



ARTIGO ORIGINAL

João Carlos Madalão<sup>1\*</sup>  
Fábio Ribeiro Pires<sup>2</sup>  
Alberto Cargnelutti Filho<sup>3</sup>  
kristhiano Chagas<sup>2</sup>  
Alex Favaro Nascimento<sup>2</sup>  
Giovanni de Oliveira Garcia<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Viçosa – UFV,  
Av. Peter Henry Rolfs, s/n, 36570-000,  
Viçosa, MG, Brasil

<sup>2</sup>Universidade Federal do Espírito Santo – UFES,  
Rod. BR 101, Km 60, Litorâneo, 29932-540,  
São Mateus, ES, Brasil

<sup>3</sup>Universidade Federal de Santa Maria – UFSM,  
Av. Roraima, 1000, Campus Camobi, 97105-900,  
Santa Maria, RS, Brasil

<sup>4</sup>Universidade Federal do Espírito Santo – UFES,  
Alto Universitário, s/n, Guararema, 29500-000,  
Alegre, ES, Brasil

**Autor correspondente:**

\*E-mail: joaocarlosagr@hotmail.com

**PALAVRAS-CHAVE**

Descontaminação  
Fitotoxicidade  
*Crotalaria juncea*

**KEYWORDS**

Decontamination  
Phytotoxicity  
*Crotalaria juncea*

## Fitorremediação de solos contaminados com o herbicida sulfentrazone por espécies de adubos verdes

### *Phytoremediation of soils contaminated with the herbicide sulfentrazone by green manure species*

**RESUMO:** Diante das novas tecnologias, a fitorremediação apresenta-se como opção para a descontaminação de áreas que sofreram com intensas aplicações de herbicidas. O presente trabalho teve como objetivo avaliar o potencial remediador das espécies de adubos verdes crotalária-júncea (*Crotalaria juncea* L.), feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis* (L.) DC.), feijão-guandu (*Cajanus cajan* L.) e feijão-guandu-anão (*Cajanus cajan* (anão) L. Millsp.) ao herbicida sulfentrazone. Foi utilizada a espécie mucuna-anã (*Stizolobium deeringianum* Bort.) como planta bioindicadora de resíduos do herbicida no solo, a qual foi cultivada em sucessão às espécies remediadoras. O experimento foi instalado em casa de vegetação, utilizando-se vasos contendo 10 dm<sup>3</sup> de solo coletado na profundidade de 0-0,2 m. Os tratamentos foram compostos pela combinação entre as quatro espécies citadas, um tratamento sem cultivo (controle) e quatro doses do sulfentrazone (0, 200, 400 e 800 g ha<sup>-1</sup>). Foram avaliados os seguintes aspectos: a altura de plantas, a fitotoxicidade ao sulfentrazone e a biomassa seca da parte aérea. A *C. juncea* foi a espécie mais eficiente na descontaminação do herbicida sulfentrazone em solo até a dose de 400 g ha<sup>-1</sup>, o que não inviabiliza a continuidade dos estudos com as espécies *C. cajan*, *C. cajan* (anão) e o *C. ensiformis*, que apresentaram resultados satisfatórios com a utilização da *S. deeringianum* como planta bioindicadora.

**ABSTRACT:** In face of the new technologies, phytoremediation is presented as an option for the decontamination of areas that have suffered with intense herbicide applications. This study aimed to evaluate the potential of remediation to sulfentrazone by green manure species, such as sunn hemp (*Crotalaria juncea*), jack bean (*Canavalia ensiformis*), pigeon pea (*Cajanus cajan*) and dwarf pigeon pea (*Cajanus cajan* dwarf). Dwarf mucuna (*Stizolobium deeringianum*) was used as the bioindicator plant of soil residues, which succeeded the remedial species. The experiment was carried out in a greenhouse using pots with 10 dm<sup>3</sup>, collected from the depth of 0-0.2 m. The treatments were composed by the combination of four green manure species and four doses of sulfentrazone (0, 200, 400 and 800 g ha<sup>-1</sup>), plus one treatment without crop (control). The height of plants, phytotoxicity to sulfentrazone, and fresh and dry matter of shoots were evaluated. *C. juncea* was the most efficient species on the decontamination of sulfentrazone in soil up to 400 g ha<sup>-1</sup>. These results do not exclude the continuation of studies with *C. cajan*, *C. cajan* (dwarf) and *C. ensiformis*, which showed satisfactory results using *S. deeringianum* as the bioindicator plant.

## 1 Introdução

A destinação dos diferentes xenobióticos aplicados no solo tem recebido atenção especial da comunidade científica, que procura, além de orientar seu emprego de forma correta, racional e eficiente, possibilitar que sua ação cause o mínimo de danos ao ambiente. Estudos mostram que os herbicidas são os xenobióticos mais utilizados na atividade agropecuária; são empregados em áreas de grande extensão, permitindo o controle efetivo de espécies vegetais daninhas. Herbicidas com efeito residual no solo são importantes para algumas culturas, que necessitam de um longo período total de prevenção da interferência das plantas daninhas (PIRES et al., 2008). Dessa forma, apenas uma aplicação do herbicida no solo já é o suficiente para manter a cultura livre da presença das plantas daninhas até o término desse período.

Por outro lado, dependendo do tipo de solo – notadamente os de textura mais arenosa – e das características dos herbicidas, que resultam em maior ou menor sorção, essas moléculas podem ser lixiviadas para camadas mais profundas no perfil do solo, podendo atingir o lençol de água subterrâneo (SOUZA et al., 2001). Por outro lado, tem-se observado, em algumas situações, a ocorrência de fitotoxicidade em culturas sensíveis (*carryover*) semeadas após a utilização desses herbicidas, cujo efeito residual no solo varia de alguns meses a mais de três anos (BOVEY; MEYER; HEIN JUNIOR, 1982).

O herbicida sulfentrazone, amplamente utilizado para o controle de *Cyperaceae*, pode persistir no solo por até 539 dias, quando aplicado para o manejo de plantas daninhas na cultura da soja (BLANCO; VELINI, 2005), e até 704 dias, quando utilizado no manejo de plantas daninhas na cultura da cana-de-açúcar (BLANCO; VELINI; BATISTA FILHO, 2010). Além de persistente (MELO et al., 2010; MONQUERO et al., 2010), o sulfentrazone é classificado como móvel no solo e tem um alto potencial de lixiviação, tanto vertical (para a água subterrânea) quanto horizontal (MARTINEZ et al., 2008), principalmente por sua baixa afinidade pela matéria orgânica.

A utilização de plantas com capacidade de tolerar e, concomitantemente, extrair ou facilitar a degradação de determinados compostos pode representar uma alternativa interessante na agricultura (PIRES et al., 2003). A fitorremediação tem sido empregada em áreas contaminadas com substâncias orgânicas e inorgânicas (PROCÓPIO et al., 2007; D'ANTONINO et al., 2009). Essa técnica baseia-se, principalmente, na tolerância que algumas espécies exibem a determinados produtos. De acordo com Accioly e Siqueira (2000), para compostos orgânicos, a tolerância pode ser resultante de processos que envolvem: i) a absorção e a translocação diferencial pela planta; ii) a degradação parcial ou completa, e iii) a transformação em compostos menos tóxicos, combinados e/ou ligados nos tecidos das plantas. A maioria dos compostos orgânicos passa por alguma transformação nas células antes de serem isolados em vacúolos ou ligar-se a estruturas celulares insolúveis (MACEK; MACKOVÁ; KÁS, 2000).

Existem diversos trabalhos que apontam a eficiência de plantas na remediação de herbicidas, como tebuthiuron (PIRES et al., 2005, 2006, 2008), trifloxysulfuron sodium (SANTOS et al., 2004), picloram (PROCÓPIO et al., 2008),

atrazina (ARTHUR et al., 2000), simazina (WILSON; WHITWELL; KLAINE, 2000, 2001) e metolaclor (ANDERSON; COATS, 1995). Em relação ao sulfentrazone, Belo et al. (2011) apontam as espécies *Helianthus annuus*, *Canavalia ensiformis*, *Dolichos lab lab* e *Arachis hypogaea* como indicadas para a fitorremediação, em solo franco argilo-arenoso classificado como Argissolo vermelho-amarelo, empregando-se o sorgo como planta indicadora.

O objetivo foi avaliar a eficiência das espécies de adubos verdes crotalária-júncea (*Crotalaria juncea* L.), feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis* (L.) DC.), feijão-guandu (*Cajanus cajan* L.) e feijão-guandu-anão (*Cajanus cajan* (anão) L. Millsp.) em fitorremediar o herbicida sulfentrazone, utilizando-se a espécie mucuna-anã (*Stizolobium deeringianum* Bort.) como planta bioindicadora.

## 2 Material e Métodos

O experimento foi instalado em casa de vegetação no período de 2009 a 2010, utilizando-se vasos sem furos contendo 10 dm<sup>3</sup> de solo, classificado como Argissolo Amarelo (LA) eutrocoeso típico textura média, coletado na profundidade de 0-0,2 m, peneirado em malha de 4 mm. Foi coletada uma amostra desse solo que, em seguida, foi seca ao ar e peneirada em malha de 2,0 mm, obtendo-se, assim, amostra de terra fina seca ao ar, para posteriores análises químicas. Foram determinados: o valor de pH em H<sub>2</sub>O: 5,4; os teores de P e K<sup>+</sup> extraíveis em Mehlich<sup>-1</sup>: 3,0 mg dm<sup>-3</sup> e 0,18 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, respectivamente; os teores de Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e Al<sup>3+</sup> trocáveis extraídos em KCl 1 mol L<sup>-1</sup>: 1,8 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, 1,0 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> e 0,1 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, respectivamente, e o Carbono: 22,8 g kg<sup>-1</sup>, de acordo com as recomendações da Embrapa (1999). Com os valores obtidos nas análises do solo, calcularam-se: a CTC efetiva: 3,08 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; a soma de bases trocáveis (SB): 2,98 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; a porcentagem de saturação por alumínio (m%): 3,24%, e a porcentagem de saturação por bases (V): 53,9% (EMBRAPA, 1999). A textura do solo foi determinada conforme Embrapa (1997), obtendo-se os seguintes valores: areia = 750 g kg<sup>-1</sup>; silte = 30 g kg<sup>-1</sup>; argila = 220 g kg<sup>-1</sup>.

Os tratamentos foram compostos de quatro espécies de plantas: crotalária-júncea (*C. juncea*), feijão-de-porco (*C. ensiformis*), feijão-guandu (*C. cajan*), feijão-guandu-anão [*C. cajan* (anão)], mais um tratamento sem cultivo (controle) e quatro doses do sulfentrazone (0, 200, 400 e 800 g ha<sup>-1</sup>). Foi realizado um ensaio com cerca de 25 espécies para avaliação da tolerância ao sulfentrazone em diferentes doses, sendo as mais tolerantes selecionadas para este trabalho. O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados em esquema fatorial 5 × 4, com quatro repetições.

Após o preenchimento dos vasos, o herbicida sulfentrazone foi aplicado em pré-emergência, para a qual foi utilizado um pulverizador pressurizado com CO<sub>2</sub>, com volume de calda de 200 L ha<sup>-1</sup>, aplicando-se efetivamente 0,46 micrograma de sulfentrazone por vaso na dosagem de 200 g ha<sup>-1</sup>, 0,92 micrograma de sulfentrazone por vaso na dosagem de 400 g ha<sup>-1</sup> e 1,84 micrograma de sulfentrazone por vaso na dosagem de 800 g ha<sup>-1</sup>. Vinte dias após o término desta etapa, realizou-se a semeadura das espécies vegetais, distribuindo-se seis sementes por vaso numa profundidade de 0,5 cm. Após

a emergência das plantas, foi feito um desbaste aleatório, deixando-se duas plantas por vaso. Todos os vasos foram irrigados diariamente mantendo o solo em 60% da capacidade de campo. O valor da capacidade de campo foi determinado em teste preliminar à implantação do experimento, empregando a metodologia proposta por Casaroli e Lier (2008).

Aos 60 dias após a semeadura (DAS) das espécies, estas foram cortadas na altura do coleto e a parte aérea dessas plantas, descartada. Foram retiradas amostras de solo em cada tratamento para serem analisadas novamente (dados não apresentados). Este procedimento foi realizado para suprir ao solo os nutrientes que foram extraídos quando do cultivo das espécies fitorremediadoras. Como são espécies diferentes e foram cultivadas com diferentes doses do herbicida, tais condições poderiam resultar em uma extração diferencial dos nutrientes nos vasos, fator de variabilidade, e interferir no desenvolvimento da espécie indicadora, dependendo de cada tratamento. Isto poderia resultar em um comportamento das plantas que não refletisse apenas a ação dos tratamentos.

Com a realização da adubação corretiva por tratamento, as diferenças observadas são decorrentes apenas dos tratamentos: doses e espécies fitorremediadoras. Em seguida, foi realizada a adubação de plantio nas necessidades médias da cultura bioindicadora mucuna-anã (*Stizolobium deeringianum*) e, para esta etapa, os adubos foram diluídos em água, sem a necessidade de retirar e revolver o solo dos vasos. Após essa etapa, a *S. deeringianum* foi imediatamente semeada, distribuindo-se seis sementes por vaso numa profundidade de 0,5 cm, realizando o bioensaio no próprio vaso. A metodologia de bioensaios foi usada, pois é considerada adequada para detecção de resíduos no solo do herbicida sulfentrazone (BLANCO; VELINI, 2005). Após a emergência das plântulas, foi feito o desbaste deixando-se duas plantas por vaso.

Aos 30 DAS e 60 DAS, foi avaliada a altura de plantas (cm), tomando-se como base para medição do meristema apical, e a fitotoxicidade, avaliada visualmente. Para tal, foi determinada a percentagem de danos (%), de acordo com os sintomas de intoxicação na parte aérea das plantas, com base em uma escala variando de 0 a 100, para ausência de sintomas até morte da planta, respectivamente. Aos 60 DAS, as plantas de *S. deeringianum* foram cortadas na altura do coleto e, após a secagem do material em estufa de circulação forçada até peso constante, obteve-se a matéria seca da parte aérea (g).

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e teste F ( $p < 0,05$ ); quando significativo, o efeito das doses do sulfentrazone foi estudado por regressão ( $p < 0,05$ ). A escolha do modelo para cada variável baseou-se na significância dos parâmetros e nos valores do  $R^2$  (ALVAREZ V.; ALVAREZ, 2006). Empregaram-se para análise dos resultados os programas SAEG (2007) e Sigma Plot 11.0.

### 3 Resultados e Discussão

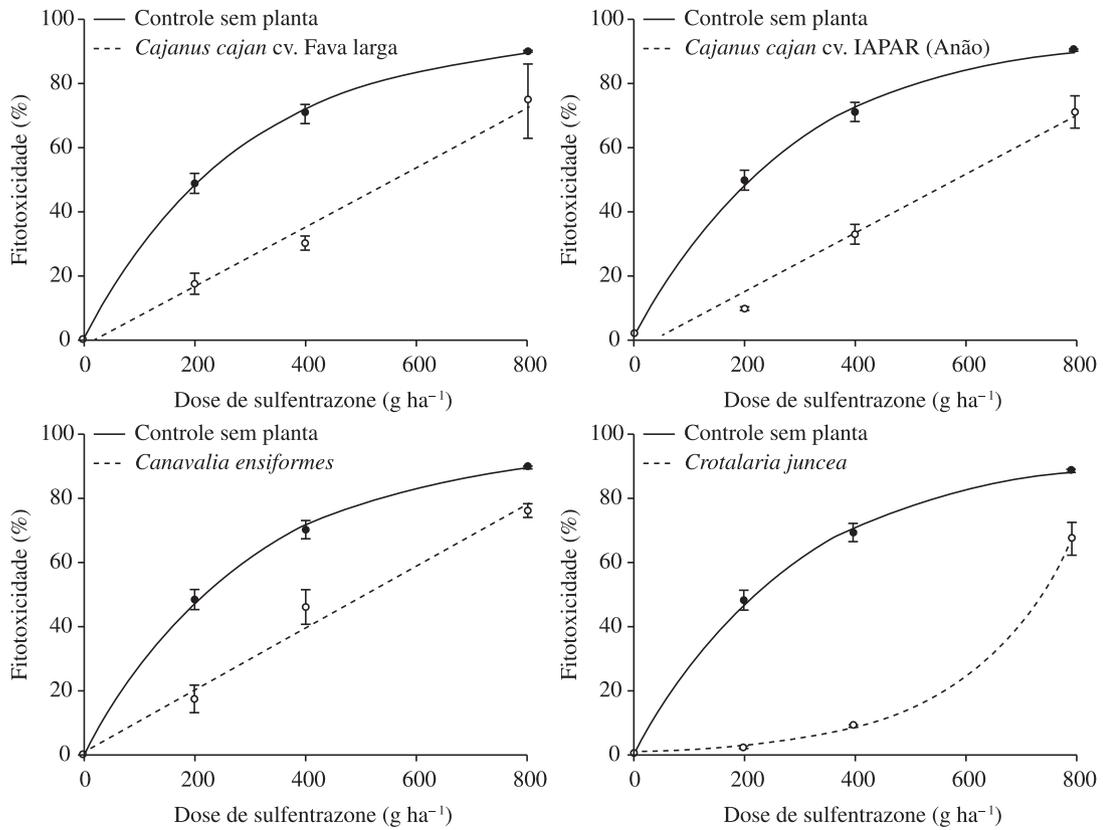
Com aumento da dose de sulfentrazone, observou-se diminuição progressiva nos valores de altura e biomassa seca da parte aérea, e aumento da fitotoxicidade das plantas do primeiro cultivo (Figuras 1-5). Todas as espécies fitorremediadoras apresentaram algum grau de eficiência na remoção do sulfentrazone, em todos os níveis de contaminação

do solo, o que foi evidenciado por sintomas menos intensos na *S. deeringianum*, quando comparada ao controle sem cultivo prévio. Como exceção, apenas a espécie *C. cajan*, na segunda avaliação e dose de 800 g ha<sup>-1</sup>, não diferiu do tratamento controle (Figura 2).

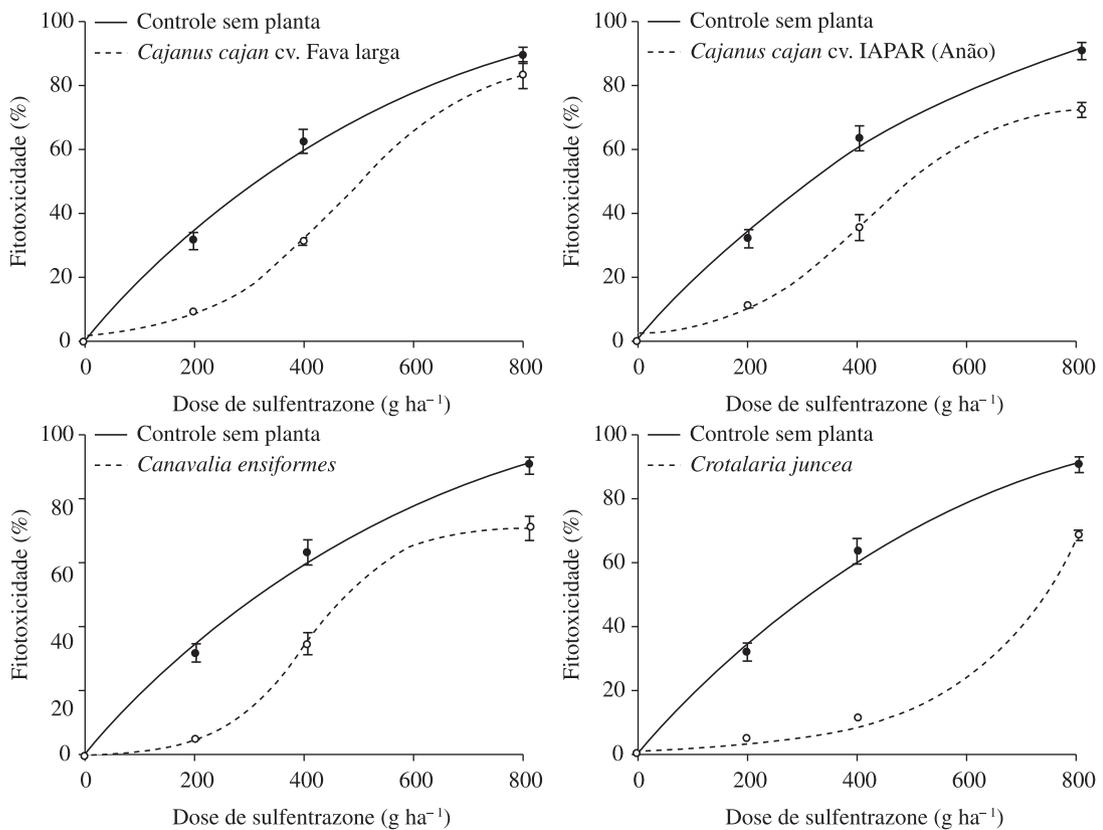
Dentre as espécies fitorremediadoras, nota-se que os sintomas de fitotoxicidade na *S. deeringianum* foram menos intensos quando esta foi cultivada logo após a *C. juncea*, com pequena variação de uma avaliação para outra (Figuras 1 e 2; Tabela 1). Essa espécie se mostrou a mais eficiente na imobilização do sulfentrazone até a dose de 400 g ha<sup>-1</sup>, que corresponde à metade da dose comercial e, provavelmente, representa a quantidade de herbicida que se aproxima daquela encontrada no solo após a aplicação do sulfentrazone, levando-se em conta as perdas e diversas interações a que está sujeita. Pires et al. (2005) selecionaram *P. glaucum*, *Stizolobium aterrimum*, *C. cajan* e o *C. ensiformis* como espécies capazes de fitorremediar solos contaminados com tebutiuron na dose de 500 g ha<sup>-1</sup> e cultivados em sequência com *Avena strigosa*. Segundo os autores, essa quantidade de herbicida representa um valor provável de ser encontrado no solo após sua aplicação, mesmo que de forma lenta ocorra a degradação microbiana e química, e a potencial lixiviação (GOMES; SPADOTTO; LANCHOTTE, 2001), além, ainda, da absorção pela cultura.

Quando *S. deeringianum* foi cultivada após as espécies *C. cajan* e *C. ensiformis* no solo tratado com 200 g ha<sup>-1</sup>, verificou-se cerca de 17% de fitotoxicidade aos 30 DAS (Figura 1), mas se recuperou e, aos 60 DAS, apresentou sintomas menos acentuados de intoxicação (Figura 2). O contrário aconteceu quando foi cultivada após o *C. cajan* (anão), pois aos 30 DAS apresentou aproximadamente 7% de fitotoxicidade e, aos 60 DAS, cerca de 11%. Na dose de 400 g ha<sup>-1</sup>, aos 30 DAS, *S. deeringianum* apresentou sintomas de fitotoxicidade mais acentuados quando foi cultivada após o *C. ensiformis*, mas se recuperou e, aos 60 DAS, apresentava os mesmos sintomas que aquelas cultivadas após as espécies *C. cajan* e *C. cajan* (anão). Na dose de 800 g ha<sup>-1</sup>, todas as espécies fitorremediadoras tiveram comportamento semelhante, inclusive *C. juncea*, refletindo sintomas mais severos de intoxicação, porém, em níveis menores que no controle.

De forma geral, nota-se que há um comportamento distinto entre as espécies com o aumento das doses de sulfentrazone. Dessa forma, enquanto as curvas que representam a *S. deeringianum* sucedendo as espécies *C. cajan*, *C. cajan* (anão) e *C. ensiformis* apresentam-se de forma crescente e mais contínua com o aumento das doses do herbicida, a curva decorrente do cultivo anterior de *C. juncea* também segue crescente, porém de forma mais lenta e irregular, mostrando a planta indicadora ter sido menos afetada pelo sulfentrazone. Entretanto, as curvas das espécies fitorremediadoras sempre aparecem exibindo menor fitotoxicidade em relação ao tratamento controle (sem planta). Pires et al. (2006) observaram que houve aumento da fitotoxicidade às plantas de soja cultivadas após as espécies fitorremediadoras do herbicida tebutiuron, com o aumento das doses utilizadas. Porém, quando foi cultivada após as espécies *C. ensiformis*, seguidas



**Figura 1.** Fitotoxicidade das plantas de *S. deeringianum*, aos 30 DAS, cultivadas em sucessão a *C. cajan*, *C. cajan* (anão), *C. ensiformes*, *C. juncea* e um tratamento controle, em solo tratado com quatro doses de sulfentrazone.



**Figura 2.** Fitotoxicidade das plantas de *S. deeringianum*, aos 60 DAS, cultivadas em sucessão a *C. cajan*, *C. cajan* (anão), *C. ensiformes*, *C. juncea* e um tratamento controle, em solo tratado com quatro doses de sulfentrazone.

de *Lupinus albus* e *S. aterrimum* até a dose de 1,0 kg ha<sup>-1</sup>, os sintomas foram menos expressivos.

A pesquisa com a fitorremediação de herbicidas é recente e poucos são os trabalhos com enfoque agrônômico, como neste trabalho. A literatura internacional recente tem dado maior atenção à seleção de plantas enfocando a engenharia genética, e com enfoque apenas ambiental. Todavia, em condições tropicais, a possibilidade de selecionar espécies tolerantes é consideravelmente maior e, por isso, a fitorremediação é promissora nessas condições. Dentre os trabalhos já desenvolvidos na remediação de pesticidas, podem-se destacar os estudos das plantas *C. ensiformis*, *Lupinus albus*, *Stizolobium aterrimum* e *Avena strigosa* na remediação do herbicida tebuthiuron (PIRES et al., 2005, 2006, 2008); *Mucuna aterrima* e *C. ensiformis* para o herbicida

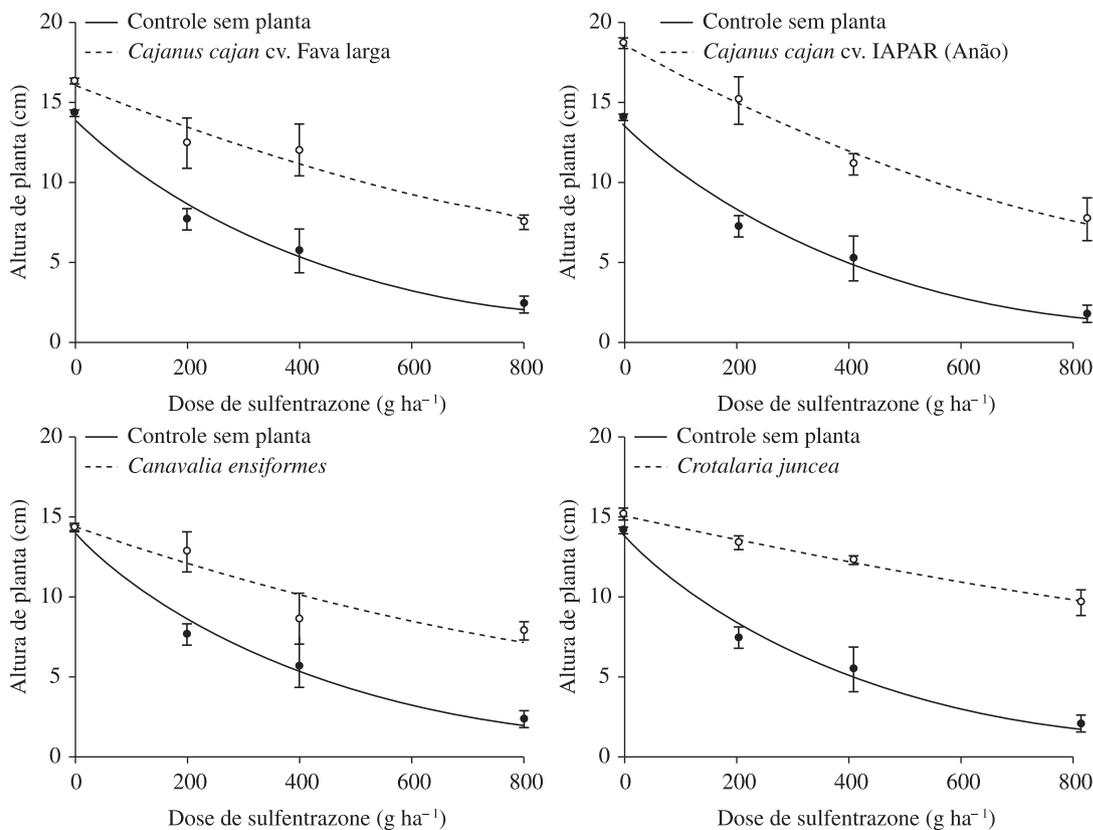
trifloxysulfuron sodium (SANTOS et al., 2004), e *Eleusine coracana* para o herbicida picloram (PROCÓPIO et al., 2008).

Assim como para a fitotoxicidade, nas avaliações de altura, a interação entre os tratamentos também foi significativa. Fitotoxicidade e altura são inversamente relacionadas, ou seja, quanto maior a fitotoxicidade, menor a altura, e vice-versa. Os resultados de altura evidenciaram, de maneira geral, especialmente na segunda avaliação, a tendência de redução significativa da altura das plantas de *S. deeringianum* com o aumento da dose de sulfentrazone, (Figuras 3 e 4; Tabela 2).

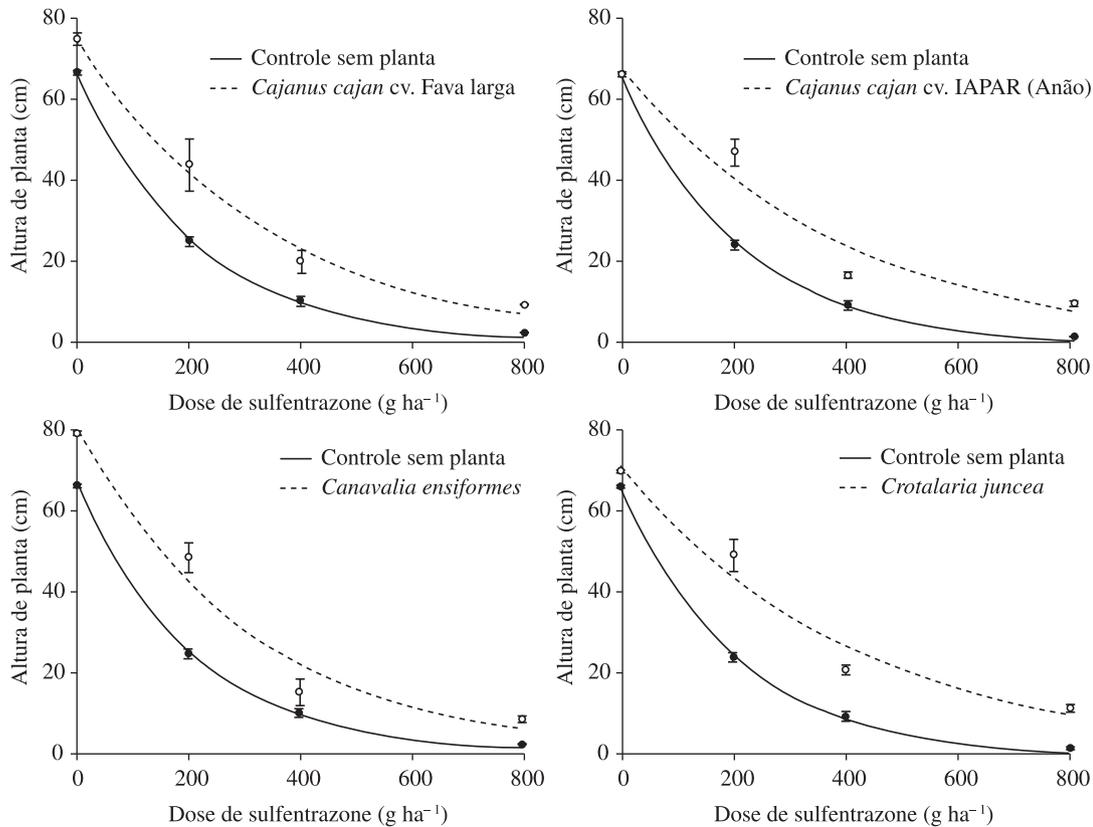
Essas informações indicam que a planta está absorvendo ou facilitando a degradação do sulfentrazone do solo, exercendo, dessa forma, um efeito remediador. Todavia, o tempo de cultivo da espécie ou a necessidade de mais de um ciclo de cultivo deve ser mais bem analisada para se obter efetiva remediação,

**Tabela 1.** Equações de regressão para valores médios de fitotoxicidade, aos 30 e 60 DAS, nas plantas de *S. deeringianum* cultivadas após quatro espécies fitorremediadoras e um tratamento controle, sob quatro doses de sulfentrazone.

Espécie fitorremediadora	30 DAS		60 DAS	
	Equação de regressão	R <sup>2</sup>	Equação de regressão	R <sup>2</sup>
Controle	$\hat{Y} = 95,531*(1-e^{-0,003468*X})$	0,99	$\hat{Y} = 122,067*(1-e^{-0,001671*X})$	0,99
<i>C. cajan</i>	$\hat{Y} = -1,85 + 0,0926071*X$	0,99	$\hat{Y} = 88,99/(1+e^{(-X+473,9)/122,0})$	0,99
<i>C. cajan</i> (anão)	$\hat{Y} = -4,5 + 0,0916964*X$	0,98	$\hat{Y} = 73,44/(1+e^{(-X+409,3)/112,7})$	0,99
<i>C. ensiformes</i>	$\hat{Y} = 0,95 + 0,0974643*X$	0,98	$\hat{Y} = 70,46/(1+e^{(-X+404,3)/78,9})$	0,99
<i>C. juncea</i>	$\hat{Y} = e^{(0,00528403*X)}$	0,99	$\hat{Y} = e^{(0,00526887*X)}$	0,99



**Figura 3.** Altura das plantas de *S. deeringianum*, aos 30 DAS, cultivadas em sucessão a *C. cajan*, *C. cajan* (anão), *C. ensiformes*, *C. juncea* e um tratamento controle, em solo tratado com quatro doses de sulfentrazone.



**Figura 4.** Altura das plantas de *S. deeringianum*, aos 60 DAS, cultivadas em sucessão a *C. cajan*, *C. cajan* (anão), *C. ensiformes*, *C. juncea* e um tratamento controle, em solo tratado com quatro doses de sulfentrazone.

**Tabela 2.** Equações de regressão para valores médios de altura, aos 30 e 60 DAS, nas plantas de *S. deeringianum* cultivadas após quatro espécies fitorremediadoras e um tratamento controle, sob quatro doses de sulfentrazone.

Espécie fitorremediadora	30 DAS		60 DAS	
	Equação de regressão	R <sup>2</sup>	Equação de regressão	R <sup>2</sup>
Controle	$\hat{Y} = 13,9679 * e^{(-0,0024293 * X)}$	0,98	$\hat{Y} = 66,5733 * e^{(-0,00480196 * X)}$	0,99
<i>C. cajan</i>	$\hat{Y} = 16,0346 * e^{(-0,0009102 * X)}$	0,96	$\hat{Y} = 75,414 * e^{(-0,00295683 * X)}$	0,99
<i>C. cajan</i> (anão)	$\hat{Y} = 18,7806 * e^{(-0,0011016 * X)}$	0,99	$\hat{Y} = 68,1493 * e^{(-0,00256878 * X)}$	0,95
<i>C. ensiformes</i>	$\hat{Y} = 14,3618 * e^{(-0,0008685 * X)}$	0,89	$\hat{Y} = 81,0493 * e^{(-0,00320295 * X)}$	0,97
<i>C. juncea</i>	$\hat{Y} = 15,2529 * e^{(-0,0005374 * X)}$	0,99	$\hat{Y} = 71,9593 * e^{(-0,00240154 * X)}$	0,97

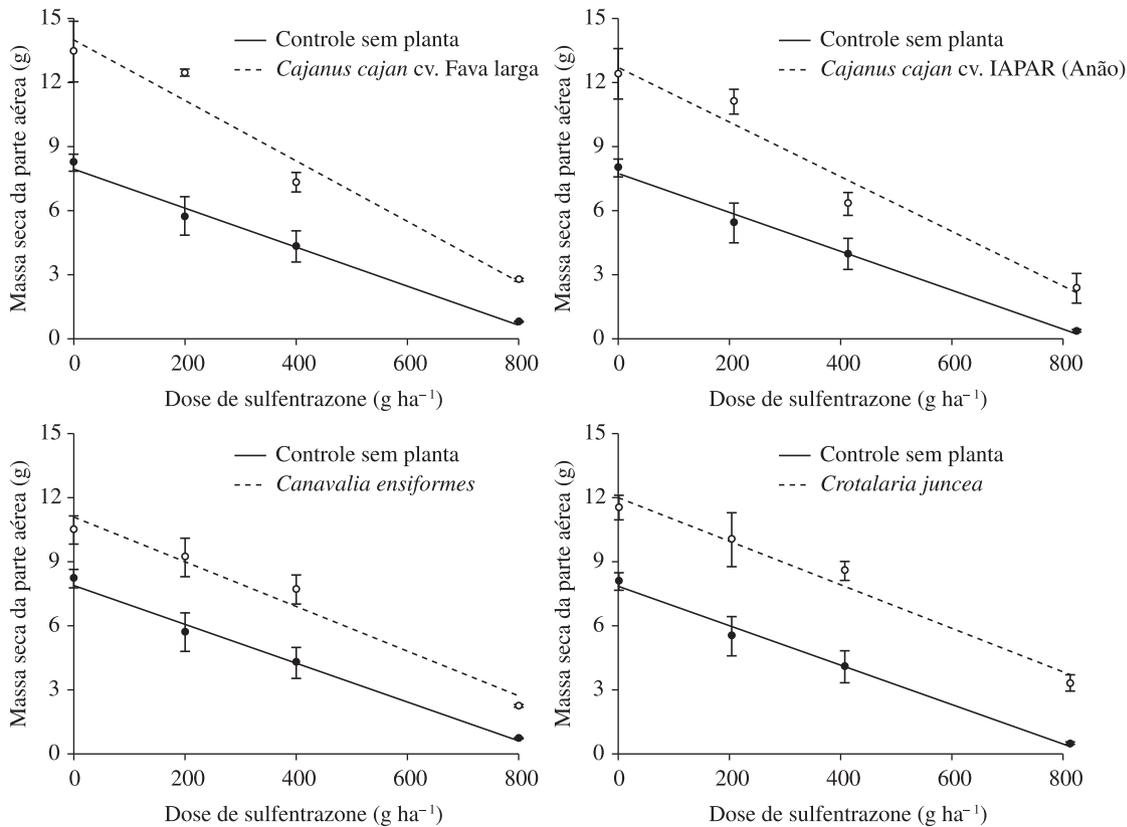
isto é, um processo que permita o cultivo de espécies sensíveis em sucessão, sem prejuízos agrônômicos para essa cultura. Tal evidência pode ser necessária mesmo para a *C. juncea*, que exibiu maior capacidade de fitorremediação, visando a promover redução significativa do sulfentrazone no solo. O mesmo foi concluído por Kruger et al. (1997), em estudo para seleção de espécies capazes de descontaminar solos de quatro locais contaminados com atrazine, em Iowa, EUA. Os autores observaram a possibilidade de se fitorremediar o herbicida atrazine no solo com a espécie *Kochia scoparia*, porém relataram ser necessário mais de um ciclo de cultivo para eliminação ou redução de atrazine em níveis não tóxicos no solo.

Os resultados da variável massa seca de plantas seguiram o mesmo comportamento observado para a interação entre

espécies e doses em relação à fitotoxicidade e à altura, ou seja, à medida que as doses de sulfentrazone aumentaram, a massa seca diminuiu independentemente do tratamento (Figura 5 e Tabela 3).

De forma semelhante ao que ocorreu para altura de plantas, em quase todas as combinações entre espécies e doses, a massa acumulada pela planta indicadora, obtida em solo não fitorremediado (controle), foi sempre inferior àquela obtida com a fitorremediação (Figura 5), com exceção da dose de 800 g ha<sup>-1</sup>.

O acúmulo de massa pela planta constitui-se em uma importante inferência para a fitorremediação, já que pode representar uma maior capacidade de acúmulo e metabolização de certos compostos (NEWMAN et al., 1998). No caso de compostos orgânicos, a tolerância pode ser resultante de



**Figura 5.** Massa seca da parte aérea das plantas de *S. deeringianum*, cultivadas em sucessão a *C. cajan*, *C. cajan* (anão), *C. ensiformes*, *C. juncea* e um tratamento controle, em solo tratado com quatro doses de sulfentrazone.

**Tabela 3.** Equações de regressão para valores médios de massa seca da parte aérea das plantas de *S. deeringianum* cultivadas após quatro espécies fitorremediadoras e um tratamento controle, sob quatro doses de sulfentrazone.

Espécie fitorremediadora	Massa seca da parte aérea	
	Equação de regressão	R <sup>2</sup>
Controle	$\hat{Y} = 7,921 - 0,0090814 * X$	0,99
<i>C. cajan</i>	$\hat{Y} = 13,94 - 0,0141875 * X$	0,96
<i>C. cajan</i> (anão)	$\hat{Y} = 12,7705 - 0,01288 * X$	0,96
<i>C. ensiformes</i>	$\hat{Y} = 11,0775 - 0,01042 * X$	0,97
<i>C. juncea</i>	$\hat{Y} = 12,0705 - 0,01016 * X$	0,98

processos, como a translocação diferencial (maior ou menor) para outros tecidos da planta, com subsequente volatilização; a degradação parcial ou completa, e a transformação em compostos menos tóxicos, combinados e/ou ligados a tecidos das plantas (compartimentalização) (ACCIOLY; SIQUEIRA, 2000; PIRES et al., 2003). Em geral, a maioria dos compostos orgânicos passa por transformações nas células das plantas antes de serem isolados em vacúolos ou se ligarem a estruturas celulares insolúveis, como a lignina (MACEK; MACKOVÁ; KÁS, 2000). Nas plantas tolerantes ao sulfentrazone, ocorre rápida degradação oxidativa do produto, como forma de

detoxificação (EL NAGGAR et al., 1992), sendo esta realizada pela enzima peroxidase.

Numa condição de campo, adubos verdes podem favorecer a presença de um número maior de microrganismos, que podem contribuir para a degradação do pesticida, já que a interação entre raiz e solo estimula a proliferação da comunidade microbiana na região da rizosfera, decorrente da exsudação de nutrientes aminoácidos e polissacarídeos da planta (ARTHUR et al., 2000).

Essa informação encoraja a continuidade dos estudos em condições de campo, envolvendo não somente *C. juncea*, mas também *C. cajan*, *C. cajan* (anão) e o *C. ensiformis*, que apresentaram resultados satisfatórios. Pode-se afirmar que, dependendo da cultura que sucederá a fitorremediadora, sendo tal cultura mais tolerante ao sulfentrazone, a espécie fitorremediadora utilizada poderá ser uma das três menos efetivas.

## 4 Conclusões

A *C. juncea* é a espécie mais eficiente na descontaminação do herbicida sulfentrazone em solo até a dose de 400 g ha<sup>-1</sup>.

## Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pelo financiamento e pelas Bolsas concedidas.

## Referências

- ACCIOLY, A. M. A.; SIQUEIRA, J. O. Contaminação química e biorremediação do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V. V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Eds.). *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1, p. 299-352.
- ALVAREZ V., V. H.; ALVAREZ, G. A. M. Comparação de médias ou testes de hipóteses? Contrastes! *Boletim Informativo da SBCS*, v. 31, n. 1, p. 24-34, 2006.
- ANDERSON, T. A.; COATS, J. R. Screening rhizosphere soil samples for the ability to mineralize elevated concentrations of atrazine and metolachlor. *Journal of Environmental Science and Health*, v. 30, n. 4, p. 473-484, 1995. <http://dx.doi.org/10.1080/03601239509372948>
- ARTHUR, E. L.; PERKOVICH, B. S.; ANDERSON, T. A.; COATS, J. R. Degradation of an atrazine and metolachlor herbicide mixture in pesticide-contaminated soils from two agrochemical dealerships in Iowa. *Water, Air, and Soil Pollution*, v. 119, n. 1-4, p. 75-90, 2000. <http://dx.doi.org/10.1023%2FA%3A1005165603963>
- BELO, A. F.; COELHO, A. T. C. P.; FERREIRA, L. R.; SILVA, A. A.; SANTOS, J. B. Potencial de espécies vegetais na remediação de solo contaminado com sulfentrazone. *Planta daninha*, v. 29, n. 4, p. 821-828, 2011. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-83582011000400012>
- BLANCO, F. M. G.; VELINI, E. D.; BATISTA FILHO, A. Persistência do herbicida sulfentrazone em solo cultivado com cana-de-açúcar. *Bragantia*, v. 69, n. 1, p. 71-75, 2010. <http://dx.doi.org/10.1590/S0006-87052010000100010>
- BLANCO, F. M. G.; VELINI, E. D. Persistência do herbicida sulfentrazone em solo cultivado com soja e seu efeito em culturas sucedâneas. *Planta Daninha*, v. 23, n. 4, p. 693-700, 2005. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-83582005000400018>
- BOVEY, R. W.; MEYER, R. E.; HEIN JUNIOR, H. Soil persistence of tebuthiuron in the Claypan Resource Area of Texas. *Weed Science*, v. 30, n. 2, p. 140-144, 1982.
- CASAROLI, D.; LIER, Q. J. V. Critérios para determinação da capacidade de vaso. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, n. 1, p. 59-66, 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000100007>
- D'ANTONINO, L.; SILVA, A. A.; FERREIRA, L. R.; CECON, P. R.; QUIRINO, A. L. S.; FREITAS, L. H. L. Efeitos de culturas na persistência de herbicidas auxínicos no solo. *Planta Daninha*, v. 27, n. 2, p. 371-378, 2009. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-83582009000200021>
- EL NAGGAR, S. F.; CREEKMORE, R. W.; SCHOKEN, M. J.; ROSEN, R. T.; ROBINSON, R. A. Metabolism of clomazone herbicide in soybean. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 40, n. 5, p. 880-883, 1992. <http://dx.doi.org/10.1021/jf00017a036>
- EMBRAPA. *Manual de análises de solo*. 2. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212 p.
- EMBRAPA. *Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes*. Brasília: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia, 1999. 412 p.
- GOMES, M. A. F.; SPADOTTO, C. A.; LANCHOTTE, V. L. Ocorrência do herbicida tebutiuron na água subterrânea da microbacia do Córrego Espreado, Ribeirão Preto – SP. *Pesticidas: Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente*, v. 11, n. 1, p. 65-76, 2001.
- KRUGER, E. L.; ANHALT, J. C.; SORENSON, D.; NELSON, B.; CHOUHY, A. L.; ANDERSON, T. A.; COATS, J. R. Atrazine degradation in pesticide-contaminated soils: phytoremediation potential. In: KRUGER, E. L.; ANDERSON, T. A.; COATS, J. R. *Phytoremediation of soil and water contaminants*. Washington: American Chemical Society, 1997. p. 54-64. <http://dx.doi.org/10.1021/bk-1997-0664.ch004>
- MACEK, T.; MACKOVÁ, M.; KÁS, J. Exploitation of plants for the removal of organics in environmental remediation. *Biotechnology Advances*, v. 18, n. 1, p. 23-34, 2000. [http://dx.doi.org/10.1016/S0734-9750\(99\)00034-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0734-9750(99)00034-8)
- MARTINEZ, C. O.; SILVA, C. M. M. S.; FAY, E. F.; MAIA, A. H. N.; ABAKERLI, R. B.; DURRANT, L. R. Degradation of the herbicide sulfentrazone in a Brazilian Typic Hapludox soil. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 40, n. 4, p. 879-888, 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.10.016>
- 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. Efeito residual de sulfentrazone, isoxaflutole e oxyfluorfen em três solos. *Planta Daninha*, v. 28, n. 4, p. 835-842, 2010. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-83582010000400017>
- MONQUERO, P. A.; DA SILVA, P. V.; ORTIZ, F. G.; ORZARI, I.; OLIVERIA, C. T. Lixiviação e persistência dos herbicidas sulfentrazone e Imazapic. *Planta Daninha*, v. 28, n. 1, p. 185-195, 2010. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-83582010000100022>
- NEWMAN, L. A.; DOTY, S. L.; GERY, K. L.; HEILMAN, P. E.; MUIZNIEKS, I.; SHANG, Q. T.; SIEMIENIEC, S. T.; STRAND, S. E.; WANG, X.; WILSON, A. M.; GORDON, M. P. Phytoremediation of organic contaminants: a review of phytoremediation research at the university of Washington. *Journal of Soil Contaminant*, v. 7, n. 4, p. 531-542, 1998.
- PIRES, F. R.; PROCÓPIO, S. O.; SANTOS, J. B.; SOUZA, C. M.; DIAS, R. R. Avaliação da fitorremediação de tebutiuron utilizando *Crotalaria juncea* como planta indicadora. *Revista Ciência Agrônômica*, v. 39, n. 2, p. 245-250, 2008.
- PIRES, F. R.; PROCÓPIO, S. O.; SOUZA, C. M.; SANTOS, J. B.; SILVA, G. P. Adubos verdes na fitorremediação de solos contaminados com o herbicida tebutiuron. *Caatinga*, v. 19, n. 1, p. 92-97, 2006.
- PIRES, F. R.; SOUZA, C. M.; SILVA, A. A.; CECON, P. R.; PROCÓPIO, S. O.; SANTOS, J. B.; FERREIRA, L. R. Fitorremediação de solos contaminados com tebutiuron utilizando-se espécies cultivadas para adubação verde. *Planta Daninha*, v. 23, n. 4, p. 711-717, 2005. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-83582005000400020>
- PIRES, F. R.; SOUZA, C. M.; SILVA, A. A.; PROCÓPIO, S. O.; FERREIRA, L. R. Fitorremediação de solos contaminados por herbicidas. *Planta Daninha*, v. 21, n. 2, p. 335-341, 2003. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-83582003000200020>
- PROCÓPIO, S. O.; SANTOS, J. B.; PIRES, F. R.; SILVA, A. A.; SANTOS, E. A.; CARGNELUTTI FILHO, A. Development of bean plants in soil contaminated with trifloxysulfuron-sodium after *stizolobium aterrimum* and *canavalia ensiformis* cultivation. *Planta Daninha*, v. 25, n. 1, p. 87-96, 2007. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-83582007000100010>

PROCÓPIO, S. O.; CARMO, M. L.; PIRES, F. R.; CARGNELUTTI FILHO, A.; BRAZ, G. B. P.; SILVA, W. F. P.; BARROSO, A. L. L.; SILVA, G. P.; CAMO, E. L.; BRAZ, A. J. B. P. Fitorremediação de solo contaminado com picloram por capim-pé-de-galinha-gigante (*Eleusine coracana*). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, n. 6, p. 2517-2523, 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000600028>

SANTOS, J. B.; PROCÓPIO, S. O.; SILVA, A. A.; PIRES, F. R.; RIBEIRO JUNIOR, J. I.; SANTOS, E. A.; FERREIRA, L. R. Fitorremediação do herbicida trifloxysulfuron sodium. *Planta Daninha*, v. 22, n. 2, p. 223-330, 2004. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-83582004000200021>

SISTEMA PARA ANÁLISES ESTATÍSTICAS - SAEG. versão 9.1. Viçosa: UFV, Fundação Arthur Bernardes, 2007.

SOUZA, M. D.; BOEIRA, R. C.; GOMES, M. A. F.; FERRACINI, V. L.; MAIA, A. H. N. Adsorção e lixiviação de tebuthiuron em três tipos de solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 25, n. 4, p. 1053-1061, 2001.

WILSON, P. C.; WHITWELL, T.; KLAINÉ, S. J. Phytotoxicity, uptake, and distribution of <sup>14</sup>C-simazine in *Acorus gramineus* and *Pontederia cordata*. *Weed Science*, v. 48, n. 6, p. 701-709, 2000. [http://dx.doi.org/10.1614/0043-1745\(2000\)048\[0701:PUADOC\]2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1614/0043-1745(2000)048[0701:PUADOC]2.0.CO;2)

WILSON, P. C.; WHITWELL, T.; KLAINÉ, S. J. Metalaxyl toxicity, uptake, and distribution in several ornamental plant species. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, v. 30, n. 2, p. 411-417, 2001. <http://dx.doi.org/10.2134/jeq2001.302411x>