+sulf.: Diuron + Sulfentrazone.

Observou-se que o diuron aplicado sobre as coberturas de milho e brachiaria, o sulfentrazone em brachiaria, mucuna, feijão de porco e a mistura de coberturas, e o diuron+sulfentrazone usadas em milho, aveia de verão e crotalária demonstram os maiores acúmulos de massa seca do sorgo (Tabela 3). O uso do tratamento sem cobertura apresentou maior massa seca do sorgo quando não se aplicou nenhum herbicida. Esse fato demonstra que as espécies desempenharam o seu papel de deixar uma menor quantidade de resíduo dos herbicidas no solo e desse modo o sorgo consegue ter maior crescimento e desenvolvimento. Em estudo realizado por SOUZA et al. (2023), observou-se que a crotalária reduziu a

presença do sulfentrazone no solo, além de aumentar a atividade bacteriana e os índices de biodiversidade.

5 Conclusão

O diuron causa menor fitotoxicidade a todas as espécies cultivadas. A crotalária, o feijão de porco e a mucuna demonstram menor fitotoxicidade na presença de diuron, sulfentrazone e diuron+sulfentrazone podendo ser usadas como espécies fitorremediadoras. Os herbicidas provocaram efeitos negativos sobre as variáveis fisiológicas do sorgo (Gs, A e EUA), independentemente da cobertura usada. Os maiores acúmulos de massa seca do sorgo ocorreram com o uso de milho para despoluir diuron e diuron+sulfentrazone, brachiaria para diuron e sulfentrazone, mucuna, feijão de porco e a mistura de espécies para sulfentrazone, aveia de verão e crotalária para diuron+sulfentrazone e o tratamento sem cobertura para a testemunha sem herbicidas.

Referências Bibliográficas

BARROSO, G. M. et al. Phytoremediation: A green and low-cost technology to remediate herbicides in the environment. **Chemosphere**, v. 334, e138943, p.1-11, 2023.

SILVA, C. T. Remedial capacity of diclosulam by cover plants in different edaphoclimatic conditions. **International Journal of Phytoremediation**, v. 23, n. 6, p. 609-618, 2020.

SOUZA, A. J. et al. *Crotalaria juncea* L. enhances the bioremediation of sulfentrazone-contaminated soil and promotes changes in the soil bacterial community. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 54, n. 3, p. 2319-2331, 2023.

TEÓFILO, T. M. S. et al. Phytoextraction of diuron, hexazinone, and sulfometuron-methyl from the soil by green manure species. **Chemosphere**, v. 256, e127059, 2020.

TORRES, L. G. et al. Alterações nas características fisiológicas de cultivares de cana-de-açúcar submetida à aplicação de herbicidas. **Planta Daninha**, v. 30, n. 3, p. 581-587, 2012.

Palavras-chave: Despoluição de solo; Espécies fitorremediadoras; Fitorremediação.

Nº de Registro no sistema Prisma: PES-2023-0250

Financiamento: CNPq/UFFS