

ALESSANDRA FERREIRA BELO

TÉCNICAS PARA FITORREMEDIAÇÃO DE SOLO CONTAMINADO COM
HERBICIDAS

Tese apresentada à Universidade Federal de
Viçosa, como parte das exigências do Programa
de Pós-Graduação em Fitotecnia, para obtenção
do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2006

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

B452t
2006

Belo, Alessandra Ferreira, 1975-
Técnicas para fitorremediação de solo contaminado
com herbicidas / Alessandra Ferreira Belo. – Viçosa :
UFV, 2006.
viii, 56f. : il. ; 29cm.

Orientador: Lino Roberto Ferreira.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Solos - Descontaminação. 2. Herbicidas - Efeito no
solo. 3. Herbicidas - Toxicologia. 4. Solos - Umidade.
5. Solos - Teor de compostos orgânicos. 6. Plantas e
solo. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

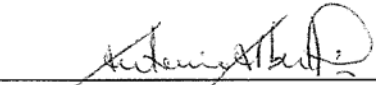
CDD 22.ed. 631.4

ALESSANDRA FERREIRA BELO

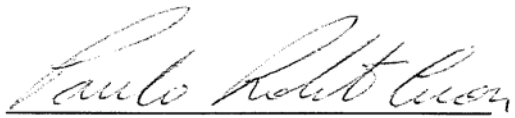
TÉCNICAS PARA FITORREMEDIAÇÃO DE SOLO CONTAMINADO COM
HERBICIDAS

Tese apresentada à Universidade Federal de
Viçosa, como parte das exigências do Programa
de Pós-Graduação em Fitotecnia, para obtenção
do título de *Magister Scientiae*.

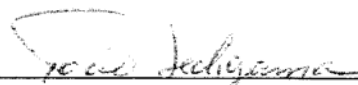
APROVADA: 10 de maio de 2006.



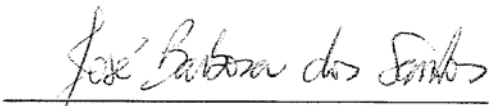
Prof. Antonio Alberto da Silva
(Conselheiro)



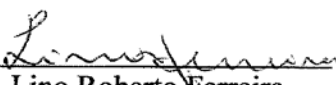
Prof. Paulo Roberto Cecon
(Conselheiro)



Prof. Tocio Sedyama



Dr. José Barbosa dos Santos



Prof. Lino Roberto Ferreira
(Orientador)

Aos meus pais Teresinha e Sebastião.

Aos meus irmãos Luciana, Valéria e Victor e à minha sobrinha Brenda.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que me deu forças para alcançar meus objetivos e fazer um bom trabalho.

Aos meus pais Teresinha e Sebastião e aos meus irmãos Luciana, Valéria e Victor, pelo apoio incondicional e, acima de tudo, pelo afeto e encorajamento.

Ao meu tio Jader, pelo apoio e confiança.

Ao meu avô, pelo incentivo e carinho em todos os momentos.

À Universidade Federal de Viçosa, em particular ao Departamento de Fitotecnia, pela oportunidade concedida para a realização desse curso.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Professor Lino Roberto Ferreira, pela orientação, confiança e amizade.

Aos professores Antonio Alberto da Silva e Paulo Roberto Cecon, pelos conselhos e pelas sugestões, que contribuíram para realização deste trabalho.

Aos amigos Aline, Barbosa, Edinho, Rita e Waguinho, pela amizade e pelo companheirismo em todos os momentos.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

ALESSANDRA FERREIRA BELO, filha de Sebastião Belo da Costa e Teresinha Ferreira Belo, nasceu em Bom Jesus do Itabapoana, Estado do Rio de Janeiro, no dia 25 de julho de 1975.

Em janeiro de 2004, graduou-se em Engenharia Agrônômica pela Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, Brasil.

Em março de 2004, iniciou o Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, em nível de Mestrado, na Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, Brasil, submetendo-se à defesa de tese em maio de 2006.

ÍNDICE

RESUMO.....	vii
ABSTRACT.....	viii
INTRODUÇÃO GERAL.....	01
LITERATURA CITADA.....	03
FITORREMEDIAÇÃO DE SOLO ADUBADO COM COMPOSTO ORGÂNICO E CONTAMINADO COM TEBUTHIURON.....	04
Resumo.....	04
Abstract.....	05
Introdução.....	06
Material e Métodos.....	07
Resultados e Discussão.....	09
Literatura Citada.....	18
FITORREMEDIAÇÃO DE SOLO ADUBADO COM COMPOSTO ORGÂNICO E CONTAMINADO COM TRIFLOXYSULFURON-SODIUM.....	21
Resumo.....	21
Abstract.....	22
Introdução.....	23
Material e Métodos.....	24
Resultados e Discussão.....	26
Literatura Citada.....	34
EFEITO DA UMIDADE DO SOLO SOBRE A CAPACIDADE DE <i>Canavalia ensiformis</i> E <i>Stizolobium aterrimum</i> DE REMEDIAR SOLOS CONTAMINADOS COM HERBICIDAS...	36
Resumo.....	36
Abstract.....	38
Introdução.....	39

Material e Métodos.....	40
Resultados e Discussão.....	43
Literatura Citada.....	54
CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	56

RESUMO

BELO, Alessandra Ferreira, M. S., Universidade Federal de Viçosa, maio de 2006.
Técnicas para fitorremediação de solo contaminado com herbicidas. Orientador:
Lino Roberto Ferreira. Conselheiros: Antonio Alberto da Silva e Paulo Roberto Cecon.

Objetivou-se neste trabalho, por meio de três experimentos, avaliar os efeitos da umidade e do conteúdo de composto orgânico sobre a remediação de solos tratados com os herbicidas tebuthiuron e trifloxysulfuron-sodium, pelas espécies vegetais *Canavalia ensiformis* e *Stizolobium aterrimum*. No primeiro experimento, avaliou-se a remediação de substratos (solos com diferentes teores de composto orgânico) tratados com tebuthiuron e, no segundo, dos mesmos substratos tratados com trifloxysulfuron-sodium, pelas espécies *C. ensiformis* e *S. aterrimum*. No terceiro experimento foi avaliado o efeito de diferentes níveis de umidade em solo tratado com o herbicida tebuthiuron ou trifloxysulfuron-sodium sobre a capacidade remediadora das mesmas espécies vegetais utilizadas nos experimentos 1 e 2. Constatou-se que a adição de composto orgânico em solo contaminado com trifloxysulfuron-sodium e tebuthiuron promoveu maior crescimento das espécies remediadoras. Todavia, a adição de composto orgânico e/ou a variação do nível de umidade no solo não interferiram na capacidade remediadora do solo tratado com trifloxysulfuron-sodium pelas espécies vegetais *C. ensiformis* e *S. aterrimum*. Esta última foi mais eficiente na descontaminação do solo com tebuthiuron, comparada à primeira.

ABSTRACT

BELO, Alessandra Ferreira, M. S., Universidade Federal de Viçosa, May of 2006.
Techniques for phytoremediation of soil contaminated with herbicide. Advisor:
Lino Roberto Ferreira. Committee Members: Antonio Alberto da Silva and Paulo
Roberto Cecon.

Three experiments were carried out in order to evaluate the effects of humidity and organic content on remediation of soil treated with tebuthiuron and trifloxysulfuron-sodium, by using two vegetable species, *Canavalia ensiformis* and *Stizolobium aterrimum*. On the first trial, remediation of substrates treated with tebuthiuron was evaluated. On the second one, the same substrates, treated with trifloxysulfuron-sodium, were evaluated. On the third one, it was evaluated the effect of different levels of humidity in soil treated with tebuthiuron or trifloxysulfuron-sodium on remediating capacity of the species evaluated. Adding organic content to soil contaminated with trifloxysulfuron-sodium and tebuthiuron provided higher growth of remediating species. Though, adding organic content and/or humidity level variation on soil did not interfered on remediating capacity of soil. *S. aterrimum* was more efficient on soil decontamination with tebuthiuron, compared to *C. ensiformis*.

INTRODUÇÃO GERAL

A fitorremediação consiste na capacidade que algumas espécies vegetais possuem de acelerar a retirada de compostos tóxicos, como herbicidas, do ambiente (solo e água), promovendo sua descontaminação (Cunningam et al., 1996).

Uma das características necessárias à espécie remediadora é ser tolerante a altos níveis do contaminante no ambiente a ser remediado. Essa tolerância das espécies vegetais pode ser resultante de processos como a translocação diferencial de compostos orgânicos para outros tecidos da planta, com subsequente volatilização, ou da degradação parcial ou completa, com transformação em compostos menos tóxicos, combinados e/ou ligados nos tecidos das plantas (Accioly & Siqueira, 2000).

Essa técnica é muito difundida nos Estados Unidos e na Europa, onde se utilizam espécies com comprovada eficiência para descontaminação de solos contaminados por metais pesados (Radin, 2000; Accioly & Siqueira, 2000). Estudos relacionados com a fitorremediação de solos contaminados por herbicidas têm sido feitos em função dos problemas ocasionados principalmente pelo longo período residual desses produtos no solo, podendo prejudicar o desenvolvimento de culturas sucessivas (denominado *carryover*).

Os herbicidas tebuthiuron e trifloxysulfuron-sodium, recomendados para uso nas culturas de cana-de-açúcar e algodão, respectivamente, têm deixado resíduos no solo para culturas como feijão e soja em plantio sucessivo a essas culturas, reduzindo as possibilidades de melhor uso do solo pelos agricultores.

A persistência de um herbicida no solo depende de suas propriedades físico-químicas, como solubilidade em água e pressão de vapor, da sua interação com o solo e

de mudanças estruturais, as quais determinam sua degradação, bem como da presença de outros compostos orgânicos no solo (Lavorenti, 1996). Essa associação de fatores pode aumentar a sorção do herbicida no solo, indisponibilizando-o, ou ativando a sua microbiota, levando ao aumento de sua degradação (Prata & Lavorenti, 2000). A capacidade de o solo adsorver substâncias orgânicas é determinada diretamente pelas suas características físico-químicas, a saber: teor de matéria orgânica, tipo e quantidade de argila presente e pH, devendo ser estes fatores bem estudados no contexto da contaminação do solo. O tempo de contato com o solo e o fluxo de água através do perfil são também de grande importância na persistência e no espalhamento dos contaminantes no solo (Accioly & Siqueira, 2000).

Quanto à possibilidade de utilizar espécies vegetais para remediação de solos, diversos trabalhos relatam a utilização de leguminosas para esse fim, pois, além de essas espécies serem tolerantes a diversos herbicidas, podem ainda liberar exsudatos radiculares, que atuam ativando a microbiota do solo na decomposição dos compostos orgânicos aplicados. Além disso, as leguminosas ainda apresentam outras características agrônomicas, como produção de elevada biomassa fresca e seca, e fixação do nitrogênio atmosférico, o que contribui para maior ganho de matéria orgânica do solo, altamente desejável ao sistema produtivo.

Dentre as espécies de plantas selecionadas com potencial para fitorremediação de tebuthiuron, *Stizolobium aterrimum* e *Canavalia ensiformis* estão entre as que apresentam maior tolerância a esse herbicida (Pires, 2003). Também Procópio et al. (2005) avaliaram 15 espécies de adubos verdes, visando fitorremediação de solo contaminado com trifloxysulfuron-sodium. Concluíram que apenas *C. ensiformis* e *S. aterrimum* apresentaram desenvolvimento satisfatório em solo contaminado com até duas vezes a dose comercialmente recomendada desse herbicida ($15,0 \text{ g ha}^{-1}$), portanto, com potencial de uso para remediação do trifloxysulfuron-sodium.

Procurando otimizar o processo de descontaminação de solos tratados com os herbicidas tebuthiuron e trifloxysulfuron-sodium, por meio do processo de fitorremediação, objetivou-se neste trabalho avaliar os efeitos da umidade e da adição de composto orgânico no solo sobre a eficiência na remediação pelas espécies *Canavalia ensiformis* e *Stizolobium aterrimum*.

LITERATURA CITADA

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. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1. p. 299-352.

CUNNINGHAM, S. D.; ANDERSON, T. A.; SCHWAB, A. P. Phytoremediation of soils contaminated with organic pollutants. **Adv. Agron.**, 56: 55-114. 1996.

LAVORENTI, A. Comportamento dos herbicidas no meio ambiente. In: WORKSHOP SOBRE BIODEGRADAÇÃO, Jaguariúna, 1996. **Anais**. Campinas: 1996. p.81-115.

PIRES, F.R. **Seleção de espécies vegetais para fitorremediação de solos contaminados com tebuthiuron**. 2003. 65f. Tese (Doutorado em Fitotecnia). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2003.

PRATA, F.; LAVORENTI, A. Comportamento de herbicidas no solo: influência da matéria orgânica. Disponível em: <http://www.unitau.br/prppg/publica/biocienc/downloads/comportamentoherbicida-N2-2000.pdf/html> Acesso em: 07/10/2005.

PROCÓPIO, S.O.; SANTOS, J.B.; SILVA, A.A.; PIRES, F.R.; RIBEIRO JUNIOR, J.I.; SANTOS, E.A. Potencial de espécies vegetais para a remediação do herbicida trifloxysulfuron-sodium. **Planta Daninha**, v.23, n.1, p.9-16, 2005.

RADIN, J.W. Using superplants to clean up our environment. **Agric. Res.**, v.48, <<http://www.ars.usda.gov/is/AR/archive/jun00/.2000>>.

FITORREMEDIAÇÃO DE SOLO ADUBADO COM COMPOSTO ORGÂNICO E CONTAMINADO COM TEBUTHIURON

RESUMO

Objetivou-se, neste trabalho, avaliar a capacidade remediadora das espécies vegetais feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*) e mucuna-preta (*Stizolobium aterrimum*), em solo adubado com composto orgânico e contaminado com o herbicida tebuthiuron. O trabalho foi conduzido em duas etapas. Na primeira, avaliou-se o crescimento de *C. ensiformis* e *S. aterrimum* nos diferentes substratos, contaminados ou não com herbicida. Os tratamentos foram compostos pela combinação entre duas doses do herbicida tebuthiuron (0,0 e 1.000,0 g ha⁻¹) e cinco teores de composto orgânico: 0, 25, 50, 100 e 200 m³ ha⁻¹ (equivalentes a 0; 1,25; 2,5; 5; e 10% do volume de solo em cada vaso, respectivamente), dispostos em esquema fatorial 2 x 5, sob delineamento inteiramente casualizado, com três repetições, para cada espécie remediadora. Após preparo do substrato e enchimento dos vasos, aplicou-se à superfície do solo o herbicida. Um dia após essa aplicação, procedeu-se à semeadura das espécies remediadoras. Nessa mesma época, utilizaram-se, como testemunha, vasos sem planta remediadora, porém com os mesmos teores de composto orgânico e com aplicação do herbicida mantidos nas mesmas condições daqueles com plantas remediadoras. Estas foram colhidas 60 dias depois. Nessa ocasião, avaliou-se a altura e a massa seca da parte aérea (MSPA) dessas espécies. Todo o material colhido foi triturado e incorporado ao solo dos seus respectivos vasos. Na segunda etapa, avaliou-se a capacidade remediadora

de *C. ensiformis* e *S. aterrimum*. Os tratamentos foram compostos pela combinação entre cinco teores de composto orgânico e cinco tipos de cultivo prévio: cultivo de *C. ensiformis* e *S. aterrimum* na presença e ausência do herbicida tebuthiuron e um tratamento sem cultivo prévio e com aplicação de tebuthiuron, dispostos em esquema fatorial 5 x 5, sob delineamento inteiramente casualizado, com três repetições. Amostras de 0,5 kg de solo foram retiradas dos vasos (6 L) utilizados na primeira etapa e colocadas em vasos de 0,5 L. Em seguida, cultivou-se soja (*Glycine max*) para indicação de resíduo do herbicida no solo. Essas plantas foram colhidas 20 dias após, época em que se avaliou altura, MSPA e grau de intoxicação destas pelo herbicida. *S. aterrimum* foi mais eficiente na redução do resíduo de tebuthiuron do que *C. ensiformis*. Nas duas espécies, a capacidade remediadora aumentou com o teor de composto orgânico adicionado ao solo.

Palavras-chave: *Canavalia ensiformis*, *Stizolobium aterrimum*, descontaminação.

PHYTOREMEDIATION OF SOIL FERTILIZED WITH ORGANIC CONTENT AND CONTAMINATED WITH TEBUTHIURON

ABSTRACT

This study aimed to evaluate remediating capacity of *Canavalia ensiformis* and *Stizolobium aterrimum* in soil fertilized with organic content and contaminated with tebuthiuron, in an experiment divided into two stages. In the first one, it was evaluated growth of *C. ensiformis* and *S. aterrimum* in different substrates, contaminated or not with herbicide. Treatments were composed by combination of two tebuthiuron rates (0.0 and 1000.0 g ha⁻¹) and five teor of organic content (0.25, 50, 100 and 200 m³ ha⁻¹), arranged in a factorial scheme 2 x 5, in a completely randomized design, with three replicates for each specie. Herbicide was applied on soil surface after preparing the substrate and filling the pots, and one day after it, the species were sowed. At this stage, pots with same teor of organic content and under same conditions, but without remediating plants, were used as control. After 60 days, plants were harvested to evaluate high and dry matter of ground tissue. All material was triturated and incorporated to soil of their respective pots. In the second stage, it was evaluated

remediating capacity of *C. ensiformis* and *S. aterrimum*. Treatments were composed by five teor of organic content and five types of prior cultivation, arranged in a factorial scheme 5 x 5, in a completely randomized design, with three replicates. From pots used before, samples of 0.5 kg of soil were taken out and put in pots of 0.5 L, then, soybean (*Glycine max*) was cultivated to indicate herbicide residue on soil. After 20 days, these plants were harvested in order to evaluate height, dry matter of ground tissue and intoxication level. *S. aterrimum* was more efficient on tebuthiuron than *C. ensiformis*. Higher teor of organic content provided higher remediating capacity, in both species.

Key words: *Canavalia ensiformis*, *Stizolobium aterrimum*, decontamination.

INTRODUÇÃO

Herbicidas com longo período residual no solo, embora tenham a vantagem de permitir o controle das plantas daninhas por um período maior, reduzindo o número de aplicações, podem provocar intoxicação em culturas sucessivas (*carryover*). Quando a molécula de um herbicida chega ao solo, ela pode ser degradada por processos químicos ou biológicos ou ser sorvida aos colóides do solo. A sorção e a degradação do herbicida irão definir a disponibilidade do produto na solução do solo para ser absorvido pelas plantas ou ser lixiviado para camadas subsuperficiais do solo, podendo atingir os cursos de água subterrâneos, ou a formação de resíduos conjugados (Prata & Lavorenti, 2000).

A fitorremediação é uma técnica que envolve, além do emprego de plantas, sua microbiota associada e amenizantes, como a matéria orgânica do solo, associados a práticas agronômicas que agem em conjunto, removendo, imobilizando ou tornando os contaminantes inofensivos ao ecossistema (Accioly & Siqueira, 2000). A fitorremediação de solos tratados com herbicidas vem sendo estudada em muitos países e também no Brasil, tendo-se observado resultados altamente promissores (Anderson et al., 1994; Rice et al., 1997; Wilson et al., 2000; Pires et al., 2003a, b, c; Procópio et al., 2004, 2005; Santos et al., 2004a, b).

Dentre os herbicidas que apresentam longo período residual muito utilizados no Brasil, destaca-se o tebuthiuron, que é recomendado para uso em pré-emergência na cultura da cana-de-açúcar. Esse herbicida causa intoxicação às culturas intercalares ou

rotacionais quando cultivadas até dois anos após a sua última aplicação. Sua persistência no solo com boa a ótima fertilidade pode variar de 12 a 15 meses em regiões com precipitação pluvial anual entre 1.020 e 1.520 mm e consideravelmente superior nas mais secas e com teor de matéria orgânica elevado. É fortemente adsorvido à argila e aos solos com alta capacidade de troca catiônica (Rodrigues & Almeida, 2005).

Em solos altamente intemperizados, a matéria orgânica constitui o principal contribuinte para a CTC, pois reduz as amplitudes de variação da temperatura e umidade do solo (Weed et al., 1995; Reddy et al., 1995). Quando qualquer tipo de material orgânico é adicionado a um solo em que foi aplicado herbicida, esse material poderá influenciar o comportamento desse produto no solo, pois a matéria orgânica influencia a sorção e a atividade da microbiota do solo, podendo evidenciar melhor a capacidade remediadora que algumas espécies vegetais possuem (Prata & Lavorenti, 2000).

Objetivou-se com este trabalho avaliar o efeito da adição de composto orgânico ao solo sobre a capacidade remediadora das espécies vegetais *Canavalia ensiformis* e *Stizolobium aterrimum*, em descontaminar solo tratado com o herbicida tebuthiuron.

MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho, desenvolvido em casa de vegetação, foi conduzido em duas etapas. Na primeira etapa, visando avaliar o crescimento das espécies remediadoras em diferentes substratos, após o enchimento dos vasos com solo enriquecido com teores de composto orgânico: 0, 25, 50, 100 e 200 m³ ha⁻¹ (equivalentes a 0; 1,25; 2,5; 5; e 10% do volume de solo em cada vaso, respectivamente) e tratados com tebuthiuron (0,0 e 1.000,0 g ha⁻¹), fez-se a semeadura das espécies remediadoras (*Canavalia ensiformis* e *Stizolobium aterrimum*). Nessa mesma época, vasos sem planta remediadora, porém com os mesmos teores de composto orgânico e com aplicação do herbicida, foram mantidos nas mesmas condições daqueles com plantas remediadoras. Para avaliação do crescimento das plantas, cada conjunto de vasos com uma espécie remediadora foi considerado um experimento disposto em esquema fatorial 2 x 5 (duas doses do herbicida e cinco teores de composto orgânico), sob delineamento inteiramente casualizado, com três repetições. As características do composto orgânico adicionado ao

solo são apresentadas na Tabela 1. Utilizaram-se vasos com capacidade para 6 L, preenchidos com solo cuja caracterização química e física é apresentada na Tabela 2. A semeadura das espécies remediadoras foi realizada um dia após a aplicação do herbicida; após a emergência destas, foi feito o desbaste, deixando-se três plantas por vaso. Aos 60 dias após a semeadura (DAS), as plantas foram cortadas rente ao solo, sendo avaliadas a altura e massa seca da parte aérea (MSPA) após secagem das plantas em estufa (70 °C por 72 h). Durante o período de condução do experimento manteve-se a umidade do solo a 80% da capacidade de campo, por meio de pesagens diárias dos vasos com reposição da água consumida. A parte aérea das plantas remediadoras, após secagem, avaliação e moagem, foi devolvida ao respectivo vaso, em razão da possibilidade da presença do herbicida na parte aérea dessas plantas.

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância. A comparação de médias entre as doses do herbicida, dentro de cada nível de composto orgânico no solo e para cada espécie, foi realizada por meio do teste F a 5% de probabilidade, e o efeito da adição de composto orgânico no solo para cada dose do herbicida, por regressão. Os modelos foram escolhidos com base na significância dos coeficientes de regressão, utilizando-se o teste “t” a 5% de probabilidade, no fenômeno biológico e no coeficiente de determinação (r^2).

Na segunda etapa, avaliou-se a capacidade remediadora de *C. ensiformis* e *S. aterrimum*, verificando-se o nível de descontaminação a partir da primeira etapa. Os tratamentos avaliados foram compostos pela combinação entre cinco teores de composto orgânico e cinco tipos de cultivo prévio: cultivo de mucuna-preta (*Stizolobium aterrimum*) e feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*) na presença e ausência do herbicida tebuthiuron e um tratamento sem cultivo prévio e com aplicação de tebuthiuron, dispostos em esquema fatorial 5 x 5, sob delineamento inteiramente casualizado, com três repetições. Amostras de 0,5 kg de solo foram retiradas dos vasos (6 L) utilizados na primeira etapa e colocadas em vasos de 0,5 L. Em seguida, cultivou-se soja (*Glycine max*) para indicação de resíduo do tebuthiuron. Aos 20 DAS, fez-se a avaliação do grau de intoxicação dessas plantas pelo herbicida (atribuindo-se notas variando de zero, para ausência de intoxicação, a 100, para morte da planta). Nessa ocasião, determinou-se ainda a altura e a massa seca da parte aérea das plantas de soja.

Os dados referentes à espécie indicadora (soja) foram submetidos à análise de variância. A comparação de médias entre os tipos de cultivo prévio, dentro de cada nível de composto orgânico no solo, foi realizada por meio do teste de Tukey a 5% de

probabilidade, e o efeito da adição de composto orgânico no solo para cada tipo de cultivo prévio, por regressão. Os modelos foram escolhidos com base na significância dos coeficientes de regressão, utilizando-se o teste “t” a 5% de probabilidade, no fenômeno biológico e no coeficiente de determinação (r^2).

Tabela 1 - Concentrações de nutrientes observadas no composto orgânico utilizado no experimento

Umidade (65 °C) = 60,09%					C total = 13,72%				
-----Dados base seca (umidade 65 °C)-----									
pH	Ca	Mg	K	P	N	Cu	Zn	Mn	Fe
6,57	----- dag kg ⁻¹ -----				-----mg kg ⁻¹ -----				
	2,63	0,59	0,40	2,00	1,03	51,8	285,0	45,1	9176,0

Análises realizadas no Laboratório de Matéria Orgânica do Solo do Departamento de Solos da UFV.

Tabela 2 - Composição físico-química de amostra do solo Argissolo Vermelho-Amarelo utilizado no experimento

Análise granulométrica (dag kg ⁻¹)										
Argila	Silte	Areia fina	Areia grossa	Classificação textural						
39	11	17	33	Argilo-arenosa						
Análise Química										
pH	P	K ⁺	H + Al	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	CTC _{total}	V	M	MO
H ₂ O	mg dm ⁻³		cmol _c dm ⁻³				%		dag kg ⁻¹	
5,0	0,6	18	5,94	1,1	0,1	0,0	6,09	2	88	2,18

Análises realizadas nos Laboratórios de Análises Físicas e Químicas de Solo do Departamento de Solos da UFV, segundo a metodologia descrita pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária-EMBRAPA (1997).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Plantas de *C. ensiformis* cultivadas no solo sem adição de composto orgânico ou com a adição de apenas 25 m³ ha⁻¹ apresentaram intoxicação severa provocada pelo herbicida tebuthiuron e não sobreviveram até 60 DAS. Aquelas cultivadas em substratos com adições de composto em dose igual ou superior a 50 m³ ha⁻¹ tiveram melhor crescimento, porém apresentaram valores de altura e MSPA inferiores aos produzidos

por plantas cultivadas em substratos livres da aplicação desse herbicida (Tabela 3). Quanto à espécie *S. aterrimum*, esta sobreviveu até 60 DAS em todos os substratos, estando este contaminado ou não pelo herbicida. Todavia, quando se adicionou ao solo uma dose de composto orgânico de 200 m³ ha⁻¹, a altura e a MSPA foram semelhantes às produzidas no solo sem herbicida (Tabela 4), evidenciando que o tebuthiuron pode ser mais facilmente indisponibilizado no solo com elevado teor de composto orgânico e que esta espécie tem maior tolerância ao tebuthiuron do que *C. ensiformis*.

Tabela 3 – Valores médios de altura e massa seca da parte aérea de plantas de *Canavalia ensiformis* cultivadas em solo adubado com diferentes teores de composto orgânico, com e sem aplicação de tebuthiuron, e os respectivos coeficientes de variação

Composto orgânico (m ³ ha ⁻¹)	Altura das plantas (cm)		Massa seca da parte aérea (g)	
	<i>Tebuthiuron</i>	<i>Sem herbicida</i>	<i>Tebuthiuron</i>	<i>Sem herbicida</i>
0	0,00 b	56,67 a	0,00 b	23,01 a
25	0,00 b	58,83 a	0,00 b	27,12 a
50	9,67 b	56,67 a	3,95 b	27,62 a
100	16,67 b	71,67 a	12,28 b	29,97 a
200	29,01 b	85,67 a	13,96 b	32,75 a
CV (%)	17,77		14,51	

Médias seguidas de mesma letra, na linha, para cada variável, não diferem entre si pelo teste F a 5% de probabilidade.

Tabela 4 - Valores médios de altura e massa seca da parte aérea de plantas de *Stizolobium aterrimum* cultivadas em solo adubado com diferentes teores de composto orgânico, com e sem aplicação de tebuthiuron, e os respectivos coeficientes de variação

Composto orgânico (m ³ ha ⁻¹)	Altura das plantas (cm)		Massa seca da parte aérea (g)	
	<i>Tebuthiuron</i>	<i>Sem herbicida</i>	<i>Tebuthiuron</i>	<i>Sem herbicida</i>
0	35,66 b	140,67 a	4,88 b	12,64 a
25	76,33 b	182,00 a	7,38 b	15,80 a
50	99,67 b	183,33 a	9,58 b	17,44 a
100	169,35 a	181,00 a	11,33 b	17,64 a
200	179,33 a	196,67 a	17,45 a	19,65 a
CV (%)	9,50		13,07	

Médias seguidas de mesma letra, na linha, para cada variável, não diferem entre si pelo teste F a 5% de probabilidade.

A resposta de *C. ensiformis* à adubação orgânica do solo foi linear tanto para altura de plantas quanto para MSPA na ausência e na presença do tebuthiuron, evidenciando que a adição de composto orgânico no solo contribuiu para melhor crescimento dessa espécie (Figuras 1 e 2). No solo contaminado com tebuthiuron, a adição de composto orgânico proporcionou ganho relativo maior de altura e MSPA de *C. ensiformis*, quando comparado ao solo sem herbicida; contudo, na ausência de herbicida, a altura e a MSPA total foram maiores (Figuras 1 e 2). A resposta observada para *C. ensiformis* somente foi significativa com adições de composto orgânico ao solo em dose igual ou superior a 50 m³ ha⁻¹, na presença do tebuthiuron (Tabela 3).

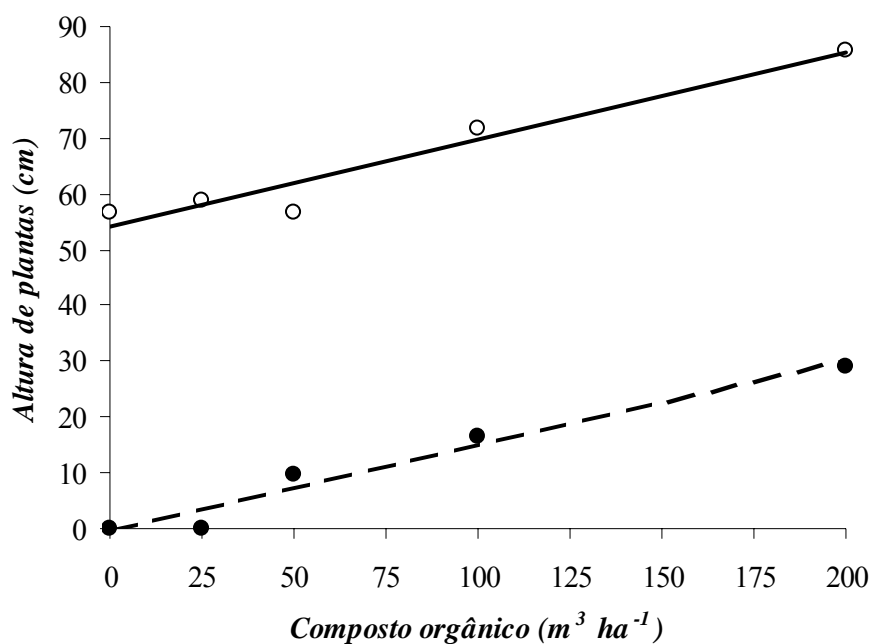


Figura 1 – Estimativa e valor observado da altura de plantas de *Canavalia ensiformis* cultivadas em solo com e sem aplicação de tebuthiuron, em função da adubação do solo com diferentes teores de composto orgânico (C). (com herbicida: ● – $\hat{Y} = 0,149694 \cdot C$, $r^2 = 0,98$; e sem herbicida: ○ – $\hat{Y} = 56,7 + 0,146667 \cdot C$, $r^2 = 0,98$).

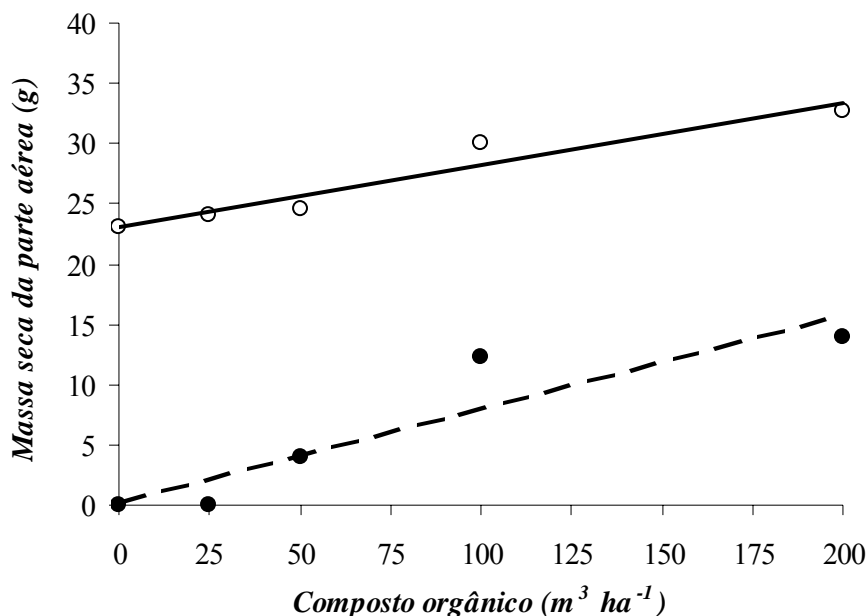


Figura 2 - Estimativa e valor observado da massa seca da parte aérea de plantas de *Canavalia ensiformis* cultivadas em solo com e sem aplicação de tebuthiuron, em função da adubação do solo com diferentes teores de composto orgânico (C). (com herbicida: ● – $\hat{Y} = 0,079388 * C$, $r^2 = 0,93$; e sem herbicida: ○ – $\hat{Y} = 24,882 + 0,042829 * C$, $r^2 = 0,70$).

Quanto a *S. aterrimum*, verificou-se que a adição de composto orgânico ao solo apenas afetou o crescimento dessa espécie quando o solo havia sido tratado com tebuthiuron. Considerando a altura de plantas, a resposta de *S. aterrimum* aos níveis de adubação do solo com o composto orgânico foi quadrática. O maior valor de altura obtido (186,51 cm) foi com a adição de 167,22 m³ ha⁻¹ de composto orgânico ao solo; verificou-se resposta linear para a produção de MSPA com o incremento do nível de adubação orgânica (Figuras 3 e 4).

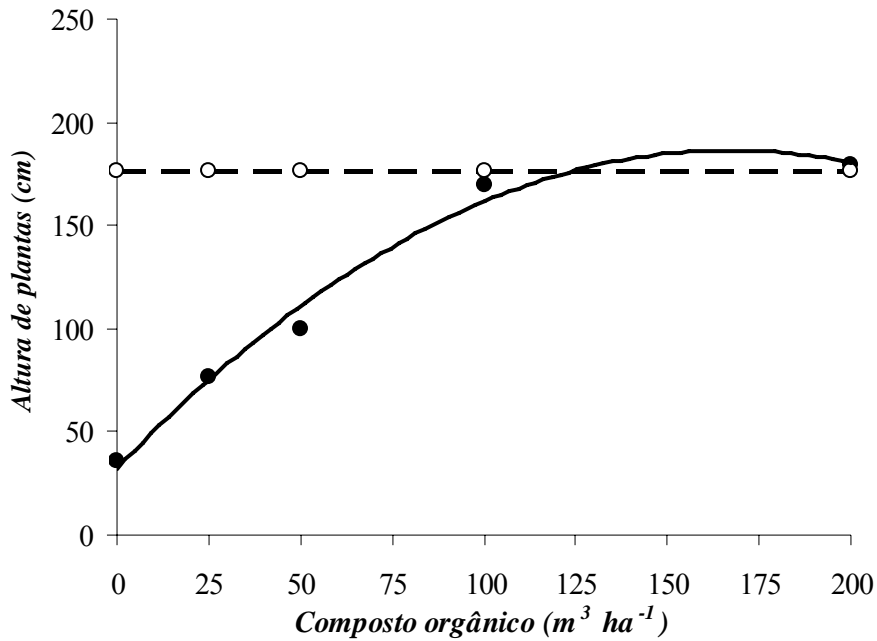


Figura 3 - Estimativa e valor observado da altura de plantas de *Stizolobium aterrimum* cultivadas em solo com e sem aplicação de tebuthiuron, em função da adubação do solo com diferentes teores de composto orgânico (C). (com herbicida: ● - $\hat{Y} = 32,3669 + 1,84357 \cdot C - 0,00551211 \cdot C^2$, $r^2 = 0,99$; e sem herbicida: ○ - $\hat{Y} = 176,73$ cm).

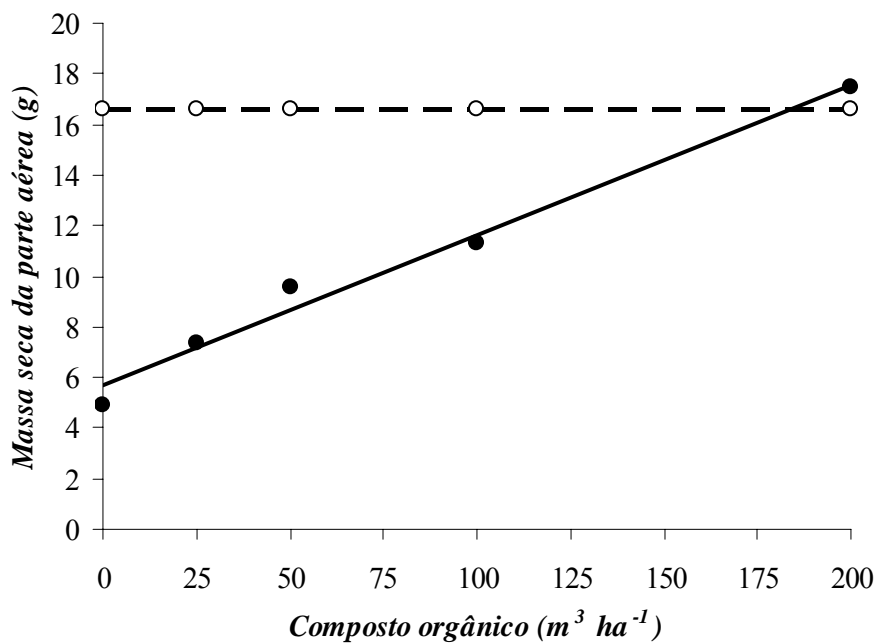


Figura 4 - Estimativa e valor observado da massa seca da parte aérea de plantas de *Stizolobium aterrimum* cultivadas em solo com e sem aplicação de tebuthiuron, em função da adubação do solo com diferentes teores de composto orgânico (C). (com herbicida: ● - $\hat{Y} = 5,65442 + 0,0596033 \cdot C$, $r^2 = 0,95$; e sem herbicida: ○ - $\hat{Y} = 16,63$ cm).

O composto orgânico adicionado ao solo, além de favorecer a sorção de herbicidas, pode facilitar a degradação desses compostos, seja pela maior atividade do colóide do solo ou pela maior presença de microrganismos responsáveis pela degradação junto à rizosfera (fitoestimulação) (Cunningham et al., 1996). Anderson et al. (1994) demonstraram que a taxa de degradação de atrazine, metolachlor e trifluralin foi maior em solos rizosféricos de *Kochia scoparia* que em solos não-vegetados.

Neste trabalho, o aumento da matéria orgânica pode ter proporcionado maior crescimento da planta remediadora e dos microrganismos responsáveis pela degradação microbiológica do tebuthiuron, o que explica a menor persistência desse herbicida em solos de boa a ótima fertilidade. Por ser a matéria orgânica um dos principais componentes do solo que contribui para a sorção do tebuthiuron, a redução da disponibilidade desse herbicida na solução do solo permite o crescimento da planta remediadora e, conseqüentemente, o aumento de sua atividade rizosférica, estimulando a ação microbiana provocada pela liberação de exsudatos que favorecem o aumento da mineralização do contaminante na região da rizosfera (Accioly & Siqueira, 2000; Scramin et al., 2001).

Analisando o crescimento da soja (planta indicadora em solo contaminado com resíduo do tebuthiuron) cultivada em sucessão ou não a *C. ensiformis* e *S. aterrimum*, comprova-se o poder remediador dessas espécies.

O solo contaminado com tebuthiuron, sem incorporação de composto orgânico e sem cultivo prévio com *C. ensiformis* ou *S. aterrimum*, impossibilitou o crescimento da soja. A altura de plantas de soja em solo remediado por *S. aterrimum* diferiu da resposta observada em solo sem cultivo prévio; no entanto, o mesmo não ocorreu para o solo remediado por *C. ensiformis*, diferindo somente no solo com maior nível de composto orgânico adicionado ($200 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$). A intoxicação em plantas de soja foi menor em solo remediado por *S. aterrimum* quando comparada àquele remediado por *C. ensiformis*, independentemente do teor de composto orgânico adicionado (Tabela 5), evidenciando ser *S. aterrimum* mais eficiente na remediação de resíduo do tebuthiuron no solo.

Tabela 5 – Valores médios de massa seca da parte aérea (MSPA), altura e intoxicação de plantas de soja aos 20 dias após semeadura, cultivadas em solo adubado com diferentes teores de composto orgânico, com e sem aplicação de tebuthiuron, remediados ou não por *Canavalia ensiformis* e *Stizolobium aterrimum* por 60 dias após aplicação do herbicida, com os respectivos coeficientes de variação

Característica avaliada	Composto orgânico (m ³ ha ⁻¹)	<i>Canavalia ensiformis</i>		<i>Stizolobium aterrimum</i>		<i>Sem cultivo prévio</i>
		<i>Tebuthiuron</i>	<i>Sem herbicida</i>	<i>Tebuthiuron</i>	<i>Sem herbicida</i>	<i>Tebuthiuron</i>
MSPA (g)	0	0,317 b	0,696 a	0,303 b	0,740 a	0,000 c
	25	0,313 b	0,807 a	0,323 b	0,923 a	0,050 c
	50	0,330 b	0,893 a	0,390 b	0,877 a	0,155 b
	100	0,380 b	0,901 a	0,383 b	0,893 a	0,180 b
	200	0,457 b	1,107 a	0,407 b	0,960 a	0,212 b
CV (%)		-----21,20-----				
Altura (cm)	0	16,47 b c	23,10 a b	14,73 c	24,03 a	0,00 d
	25	13,73 b c	25,53 a	15,67 b	25,63 a	7,17 c
	50	17,27 b c	25,50 a	19,50 a b	24,03 a b	11,17 c
	100	16,07 c d	24,20 a b	17,33 b c	25,53 a	8,83 d
	200	17,90 c	27,67 a	19,70 b c	25,87 a b	9,83 d
CV (%)		-----17,37-----				
Intoxicação (%)	0	95,33 a	0,00 c	86,67 b	0,00 c	100,00 a
	25	97,00 a	0,00 c	85,00 b	0,00 c	99,67 a
	50	92,67 a	0,00 c	46,67 b	0,00 c	98,00 a
	100	51,67 b	0,00 d	36,67 c	0,00 d	95,00 a
	200	45,00 b	0,00 d	33,33 c	0,00 d	90,00 a
CV (%)		-----7,37-----				

Médias seguidas de mesma letra, em cada linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Nas Figuras 5 e 6 observa-se o efeito da adição de composto orgânico sobre MSPA e intoxicação das plantas de soja pelo tebuthiuron. Embora a literatura mostre a capacidade da matéria orgânica em adsorver o tebuthiuron (Meyer & Bovey, 1988; Souza et al., 2001), reduzindo sua disponibilidade na solução do solo e permitindo maior crescimento das plantas sensíveis, fica evidente também o poder remediador das espécies *C. ensiformis* e *S. aterrimum* em solo contaminado por tebuthiuron.

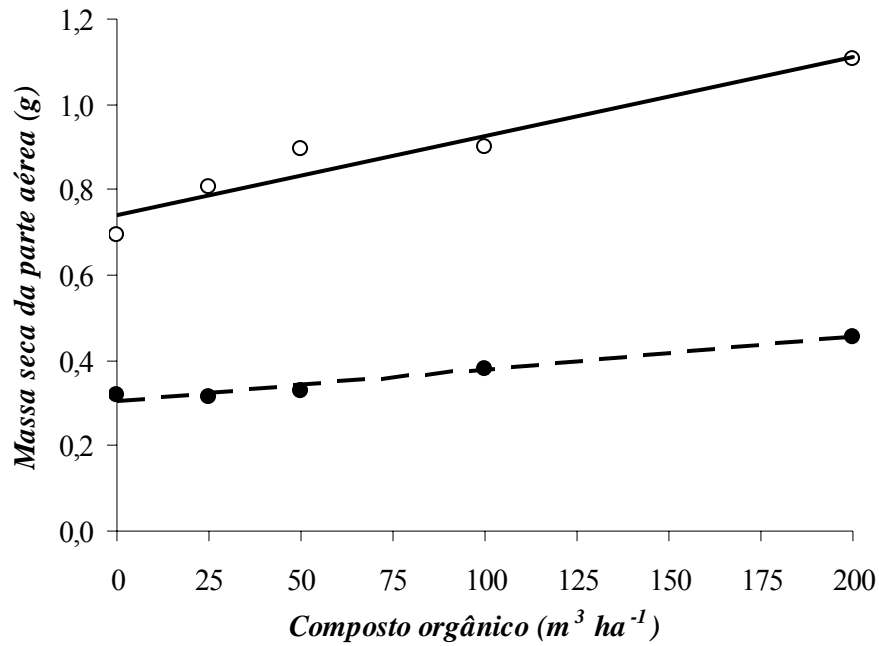


Figura 5 - Estimativa e valor observado da massa seca da parte aérea de plantas de soja cultivadas em solo com e sem aplicação de tebuthiuron, em função da adubação do solo com diferentes teores de composto orgânico (C), após 60 dias de remediação do solo pela espécie *Canavalia ensiformis* (com herbicida: ● – $\hat{Y} = 0,3026 + 0,00079 * C$, $r^2 = 0,96$; e sem herbicida: ○ – $\hat{Y} = 0,742942 + 0,001839 * C$, $r^2 = 0,90$).

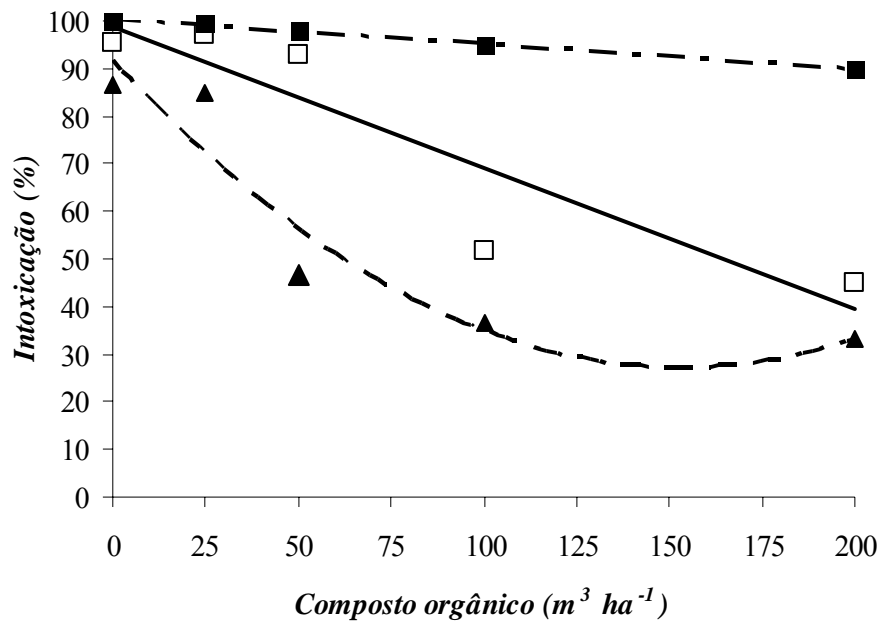


Figura 6 – Estimativa e valor observado da intoxicação de plantas de soja cultivadas em solo com aplicação de tebuthiuron, em função da adubação do solo com diferentes teores de composto orgânico (C), após 60 dias de remediação do solo pelas espécies *Canavalia ensiformis* (□ – $\hat{Y} = 98,5333 - 0,296 * C$, $r^2 = 0,77$), *Stizolobium aterrimum* (▲ – $\hat{Y} = 91,436 - 0,83835C + 0,002739 * C^2$, $r^2 = 0,79$) e sem cultivo prévio de espécies fitorremediadoras (■ – $\hat{Y} = 100,458 - 0,0523333 * C$, $r^2 = 0,99$).

O aumento da dose de composto orgânico adicionado ao solo, para cada tipo de cultivo prévio, foi significativo para o índice de intoxicação da soja quando o substrato foi tratado com o tebuthiuron (Tabela 6).

Segundo Pires (2003c), das 20 espécies avaliadas, *S. aterrimum* e *C. ensiformis* estão entre as que apresentam maior tolerância ao tebuthiuron. Essa tolerância possivelmente está ligada à reserva cotiledonar disponível na semente, responsável pelo desenvolvimento inicial da planta. Por serem sementes grandes, estas possuem maior reserva cotiledonar e, com isso, geram plantas que toleram melhor inibidores da fotossíntese, dentro de uma mesma espécie (Silva, 1979). Em trabalho semelhante, agora procurando espécies remediadoras para o trifloxysulfuron-sodium, Procópio et al. (2005) verificaram que, entre 15 espécies de adubos verdes utilizados, somente *C. ensiformis* e *S. aterrimum* possibilitaram o cultivo sequencial de plantas de feijão, sem prejuízos para biomassa, altura e intoxicação da cultura.

Tabela 6 – Equações ajustadas para massa seca da parte aérea, altura e intoxicação de plantas de soja aos 20 dias após semeadura em solo adubado com diferentes teores de composto orgânico (C), com e sem aplicação de tebuthiuron, remediados ou não pelas espécies *Canavalia ensiformis* e *Stizolobium aterrimum* por 60 dias após aplicação do herbicida, com os respectivos coeficientes de determinação

Tratamento	Equação	r ²
Massa seca da parte aérea (g)		
<i>Stizolobium aterrimum</i> na presença de tebuthiuron	$\hat{Y} = 0,361$	-
<i>Stizolobium aterrimum</i> na ausência de tebuthiuron	$\hat{Y} = 0,879$	-
<i>Canavalia ensiformis</i> na presença de tebuthiuron	$\hat{Y} = 0,3026 + 0,00079*C$	0,96
<i>Canavalia ensiformis</i> na ausência de tebuthiuron	$\hat{Y} = 0,742942 + 0,001839*C$	0,90
Sem cultivo prévio e com presença de tebuthiuron	$\hat{Y} = 0,119$	-
Altura de plantas (cm)		
<i>Stizolobium aterrimum</i> na presença de tebuthiuron	$\hat{Y} = 17,39$	-
<i>Stizolobium aterrimum</i> na ausência de tebuthiuron	$\hat{Y} = 25,02$	-
<i>Canavalia ensiformis</i> na presença de tebuthiuron	$\hat{Y} = 16,29$	-
<i>Canavalia ensiformis</i> na ausência de tebuthiuron	$\hat{Y} = 25,20$	-
Sem cultivo prévio e com presença de tebuthiuron	$\hat{Y} = 7,40$	-
Intoxicação (%)		
<i>Stizolobium aterrimum</i> na presença de tebuthiuron	$\hat{Y} = 91,436 - 0,83835C + 0,002739*C^2$	0,79
<i>Stizolobium aterrimum</i> na ausência de tebuthiuron	$\hat{Y} = 0,00$	-
<i>Canavalia ensiformis</i> na presença de tebuthiuron	$\hat{Y} = 98,5333 - 0,296*C$	0,77
<i>Canavalia ensiformis</i> na ausência de tebuthiuron	$\hat{Y} = 0,00$	-
Sem cultivo prévio e com presença de tebuthiuron	$\hat{Y} = 100,458 - 0,0523333*C$	0,99

Concluiu-se que a adição de composto orgânico ao solo contaminado com tebuthiuron aumenta a capacidade remediadora das espécies *Canavalia ensiformis* e *Stizolobium aterrimum*. Todavia, *Stizolobium aterrimum* mostrou-se mais eficiente na descontaminação do solo com residual do tebuthiuron, quando comparada a *Canavalia ensiformis*.

LITERATURA CITADA

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. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1. p. 299-352.

ANDERSON, T. A.; KRUGER, E. L.; COATS, J. R. Enhanced degradation of a mixture of three herbicides in the rhizosphere of a herbicide-tolerant plant. **Chemosphere**, v. 28, p. 1551-7, 1994.

CUNNINGHAM, S. D.; ANDERSON, T. A.; SCHWAB, A. P. Phytoremediation of soils contaminated with organic pollutants. **Adv. Agron.**, v. 56, p. 55-114, 1996.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2° ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212 p.

MEYER, R. E.; BOVEY, R. W. Tebuthiuron formulation and placement effects on response of wood plants and soil residue. **Weed Sci.**, v. 36, p. 373-378, 1988.

PIRES, F.R.; SOUZA, C.M.; SILVA, A.A.; PROCÓPIO, S.O.; FERREIRA, L.R. Fitorremediação de solos contaminados com herbicidas. **Planta Daninha**, v. 21, n.2, p.335-341, 2003a.

PIRES, F.R.; SOUZA, C.M.; SILVA, A.A.; QUEIROZ, M.E.L.R.; PROCÓPIO, S.O.; SANTOS, J.B.; SANTOS, E.A.; CECON, P.R. Seleção de plantas com potencial para fitorremediação de tebuthiuron. **Planta Daninha**, v. 21, n.3, p.451-458, 2003b.

PIRES, F.R. **Seleção de espécies vegetais para fitorremediação de solos contaminados com tebuthiuron**. 2003. 65f. Tese (Doutorado em Fitotecnia)- Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2003c.

PRATA, F.; LAVORENTI, A. Comportamento de herbicidas no solo: influência da matéria orgânica 2000. Disponível em: <http://www.unitau.br/prppg/publica/biocienc/downloads/comportamentoherbicida-N2-2000.pdf/html> Acesso em: 07/10/2005.

PROCÓPIO, S.O.; SANTOS, J.B.; SILVA, A.A.; PIRES, F.R.; RIBEIRO JUNIOR, J.I.; SANTOS, E.A.; FERREIRA, L.R. Seleção de plantas com potencial para fitorremediação de solos contaminados com o herbicida trifloxysulfuron-sodium. **Planta Daninha**, v.22, n.2, p.315-322, 2004.

SILVA, J. F. **Influência do tamanho da semente de soja (*Glycine Max* (L.) Merr.) sobre sua tolerância ao metribuzin e estudos da lixiviação e inativação deste por dois tipos de solos**. 1979. 70f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1979.

PROCÓPIO, S.O.; SANTOS, J.B.; SILVA, A.A.; PIRES, F.R.; RIBEIRO JUNIOR, J.I.; SANTOS, E.A. Potencial de espécies vegetais para a remediação do herbicida trifloxysulfuron-sodium. **Planta Daninha**, v.23, n.1, p.9-16, 2005.

- REDDY, K.N.; ZABLOTOWICZ, R.M.; LOCKE, M.A. Chlorimuron adsorption, desorption and degradation in soils from conventional tillage and no-tillage systems **J. Environ. Quality**, v.24, p.760-767, 1995.
- RICE, P. J.; ANDERSON, T. A.; COATS, J. R. Phytoremediation of herbicide-contaminated surface water with aquatic plants. In: **Phytoremediation of soil and water contaminants**. Washington, DC: American Chemical Society, 1997. p. 133-51.
- RODRIGUES, B. N.; ALMEIDA, F. S. **Guia de herbicidas**. 5 ed. Londrina: Edição dos Autores, 2005. 591p.
- 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.323-330, 2004a.
- SANTOS, J.B.; PROCÓPIO, S.O.; SILVA, A.A.; PIRES, F.R.; RIBEIRO JUNIOR, J.I.; SANTOS, E.A. Seletividade do herbicida trifloxysulfuron sodium para fins de fitorremediação. **Revista Ceres**, v.51, n.293, p.129-142, 2004b.
- SCRAMIN, S.; SKORUPA, L. A.; MELO, I. S. Utilização de plantas na remediação de solos contaminados por herbicidas – levantamento da flora existente em áreas de cultivo de cana-de-açúcar. In: MELO, I. S.; SILVA, C. M. M. S.; SCRAMIN, S.; SPESSOTO, A. **Biodegradação**. Jaguariúna, SP: EMBRAPA Meio Ambiente, 2001. p. 369-71.
- 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. Bras. de Ciência do Solo**, v.25, n.4, p. 1053-1061, 2001.
- WEED, D.A.J.; KANWAR, R.S.; STOLTENBERG, D.E.; PFEIFFER, R.L. Dissipation and distribution of herbicides in the soil profile. **J. Environ. Quality**. v.24, n.1, p.68-79, 1995.
- WILSON, P. C.; WHITWELL, T.; KLAINE, S. J. Phytotoxicity, uptake, and distribution of ¹⁴C-simazine in *Acorus gramineus* and *Pontederia cordata*. **Weed Sci.**, 48: 701-9.2000.

FITORREMEDIAÇÃO DE SOLO ADUBADO COM COMPOSTO ORGÂNICO E CONTAMINADO COM TRIFLOXYSULFURON-SODIUM

RESUMO

Neste trabalho, objetivou-se avaliar a capacidade remediadora das espécies vegetais feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*) e mucuna-preta (*Stizolobium aterrimum*), em solo adubado com composto orgânico e contaminado com o herbicida trifloxysulfuron-sodium. O trabalho foi conduzido em duas etapas. Na primeira, avaliou-se o crescimento de *C. ensiformis* e *S. aterrimum* nos diferentes tipos de substratos, contaminados ou não com herbicida. Os tratamentos foram compostos pela combinação entre duas doses do herbicida trifloxysulfuron-sodium (0,0 e 7,5 g ha⁻¹) e cinco teores de composto orgânico: 0, 25, 50, 100 e 200 m³ ha⁻¹ (equivalentes a 0; 1,25; 2,5; 5; e 10% do volume de solo em cada vaso, respectivamente), dispostos em esquema fatorial 2 x 5, sob delineamento inteiramente casualizado, com três repetições, para cada espécie remediadora. Após preparo do substrato e enchimento dos vasos, aplicou-se à superfície do solo o herbicida. Um dia após essa aplicação, procedeu-se à semeadura das espécies remediadoras. Nessa mesma época, utilizaram-se, como testemunha, vasos sem planta remediadora, porém com os mesmos teores de composto orgânico e com aplicação do herbicida mantido nas mesmas condições daqueles com plantas remediadoras, as quais foram colhidas 60 dias depois. Nessa ocasião, avaliou-se a altura e a massa seca da parte aérea (MSPA) dessas espécies. Todo o material colhido foi triturado e incorporado ao solo dos seus respectivos vasos. Na segunda etapa, avaliou-se

a capacidade remediadora de *C. ensiformis* e *S. aterrimum*. Os tratamentos foram compostos pela combinação entre cinco teores de composto orgânico e cinco tipos de cultivo prévio: cultivo de *C. ensiformis* e *S. aterrimum* na presença e ausência do herbicida trifloxysulfuron-sodium e um tratamento sem cultivo prévio e com aplicação de trifloxysulfuron-sodium, dispostos em esquema fatorial 5 x 5, sob delineamento inteiramente casualizado, com três repetições. Amostras de 100 g de solo foram retiradas dos vasos (6 L) usados na primeira etapa e colocadas em vasos de 100 cm³. Em seguida, cultivou-se sorgo (*Sorghum bicolor*) para indicação de resíduo do herbicida no solo. Essas plantas foram colhidas 20 dias após, época em que se avaliou a altura, a MSPA e o grau de intoxicação delas pelo herbicida. No solo com trifloxysulfuron-sodium e sem cultivo prévio das espécies remediadoras, as plantas de sorgo tiveram seu crescimento reduzido, mesmo com a adição de composto orgânico. O cultivo prévio de *C. ensiformis* e *S. aterrimum* proporcionou crescimento normal às plantas de sorgo, confirmando a capacidade remediadora dessas espécies. A adição de composto orgânico não influenciou a capacidade remediadora das espécies.

Palavras-chave: *Canavalia ensiformis*, *Stizolobium aterrimum*, descontaminação.

PHYTOREMEDIATION OF SOIL FERTILIZED WITH ORGANIC CONTENT AND CONTAMINATED WITH TRIFLOXYSULFURON-SODIUM

ABSTRACT

This study aimed to evaluate remediating capacity of *Canavalia ensiformis* and *Stizolobium aterrimum* in soil fertilized with organic content and contaminated with trifloxysulfuron-sodium, in an experiment divided into two stages. In the first one, it was evaluated growth of *C. ensiformis* and *S. aterrimum* in different substrates, contaminated or not with herbicide. Treatments were composed by combination of two trifloxysulfuron-sodium rates (0.0 and 7.5 g ha⁻¹) and five teor of organic content (0.25, 50, 100 and 200 m³ ha⁻¹), arranged in a factorial scheme 2 x 5, in a completely randomized design, with three replicates for each specie. Herbicide was applied on soil surface after preparing the substrate and filling the pots, and one day after it, the species were sowed. At this stage, pots with same teor of organic content and under same

conditions, but without remediating plants, were used as control. After 60 days, plants were harvested to evaluate high and dry matter of ground tissue. All material was triturated and incorporated to soil of their respective pots. In the second stage, it was evaluated remediating capacity of *C. ensiformis* and *S. aterrimum*. Treatments were composed by five teor of organic content and five types of prior cultivation, arranged in a factorial scheme 5 x 5, in a completely randomized design, with three replicates. From pots used before, samples of 100g of soil were taken out and put in pots of 100 cm³, then, sorgo (*Sorghum bicolor*) was cultivated to indicate herbicide residue on soil. After 20 days, these plants were harvested in order to evaluate height, dry matter of ground tissue and intoxication level. Sorgo growth decreased in soil with trifloxysulfuron-sodium and without prior cultivation, even adding organic content. Prior cultivation of *C. ensiformis* and *S. aterrimum* provided a normal growth of sorgo plants, highlighting their remediating capacity that was not influenced by organic content addition.

Key words: *Canavalia ensiformis*, *Stizolobium aterrimum*, decontamination.

INTRODUÇÃO

Alguns herbicidas podem permanecer no solo por período maior do que o ciclo da cultura na qual foi aplicado. Isso pode provocar intoxicação em culturas sucessivas (*carryover*), além de atingir lençóis aquíferos subterrâneos. Uma das técnicas utilizadas para remoção do resíduo desses herbicidas no solo é a fitorremediação, que consiste na utilização de espécies vegetais para reduzir a persistência de resíduo no solo. Esta técnica vem sendo desenvolvida em muitos países e também no Brasil (Anderson et al., 1994; Rice et al., 1997; Wilson et al., 2000; Pires et al., 2003a, b, c; Procópio et al., 2004, 2005; Santos et al., 2004a, b), visando descontaminar áreas tratadas com herbicidas residuais.

O herbicida trifloxysulfuron-sodium é utilizado em mistura com ametryn na cultura da cana-de-açúcar, ou isoladamente, na cultura do algodão em pós-emergência inicial, apresentando problemas de *carryover* na cultura do feijão cultivado em seqüência. Mesmo sendo recomendado em concentrações baixas (em torno de 7,5 g ha⁻¹), o período de espera, para o plantio de culturas sensíveis, é de aproximadamente oito meses a contar da data de sua aplicação. Dentre as diversas espécies de adubos

verdes avaliadas, *Stizolobium aterrimum* e *Canavalia ensiformis* estão sendo recomendadas para descontaminação de solos tratados com trifloxysulfuron-sodium (Santos et al., 2004a, b).

Dentre os componentes da matéria orgânica do solo, as substâncias húmicas são relatadas como as principais responsáveis pela sorção de herbicidas (Pusino et al., 1992; Celis et al., 1997). A matéria orgânica contribui no solo para reduzir as amplitudes de variação da temperatura e umidade do solo, possibilitando condições favoráveis para incrementos na biomassa e atividade microbiana, acelerando as biotransformações das moléculas dos herbicidas no solo (Weed et al., 1995; Reddy et al., 1995) e ampliando, dessa forma, os efeitos benéficos nos processos de fitorremediação de herbicidas.

Objetivou-se com este trabalho avaliar o efeito da adição de composto orgânico ao solo sobre a capacidade remediadora das espécies vegetais *Canavalia ensiformis* e *Stizolobium aterrimum* em descontaminar solo tratado com o herbicida trifloxysulfuron-sodium.

MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho, desenvolvido em casa de vegetação, foi conduzido em duas etapas. Na primeira, visando avaliar o crescimento das espécies remediadoras em diferentes substratos, após o enchimento dos vasos com solo enriquecido com teores de composto orgânico: 0, 25, 50, 100 e 200 m³ ha⁻¹ (equivalentes a 0; 1,25; 2,5; 5; e 10% do volume de solo em cada vaso, respectivamente) e tratados com trifloxysulfuron-sodium (0,0 e 7,5 g ha⁻¹), fez-se a semeadura das espécies remediadoras (*Canavalia ensiformis* e *Stizolobium aterrimum*). Nessa mesma época, vasos sem planta remediadora, porém com os mesmos teores de composto orgânico e com aplicação do herbicida, foram mantidos nas mesmas condições daqueles com plantas remediadoras. Para avaliação do crescimento das plantas, cada conjunto de vasos com uma espécie remediadora foi considerado um experimento disposto em esquema fatorial 2 x 5 (duas doses do herbicida e cinco teores de composto orgânico), sob delineamento inteiramente casualizado, com três repetições. As características do composto orgânico adicionado ao solo são apresentadas na Tabela 1. Utilizaram-se vasos com capacidade para 6 L, preenchidos com solo cuja caracterização química e física é apresentada na Tabela 2. A semeadura das espécies remediadoras foi realizada um dia após a aplicação do

herbicida; após a emergência delas foi feito o desbaste, deixando-se três plantas por vaso. Aos 60 dias após a semeadura (DAS), as plantas foram cortadas rente ao solo, sendo avaliadas a altura e massa seca da parte aérea (MSPA) após secagem das plantas em estufa (70 °C por 72 h). Durante o período de condução do experimento, manteve-se a umidade do solo a 80% da capacidade de campo, por meio de pesagens diárias dos vasos com reposição da água consumida. A parte aérea das plantas remediadoras, após secagem, avaliação e moagem, foi devolvida ao respectivo vaso, em razão da possibilidade da presença do herbicida na parte aérea destas plantas.

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância. A comparação de médias entre as doses do herbicida, dentro de cada nível de composto orgânico no solo, para cada espécie, foi realizada por meio do teste F a 5% de probabilidade, e o efeito da adição de composto orgânico no solo para cada dose do herbicida, por regressão. Os modelos foram escolhidos com base na significância dos coeficientes de regressão, utilizando-se o teste “t” a 5% de probabilidade, no fenômeno biológico e no coeficiente de determinação (r^2).

Na segunda etapa, avaliou-se a capacidade remediadora de *C. ensiformis* e *S. aterrimum*, verificando o nível de descontaminação a partir da primeira etapa. Os tratamentos foram compostos pela combinação entre cinco teores de composto orgânico e cinco tipos de cultivo prévio: cultivo de mucuna-preta (*Stizolobium aterrimum*) e feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*) na presença e ausência do herbicida trifloxysulfuron-sodium e um tratamento sem cultivo prévio e com aplicação de trifloxysulfuron-sodium, dispostos em esquema fatorial 5 x 5, sob delineamento inteiramente casualizado, com três repetições. Amostras de 100 g de solo foram retiradas dos vasos (6 L) utilizados na primeira etapa e colocadas em vasos de 100 cm³. Em seguida, cultivou-se sorgo (*Sorghum bicolor*) para indicação de resíduo do trifloxysulfuron-sodium. Aos 20 DAS, fez-se a avaliação do grau de intoxicação dessas plantas pelo herbicida (atribuindo-se notas variando de zero, para ausência de intoxicação, a 100, para morte da planta). Nessa ocasião, determinou-se ainda a altura e massa seca da parte aérea das plantas de sorgo.

Os dados referentes à espécie indicadora (sorgo) foram submetidos à análise de variância. A comparação de médias entre os tipos de cultivo prévio, dentro de cada nível de composto orgânico no solo, foi realizada por meio do teste de Tukey a 5% de probabilidade, e o efeito da adição de composto orgânico no solo para cada tipo de cultivo prévio, por regressão. Os modelos foram escolhidos com base na significância

dos coeficientes de regressão, utilizando-se o teste “t” a 5% de probabilidade, no fenômeno biológico e no coeficiente de determinação (r^2).

Tabela 1 – Concentrações de nutrientes observadas no composto orgânico utilizado no experimento

Umidade (65 °C) = 60,09%					C total = 13,72%					
-----Dados base seca (umidade 65 °C)-----										
pH	Ca	Mg	K	P	N	Cu	Zn	Mn	Fe	
6,57	----- dag kg ⁻¹ -----					-----mg kg ⁻¹ -----				
	2,63	0,59	0,40	2,00	1,03	51,8	285,0	45,1	9176,0	

Análises realizadas no Laboratório de Matéria Orgânica do Solo do Departamento de Solos da UFV.

Tabela 2 - Composição físico-química de amostra do solo Argissolo Vermelho-Amarelo utilizado no experimento

Análise granulométrica (dag kg ⁻¹)										
Argila	Silte	Areia fina	Areia grossa	Classificação textural						
39	11	17	33	Argilo-arenosa						
Análise Química										
pH	P	K ⁺	H + Al	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	CTC _{total}	V	M	MO
H ₂ O	mg dm ⁻³		cmol _c dm ⁻³					%		dag kg ⁻¹
5,0	0,6	18	5,94	1,1	0,1	0,0	6,09	2	88	2,18

Análises realizadas nos Laboratórios de Análises Físicas e Químicas de Solo do Departamento de Solos da UFV, segundo a metodologia descrita pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária-EMBRAPA (1997).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O solo sem composto orgânico, na presença do trifloxysulfuron-sodium, condicionou baixo crescimento e produção de massa seca da parte aérea (MSPA) de *C. ensiformis* (abaixo de 50% do valor observado na ausência do herbicida). A altura e a MSPA das plantas de *C. ensiformis*, cultivadas em solo tratado com o herbicida trifloxysulfuron-sodium, foram menores para todos os teores de composto orgânico quando comparados na ausência do herbicida (Tabela 3).

Tabela 3 – Valores médios de altura e massa seca da parte aérea de plantas de *Canavalia ensiformis*, cultivadas em solo adubado com diferentes teores de composto orgânico, com e sem aplicação de trifloxysulfuron-sodium, com os respectivos coeficientes de variação

Composto orgânico (m ³ ha ⁻¹)	Altura das plantas (cm)		Massa seca da parte aérea (g)	
	<i>Trifloxysulfuron-sodium</i>	<i>Sem herbicida</i>	<i>Trifloxysulfuron-sodium</i>	<i>Sem herbicida</i>
0	25,33 b	56,67 a	8,89 b	23,01 a
25	39,00 b	58,83 a	13,60 b	27,12 a
50	45,67 b	56,67 a	15,42 b	27,62 a
100	55,33 b	71,67 a	17,39 b	29,97 a
200	58,33 b	85,67 a	18,13 b	32,75 a
CV (%)	2,12		6,38	

Médias seguidas de mesma letra, na linha, para cada variável, não diferem entre si pelo teste F a 5% de probabilidade.

Em todos os níveis de composto orgânico adicionados ao solo, os valores de altura e MSPA de *S. aterrimum*, na presença do trifloxysulfuron-sodium, foram semelhantes aos observados na ausência desse herbicida, indicando que essa espécie é tolerante ao herbicida (Tabela 4).

Tabela 4 - Valores médios de altura e massa seca da parte aérea de plantas de *Stizolobium aterrimum*, cultivadas em solo adubado com diferentes teores de composto orgânico, com e sem aplicação de trifloxysulfuron-sodium, com os respectivos coeficientes de variação

Composto orgânico (m ³ ha ⁻¹)	Altura das plantas (cm)		Massa seca da parte aérea (g)	
	<i>Trifloxysulfuron-sodium</i>	<i>Sem herbicida</i>	<i>Trifloxysulfuron-sodium</i>	<i>Sem herbicida</i>
0	138,33 a	140,67 a	13,58 a	12,64 a
25	159,33 a	182,00 a	18,01 a	15,80 a
50	177,33 a	183,33 a	17,03 a	17,44 a
100	173,33 a	181,00 a	19,00 a	17,64 a
200	176,00 a	196,67 a	19,32 a	19,65 a
CV (%)	3,89		9,14	

Médias seguidas de mesma letra, na linha, para cada variável, não diferem entre si pelo teste F a 5% de probabilidade.

A resposta de *C. ensiformis* à dose do composto orgânico adicionado ao solo foi linear para altura e MSPA na ausência de trifloxysulfuron-sodium, evidenciando que o aumento de composto orgânico no solo favorece o crescimento dessa espécie remediadora (Figuras 1 e 2). No solo contaminado com trifloxysulfuron-sodium, a resposta de *C. ensiformis* à adição de composto orgânico ao solo foi quadrática para altura e MSPA. O maior valor de altura obtido (60,88 cm) foi com adição de 155,39 m³ ha⁻¹ de composto orgânico ao solo, e o de MSPA (19,13 g), com adição de 148,18 m³ ha⁻¹ (Figuras 1 e 2).

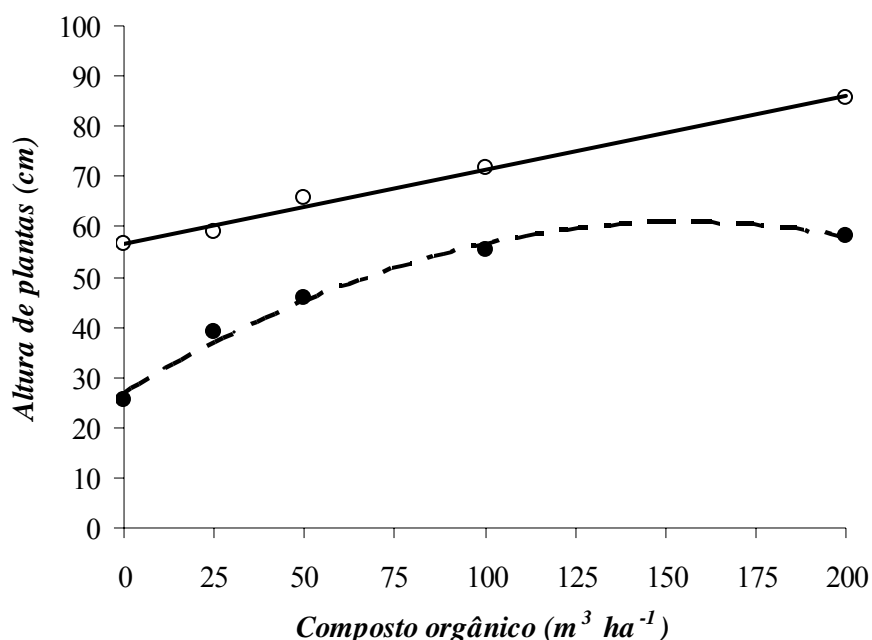


Figura 1 – Estimativa e valor observado da altura de plantas de *Canavalia ensiformis* cultivadas em solo com e sem aplicação de trifloxysulfuron-sodium, em função da adubação do solo com diferentes teores de composto orgânico (C). (com herbicida: ● – $\hat{Y} = 26,8564 + 0,438028 * C - 0,00140943 * C^2$, $r^2 = 0,99$; e sem herbicida: ○ – $\hat{Y} = 56,7 + 0,146667 * C$, $r^2 = 0,98$).

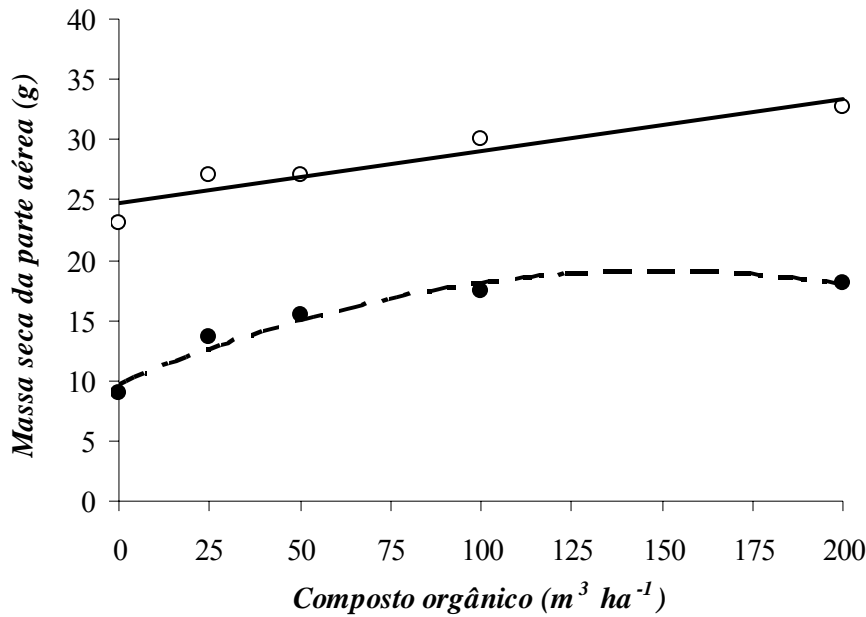


Figura 2 - Estimativa e valor observado da massa seca da parte aérea de plantas de *Canavalia ensiformis* cultivadas em solo com e sem aplicação de trifloxysulfuron-sodium, em função da adubação do solo com diferentes teores de composto orgânico (C). (com herbicida: ● – $\hat{Y} = 9,69434 + 0,12748*C - 0,00043015*C^2$, $r^2 = 0,96$; e sem herbicida: ○ – $\hat{Y} = 24,882 + 0,042829*C$, $r^2 = 0,70$).

Não se observou variação na altura de plantas de *S. aterrimum* cultivadas em solo adubado com diferentes teores de composto orgânico, na presença de trifloxysulfuron-sodium, sendo o valor médio de 158,87 cm. Na ausência do herbicida, a resposta ao aumento do composto orgânico foi linear crescente, evidenciando que a adição de composto orgânico no solo favorece o crescimento dessa espécie (Figura 3). Considerando a MSPA, a resposta de *S. aterrimum* aos níveis de adubação do solo com o composto orgânico foi linear na ausência do herbicida e quadrática na presença deste. O maior valor da MSPA (19,92 g) foi obtido com a adição de 146,96 m³ ha⁻¹ de composto orgânico ao solo (Figura 4).

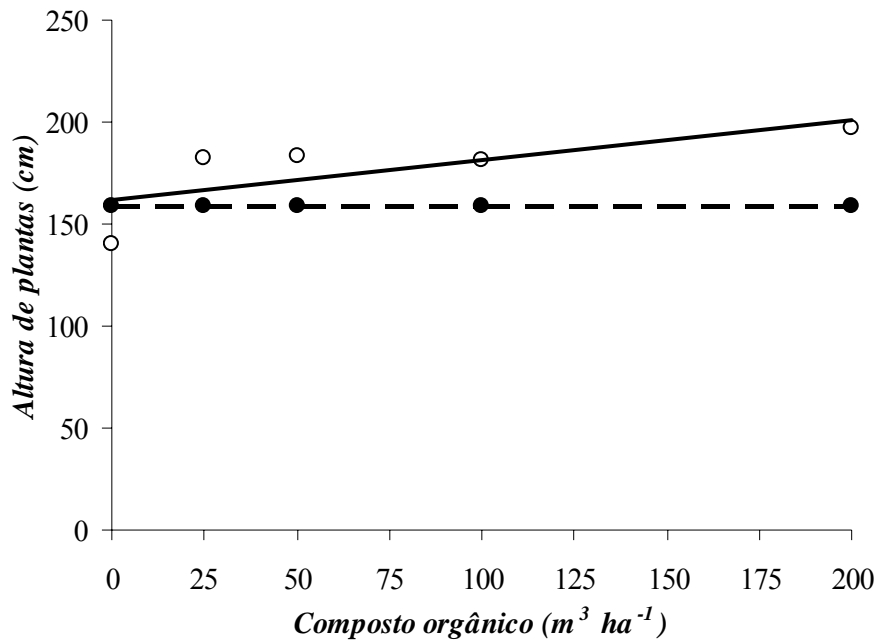


Figura 3 - Estimativa e valor observado da altura de plantas de *Stizolobium aterrimum* cultivadas em solo com e sem aplicação de trifloxysulfuron-sodium, em função da adubação do solo com diferentes teores de composto orgânico (C). (com herbicida: ● – $\hat{Y} = 158,87$ cm; e sem herbicida: ○ – $\hat{Y} = 162,109 + 0,195007 \cdot C$, $r^2 = 0,53$).

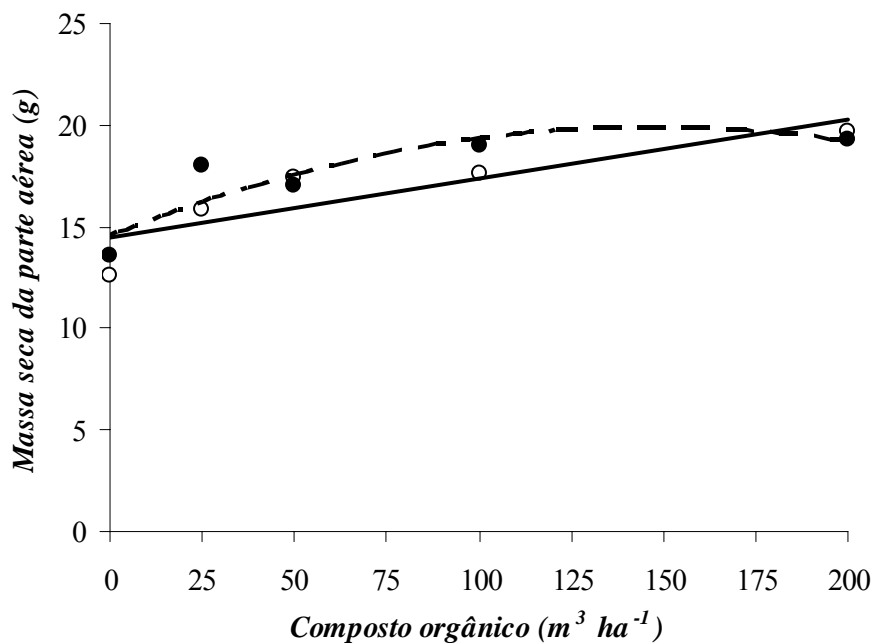


Figura 4 - Estimativa e valor observado da massa seca da parte aérea de plantas de *Stizolobium aterrimum* cultivadas em solo com e sem aplicação de trifloxysulfuron-sodium, em função da adubação do solo com diferentes teores de composto orgânico (C). (com herbicida: ● – $\hat{Y} = 14,5464 + 0,0731424C - 0,000248839 \cdot C^2$, $r^2 = 0,78$; e sem herbicida: ○ – $\hat{Y} = 14,4621 + 0,0289409 \cdot C$, $r^2 = 0,62$).

A remediação do solo contaminado pelo trifloxysulfuron-sodium foi eficiente por ambas as espécies remediadoras avaliadas, independentemente da adição de composto orgânico ao solo. Tanto a altura quanto a MSPA das plantas de sorgo não variaram onde houve cultivo prévio de *C. ensiformis* ou *S. aterrimum*; entretanto, valores inferiores foram observados no solo sem cultivo prévio (Tabela 5). O aumento de composto orgânico no solo para cada tipo de cultivo prévio não foi significativo para MSPA, altura e intoxicação de plantas de sorgo, sendo os valores médios mostrados na Tabela 6.

Segundo diversos autores (Cunningham et al., 1996; Pires et al., 2003a), a fitorremediação de solo contaminado por herbicidas pode ocorrer pela liberação de exsudatos radiculares, que estimulam a atividade microbiana, degradando o composto no solo e caracterizando, em algumas espécies vegetais, a aptidão rizosférica para a biorremediação de compostos tóxicos. Neste trabalho, as espécies remediadoras e a adição de composto orgânico podem ter contribuído para maior presença de microrganismos responsáveis pela degradação do herbicida no solo, evidenciando uma consideração importante a ser analisada em outro projeto.

Tabela 5 – Valores médios de massa seca da parte aérea (MSPA), altura e intoxicação de plantas de sorgo aos 20 dias após semeadura, cultivadas em solo adubado com diferentes teores de composto orgânico, com e sem aplicação de trifloxysulfuron-sodium, remediados ou não por *Canavalia ensiformis* e *Stizolobium aterrimum* por 60 dias após aplicação do herbicida, com os respectivos coeficientes de variação

Característica avaliada	Composto orgânico (m ³ ha ⁻¹)	<i>Canavalia ensiformis</i>		<i>Stizolobium aterrimum</i>		<i>Sem cultivo prévio</i>
		<i>Trifloxysulfuron-sodium</i>	<i>Sem herbicida</i>	<i>Trifloxysulfuron-sodium</i>	<i>Sem herbicida</i>	<i>Trifloxysulfuron-sodium</i>
MSPA (g)	0	0,386 a	0,239 a	0,376 a	0,280 a	0,068 b
	25	0,388 a	0,240 a	0,377 a	0,282 a	0,075 b
	50	0,400 a	0,243 a	0,394 a	0,285 a	0,089 b
	100	0,397 a	0,246 a	0,380 a	0,290 a	0,087 b
	200	0,392 a	0,249 a	0,401 a	0,301 a	0,090 b
CV (%)		-----		38,04	-----	
Altura (cm)	0	18,02 a	17,90 a	17,60 a	17,67 a	3,33 b
	25	17,98 a	18,00 a	17,73 a	17,97 a	3,50 b
	50	18,07 a	17,93 a	17,67 a	18,07 a	3,51 b
	100	18,05 a	17,80 a	17,93 a	18,10 a	3,67 b
	200	18,07 a	18,08 a	18,03 a	18,45 a	3,50 b
CV (%)		-----		6,74	-----	
Intoxicação (%)	0	0,00	0,00	0,00	0,00	91,00
	25	0,00	0,00	0,00	0,00	88,50
	50	0,00	0,00	0,00	0,00	88,00
	100	0,00	0,00	0,00	0,00	85,00
	200	0,00	0,00	0,00	0,00	85,00
CV (%)		-----		3,70	-----	

Médias seguidas de mesma letra, em cada linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 6 – Equações ajustadas para massa seca da parte aérea, altura e intoxicação de plantas de sorgo aos 20 dias após semeadura em solo adubado com diferentes teores de composto orgânico, com e sem aplicação de trifloxysulfuron-sodium, remediado ou não pelas espécies *Canavalia ensiformis* e *Stizolobium aterrimum* por 60 dias após aplicação do herbicida

Tratamento	Equação
	Massa seca da parte aérea (g)
<i>Stizolobium aterrimum</i> na presença de trifloxysulfuron-sodium	$\hat{Y} = 0,385$
<i>Stizolobium aterrimum</i> na ausência de trifloxysulfuron-sodium	$\hat{Y} = 0,288$
<i>Canavalia ensiformis</i> na presença de trifloxysulfuron-sodium	$\hat{Y} = 0,393$
<i>Canavalia ensiformis</i> na ausência de trifloxysulfuron-sodium	$\hat{Y} = 0,244$
Sem cultivo prévio e com presença de trifloxysulfuron-sodium	$\hat{Y} = 0,082$
Altura de plantas (cm)	
<i>Stizolobium aterrimum</i> na presença de trifloxysulfuron-sodium	$\hat{Y} = 17,79$
<i>Stizolobium aterrimum</i> na ausência de trifloxysulfuron-sodium	$\hat{Y} = 18,05$
<i>Canavalia ensiformis</i> na presença de trifloxysulfuron-sodium	$\hat{Y} = 18,04$
<i>Canavalia ensiformis</i> na ausência de trifloxysulfuron-sodium	$\hat{Y} = 17,94$
Sem cultivo prévio e com presença de trifloxysulfuron-sodium	$\hat{Y} = 3,50$
Intoxicação (%)	
<i>Stizolobium aterrimum</i> na presença de trifloxysulfuron-sodium	$\hat{Y} = 0,00$
<i>Stizolobium aterrimum</i> na ausência de trifloxysulfuron-sodium	$\hat{Y} = 0,00$
<i>Canavalia ensiformis</i> na presença de trifloxysulfuron-sodium	$\hat{Y} = 0,00$
<i>Canavalia ensiformis</i> na ausência de trifloxysulfuron-sodium	$\hat{Y} = 0,00$
Sem cultivo prévio e com presença de trifloxysulfuron-sodium	$\hat{Y} = 87,53$

Quanto à seleção de espécies de adubos verdes visando remediação de solo contaminado com trifloxysulfuron-sodium, segundo Procópio et al. (2005), das 15 espécies avaliadas, somente *C.ensiformis* e *S. aterrimum* possibilitaram o cultivo seqüencial de plantas de feijão, sem prejuízos para biomassa, altura e toxidez da parte aérea dessas culturas, confirmando os resultados obtidos neste trabalho.

Concluiu-se ainda, neste trabalho, que a adição de composto orgânico no solo contaminado com trifloxysulfuron-sodium favoreceu o crescimento das espécies remediadoras (*Canavalia ensiformis* e *Stizolobium aterrimum*), porém não afetou a capacidade remediadora dessas espécies a esse herbicida.

LITERATURA CITADA

- ANDERSON, T. A.; KRUGER, E. L.; COATS, J. R. Enhanced degradation of a mixture of three herbicides in the rhizosphere of a herbicide-tolerant plant. **Chemosphere**, v. 28, p. 1551-7, 1994.
- CELIS, R.; COX, L.; HERMOSIN, M.C.; CORNEJO, J. Sorption of triazafluron by iron and humic acid-coated montmorillonite. **J. Environ. Qual.**, v. 26, n. 2, p. 472-479, 1997.
- CUNNINGHAM, S. D.; ANDERSON, T. A.; SCHWAB, A. P. Phytoremediation of soils contaminated with organic pollutants. **Adv. Agron.**, v. 56, p. 55-114, 1996.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2° ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212 p.
- PIRES, F.R.; SOUZA, C.M.; SILVA, A.A.; PROCÓPIO, S.O.; FERREIRA, L.R. Fitorremediação de solos contaminados com herbicidas. **Planta Daninha**, v. 21, n.2, p.335-341, 2003a.
- PIRES, F.R.; SOUZA, C.M.; SILVA, A.A.; QUEIROZ, M.E.L.R.; PROCÓPIO, S.O.; SANTOS, J.B.; SANTOS, E.A.; CECON, P.R. Seleção de plantas com potencial para fitorremediação de tebuthiuron. **Planta Daninha**, v. 21, n.3, p.451-458, 2003b.
- PIRES, F.R. **Seleção de espécies vegetais para fitorremediação de solos contaminados com tebuthiuron**. 2003. 65f. Tese (Doutorado em Fitotecnia)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2003c.
- PROCÓPIO, S.O.; SANTOS, J.B.; SILVA, A.A.; PIRES, F.R.; RIBEIRO JUNIOR, J.I.; SANTOS, E.A.; FERREIRA, L.R. Seleção de plantas com potencial para fitorremediação de solos contaminados com o herbicida trifloxysulfuron-sodium. **Planta Daninha**, v.22, n.2, p.315-322, 2004.
- PROCÓPIO, S.O.; SANTOS, J.B.; SILVA, A.A.; PIRES, F.R.; RIBEIRO JUNIOR, J.I.; SANTOS, E.A. Potencial de espécies vegetais para a remediação do herbicida trifloxysulfuron-sodium. **Planta Daninha**, v.23, n.1, p.9-16, 2005.
- PUSINO, A.; LIU, W.; GESSA, C. Influence of organic matter and its clay complexes on metolachlor adsorption on soil. **Pestic. Sci.**, v.36, p.283-286, 1992.
- REDDY, K.N.; ZABLOTOWICZ, R.M.; LOCKE, M.A. Chlorimuron adsorption, desorption and degradation in soils from conventional tillage and no-tillage systems. **J. Environ. Quality**, v.24, p.760-767, 1995.

- RICE, P. J.; ANDERSON, T. A.; COATS, J. R. Phytoremediation of herbicide-contaminated surface water with aquatic plants. In: **Phytoremediation of soil and water contaminants**. Washington, DC: American Chemical Society, 1997. p. 133-51.
- 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.323-330, 2004a.
- SANTOS, J.B.; PROCÓPIO, S.O.; SILVA, A.A.; PIRES, F.R.; RIBEIRO JUNIOR, J.I.; SANTOS, E.A. Seletividade do herbicida trifloxysulfuron sodium para fins de fitorremediação. **Revista Ceres**, v.51, n.293, p.129-142, 2004b.
- WEED, D.A.J.; KANWAR, R.S.; STOLTENBERG, D.E.; PFEIFFER, R.L. Dissipation and distribution of herbicides in the soil profile. **J. Environ. Quality**. v.24, n. 1, p.68-79, 1995.
- WILSON, P. C.; WHITWELL, T.; KLAINE, S. J. Phytotoxicity, uptake, and distribution of ¹⁴C-simazine in *Acorus gramineus* and *Pontederia cordata*. **Weed Sci.**, 48: 701-9.2000.

EFEITO DA UMIDADE DO SOLO SOBRE A CAPACIDADE DE *Canavalia ensiformis* E *Stizolobium aterrimum* DE REMEDIAR SOLOS CONTAMINADOS COM HERBICIDAS

RESUMO

Objetivou-se, neste trabalho, avaliar os efeitos da umidade do solo sobre a capacidade de *Canavalia ensiformis* e *Stizolobium aterrimum* de remediar solos contaminados com os herbicidas tebuthiuron e trifloxysulfuron-sodium. O trabalho foi conduzido em duas etapas, sendo na primeira avaliado o crescimento de *C. ensiformis* e *S. aterrimum* em solo com diferentes níveis de umidade, contaminados ou não com herbicida. Os tratamentos foram compostos pela combinação entre os herbicidas tebuthiuron, trifloxysulfuron-sodium e ausência de herbicida, associados a quatro níveis de umidade do solo (28,7; 35,8; 43,1; e 57,5%), dispostos em esquema fatorial 3 x 4, sob delineamento inteiramente casualizado, com três repetições, para cada espécie remediadora. Após preparo do substrato e enchimento dos vasos, aplicou-se à superfície do solo o herbicida trifloxysulfuron-sodium ou tebuthiuron. Um dia após essa aplicação, procedeu-se à semeadura das espécies remediadoras. Nessa mesma época, utilizaram-se, como testemunha, vasos sem planta remediadora, porém com os mesmos níveis de umidade e com aplicação do herbicida mantido nas mesmas condições daqueles com plantas remediadoras, as quais foram colhidas 60 dias após semeadura. Nessa ocasião, avaliou-se a altura e a massa seca da parte aérea (MSPA) dessas espécies. Todo o material colhido foi triturado e incorporado ao solo dos seus respectivos vasos. Na

segunda etapa, avaliou-se a capacidade remediadora de *C. ensiformis* e *S. aterrimum*. Os tratamentos foram compostos pela combinação entre quatro níveis de umidade e cinco tipos de cultivo prévio: cultivo de *C. ensiformis* e *S. aterrimum* na presença e ausência do herbicida e um tratamento sem cultivo prévio e com aplicação do herbicida, dispostos em esquema fatorial 4 x 5, sob delineamento inteiramente casualizado, com três repetições, para cada herbicida avaliado. Amostras de 0,5 kg de solo foram retiradas dos vasos (6 L) utilizados na primeira etapa e colocadas em vasos de 0,5 L. Em seguida, cultivaram-se as espécies indicadoras de resíduo dos herbicidas no solo: sorgo (*Sorghum bicolor*) para o trifloxysulfuron-sodium e soja (*Glycine max*) para o tebuthiuron. Estas plantas foram colhidas 20 dias após a semeadura, época em que se avaliaram a altura, a MSPA e o grau de intoxicação delas pelos herbicidas. *Canavalia ensiformis* não sobreviveu até a época de avaliação (60 DAS) em solo contaminado pelo tebuthiuron, independentemente do teor de umidade mantido no solo. *S. aterrimum* sobreviveu quando cultivada em solo com umidade entre 28,7 e 35,8% e quando comparada a *C. ensiformis* foi mais eficiente na descontaminação do solo com residual do tebuthiuron. Nos solos contaminados com trifloxysulfuron-sodium ou com tebuthiuron, com o cultivo prévio das espécies remediadoras, o crescimento do sorgo e da soja foi melhor se comparado ao daquelas plantas cultivadas no solo onde não foi feito o cultivo das espécies remediadoras.

De maneira geral, a variação da umidade não interferiu no processo de remediação, sendo os efeitos observados no desenvolvimento das espécies remediadoras. O melhor desenvolvimento de *C. ensiformis* e *S. aterrimum* foi observado em solo com umidade mantida em torno de 0,431 kg kg⁻¹; contudo, nesse nível de umidade, o tebuthiuron é mais facilmente disponibilizado para a solução do solo.

Palavras-chave: persistência no solo, teor de umidade, degradação.

EFFECT OF SOIL HUMIDITY ON *Canavalia ensiformis* AND *Stizolobium aterrimum*
CAPACITY OF REMEDIATING SOIL CONTAMINATED WITH HERBICIDE

ABSTRACT

This paper aimed to evaluate effect of soil humidity on *Canavalia ensiformis* and *Stizolobium aterrimum* capacity of remediating soil contaminated with tebuthiuron and trifloxysulfuron-sodium. The experiment was divided into two stages. At first stage, it was used soil in different levels of humidity, contaminated or not with herbicide, to evaluate *C. ensiformis* and *S. aterrimum* growth. Treatments were composed by combination among tebuthiuron, trifloxysulfuron-sodium and herbicide absence, associated to four levels of soil humidity (28.7; 35.8; 43.1; and 57.5%), arranged in a factorial scheme 3 x 4, in a completely randomized design, with three replicates for each specie. Trifloxysulfuron-sodium or tebuthiuron was applied on soil surface after preparing the substrate and filling the pots, and one day after it, the species were sowed. At this stage, pots with same humidity level and under same conditions, but without remediating plants, were used as control. After 60 days, plants were harvested to evaluate high and dry matter of ground tissue. All material was triturated and incorporated to soil of their respective pots. In the second stage, it was evaluated remediating capacity of *C. ensiformis* and *S. aterrimum*. Treatments were composed by five humidity levels and five types of prior cultivation, arranged in a factorial scheme 4 x 5, in a completely randomized design, with three replicates. From pots used before, samples of 0.5 Kg of soil were taken out and put in pots of 0.5 L, then, sorgo (*Sorghum bicolor*) was cultivated to trifloxysulfuron-sodium and soybean (*Glycine max*) to tebuthiuron. Past 20 days of sowing, plants were harvested to evaluate height, dry matter of ground tissue and their intoxication level. *Canavalia ensiformis* did not survive up to 60 days after sowing, in soil contaminated with tebuthiuron, in any humidity level, and *S. aterrimum* survived when cultivated in soil between 28.7 and 35.8% of humidity. When compared to *C. ensiformis*, *S. aterrimum* was more efficient in soil decontamination with tebuthiuron. Sorgo and soybean growth was better in soil contaminated with trifloxysulfuron-sodium or tebuthiuron, with prior cultivation than in soil without prior cultivation. In general, remediation was not interfered by humidity variation, being observed the effects on the development of remediating species. *C. ensiformis* and *S. aterrimum* best development was observed in soil with humidity

around 0.431 kg kg^{-1} , however, at this level, tebuthiuron is better available to soil solution.

Key words: soil persistence, humidity teor, degradation.

INTRODUÇÃO

A utilização de plantas como agentes descontaminantes de poluentes orgânicos, como os herbicidas, em solos e recursos hídricos, denominada fitorremediação, desponta como uma técnica promissora, tanto econômica como ambientalmente correta, sendo direcionada até mesmo para a agricultura. Essa técnica apresenta-se como uma alternativa agrônômica para sistemas de cultivo que necessitam reduzir a persistência no solo de herbicidas com longo período residual, como o trifloxysulfuron-sodium e o tebuthiuron, que podem persistir no solo por até 8 e 24 meses, respectivamente (Rodrigues & Almeida, 2005).

Quando os herbicidas são aplicados nos agroecossistemas, eles sofrem uma série de reações e redistribuem-se nos diversos componentes desse ambiente, contaminando-os. Assim, considerando-se os herbicidas aplicados nos solos, o destino destes é governado por três processos gerais (Blanco, 1979): (i) os processos físicos: volatilização, lixiviação pela água e erosão com o solo por vento e água; (ii) processos químicos: fotodecomposição, adsorção, reações químicas com os constituintes do solo e retirada pelas plantas e microrganismos; e (iii) processos microbiológicos, representados pela decomposição microbiana.

Adicionalmente, o manejo do solo também afeta a atividade dos herbicidas residuais e influencia a eficácia de controle das plantas daninhas, a persistência e o risco de contaminação ambiental (Levanon et al., 1993; Weed et al., 1995). A atividade dos herbicidas residuais pode variar em razão do tipo e conteúdo de argila, do teor de matéria orgânica e da umidade do solo (Walker et al., 1992). Isso ocorre porque esses fatores afetam a sorção, a lixiviação e a degradação biológica, as quais regulam a concentração, a mobilidade e a persistência de herbicidas no solo (Walker et al., 1992; Mueller et al., 1999). A intensidade com que o manejo afeta a atividade dos herbicidas residuais depende dos efeitos sobre o conteúdo e a infiltração de água, assim como sobre o teor da matéria orgânica do solo. A infiltração de água promove a lixiviação,

enquanto a matéria orgânica favorece a sorção dos herbicidas (Walker et al., 1992; Flury, 1996).

A lixiviação constitui um dos principais processos de dissipação dos herbicidas no solo, exercendo influência direta sobre o controle das plantas daninhas, a persistência e o risco de contaminação ambiental. Em adição, propriedades intrínsecas dos herbicidas, dos solos e do clima influenciam a lixiviação, sendo mais suscetíveis os herbicidas com elevada solubilidade em água e fraca adsorção ao solo. O herbicida, para ser lixiviado, deve estar na solução do solo ou adsorvido a pequenas partículas, como argilas, ácidos fúlvicos e húmicos de baixo peso molecular, aminoácidos, peptídeos, açúcares, entre outros (Oliveira, 2001).

Herbicidas solúveis em água, como tebuthiuron e trifloxysulfuron-sodium, tornam-se mais disponíveis na solução do solo, facilitando sua absorção pelas plantas; apesar de permitir o controle de plantas daninhas, eles podem provocar toxicidade em culturas sucessivas. Dessa forma, a utilização de plantas fitorremediadoras em ambientes com resíduo desses herbicidas é de grande importância, por favorecer a descontaminação do solo e permitir a antecipação do plantio de culturas sensíveis.

Objetivou-se com este trabalho avaliar o efeito da umidade do solo sobre a capacidade de *Canavalia ensiformis* e *Stizolobium aterrimum* de remediar solos contaminados com os herbicidas tebuthiuron ou trifloxysulfuron-sodium.

MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho, desenvolvido em casa de vegetação, foi conduzido em duas etapas. Na primeira, visando avaliar o crescimento das espécies remediadoras em solo com diferentes níveis de umidade, após o enchimento dos vasos com solo devidamente adubado, umidade ajustada de acordo com os níveis desejados: 0,287; 0,358; 0,431; e 0,575 kg de água por kg⁻¹ de solo (equivalentes a 28,7; 35,8; 43,1; e 57,5% de umidade) e tratados com trifloxysulfuron-sodium (7,5 g ha⁻¹), tebuthiuron (1.000,0 g ha⁻¹) e ausência de herbicida, fez-se a semeadura das espécies remediadoras (*Canavalia ensiformis* e *Stizolobium aterrimum*). Nessa mesma época, vasos sem planta remediadora, porém com os mesmos níveis de umidade e com aplicação dos herbicidas, foram mantidos nas mesmas condições daqueles com plantas remediadoras. Para avaliação do crescimento das plantas, cada conjunto de vasos com uma espécie

remediadora foi considerado um experimento disposto em esquema fatorial 3 x 4 (três doses de herbicida e quatro níveis de umidade), sob delineamento inteiramente casualizado, com três repetições. Os diferentes níveis de umidade foram estabelecidos a partir da curva de retenção de água do solo (Figura 1). Utilizaram-se vasos com capacidade para 6 L, preenchidos com 4 kg de solo cuja caracterização química e física é apresentada na Tabela 1. A semeadura das espécies remediadoras foi realizada um dia após a aplicação do herbicida; após a emergência delas foi feito o desbaste, deixando-se três plantas por vaso. Aos 60 dias após a semeadura (DAS), as plantas foram cortadas rente ao solo, sendo avaliadas a altura e massa seca da parte aérea (MSPA) após secagem das plantas em estufa (70 °C por 72 h). Durante o período de condução do experimento manteve-se a umidade do solo nos níveis desejados, por meio de pesagens diárias dos vasos com reposição da água consumida. A parte aérea das plantas remediadoras, após secagem, avaliação e moagem, foi devolvida ao respectivo vaso, em razão da possibilidade da presença de resíduo do herbicida na parte aérea dessas plantas.

Os dados foram submetidos à análise de variância. A comparação de médias entre as doses dos herbicidas, dentro de cada nível de umidade no solo e para cada espécie, foi realizada por meio do teste de Tukey a 5% de probabilidade, e o efeito de cada nível de umidade no solo para cada dose dos herbicidas, por regressão. Os modelos foram escolhidos com base na significância dos coeficientes de regressão, utilizando-se o teste “t” a 5% de probabilidade, no fenômeno biológico e no coeficiente de determinação (r^2).

Na segunda etapa, avaliou-se a capacidade remediadora de *C. ensiformis* e *S. aterrimum*, verificando o nível de descontaminação a partir da primeira etapa. Os tratamentos avaliados foram compostos pela combinação entre quatro níveis de umidade e cinco tipos de cultivo prévio: cultivo de mucuna-preta (*Stizolobium aterrimum*) e feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*) na presença e ausência do herbicida e um tratamento sem cultivo prévio e com aplicação do herbicida, dispostos em esquema fatorial 4 x 5, sob delineamento inteiramente casualizado, com três repetições, sendo um experimento para cada herbicida avaliado. Amostras de 0,5 kg de solo foram retiradas dos vasos (6 L) utilizados na primeira etapa e colocadas em vasos de 0,5 L. Em seguida, cultivou-se a espécie indicadora da presença de resíduo de cada herbicida: sorgo (*Sorghum bicolor*) para bioindicação do trifloxysulfuron-sodium e soja (*Glycine max*) para o tebuthiuron. Para desenvolvimento dessas plantas, em todos os tratamentos a umidade do solo foi mantida em torno de 80% de sua capacidade de campo (0,431 kg

kg⁻¹, correspondente a 43,1% de umidade). Aos 20 DAS, fez-se a avaliação do grau de intoxicação das plantas indicadoras pelos herbicidas (atribuindo-se notas variando de zero, para ausência de intoxicação, a 100, para morte da planta). Nessa ocasião, determinou-se ainda a altura e a massa seca da parte aérea das plantas.

Os dados referentes às espécies indicadoras (sorgo e soja) foram submetidos à análise de variância. A comparação de médias entre os tipos de cultivo prévio, dentro de cada nível de umidade no solo, foi realizada por meio do teste de Tukey a 5% de probabilidade, e o efeito de cada nível de umidade do solo para cada tipo de cultivo prévio, por regressão. Os modelos foram escolhidos com base na significância dos coeficientes de regressão, utilizando-se o teste “t” a 5% de probabilidade, no fenômeno biológico e no coeficiente de determinação (r²).

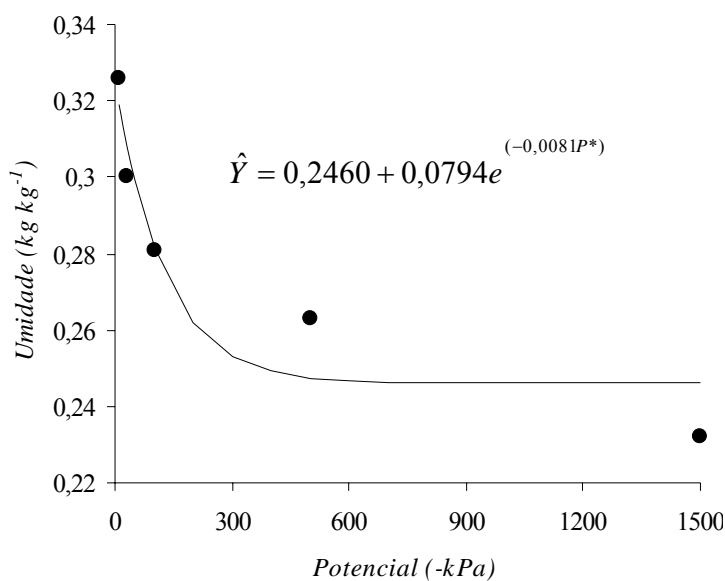


Figura 1 - Curva de retenção de água no Argissolo Vermelho-Amarelo utilizado no experimento. P* = potencial de retenção.

Tabela 1 - Composição físico-química de amostra do solo Argissolo Vermelho-Amarelo utilizado no experimento

Análise granulométrica (dag kg⁻¹)										
Argila	Silte	Areia fina	Areia grossa				Classificação textural			
39	11	17	33				Argilo-arenosa			
Análise Química										
pH	P	K ⁺	H + Al	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	CTC _{total}	V	M	MO
H ₂ O	mg dm ⁻³		cmol _c dm ⁻³					%		dag kg ⁻¹
5,0	0,6	18	5,94	1,1	0,1	0,0	6,09	2	88	2,18

Análises realizadas nos Laboratórios de Análises Físicas e Químicas de Solo do Departamento de Solos da UFV, segundo a metodologia descrita pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária-EMBRAPA (1997).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Verificou-se efeito significativo da umidade no solo contaminado por trifloxysulfuron-sodium ou tebuthiuron sobre a altura e massa seca da parte aérea (MSPA) da espécie remediadora *Canavalia ensiformis*. Na presença do trifloxysulfuron-sodium, essa espécie teve a altura e MSPA reduzidas quando comparada ao tratamento sem herbicida. Nos tratamentos que receberam o tebuthiuron, independentemente do nível de umidade no solo, *C. ensiformis* não se desenvolveu até a época de avaliação (60 DAS - Tabela 2).

Em todos os níveis de umidade testados, os valores para altura e MSPA de *S. aterrimum* na presença do trifloxysulfuron-sodium foram semelhantes aos observados no tratamento sem herbicida, mostrando que não houve efeito desse herbicida no seu crescimento. Na presença do tebuthiuron, observou-se crescimento de *S. aterrimum* nos menores níveis de umidade (28,7 e 35,8%), porém pouco expressivo em relação ao observado no solo sem herbicida. Enquanto nos vasos contendo solo sem herbicida a altura e MSPA observadas para o nível de 28,7% de água no solo foram, respectivamente, de 165,00 cm e 12,44 g, na presença do tebuthiuron esses valores foram de 39,67 cm e 3,02 g, ou seja, em torno de 25% dos valores observados no tratamento controle (Tabela 3). Segundo Rodrigues & Almeida (2005), o tebuthiuron apresenta elevada solubilidade em água (2.570 mg L⁻¹ a 20 °C), podendo, neste trabalho, ter influenciado sua disponibilidade nas maiores umidades testadas, não permitindo o crescimento de *S. aterrimum* até a época de avaliação (60 DAS). Entretanto, pode-se

inferir que essa espécie apresenta maior tolerância a esse produto, comparada a *C. ensiformis*, a qual não se desenvolveu até a época de avaliação, independentemente do nível de umidade.

Tabela 2 – Valores médios de altura e massa seca da parte aérea de plantas de *Canavalia ensiformis* cultivadas em solo mantido com diferentes níveis de umidade, com e sem aplicação de trifloxysulfuron-sodium ou tebuthiuron, com os respectivos coeficientes de variação

Umidade no solo (kg kg ⁻¹)	Altura das plantas (cm)			Massa seca da parte aérea (g)		
	Trifloxysulfuron-sodium	Tebuthiuron	Sem herbicida	Trifloxysulfuron-sodium	Tebuthiuron	Sem herbicida
0,287	55,00 b	0,00 c	128,33 a	9,72 b	0,00 c	24,80 a
0,358	106,67 b	0,00 c	188,33 a	15,85 b	0,00 c	32,37 a
0,431	101,67 b	0,00 c	203,33 a	20,19 b	0,00 c	43,72 a
0,575	76,33 b	0,00 c	188,33 a	14,67 b	0,00 c	41,04 a
CV (%)	9,24			19,70		

Médias seguidas de mesma letra na linha, para cada variável, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 3 - Valores médios de altura e massa seca da parte aérea de plantas de *Stizolobium aterrimum* cultivadas em solo mantido com diferentes níveis de umidade, com e sem aplicação de trifloxysulfuron-sodium ou tebuthiuron, com os respectivos coeficientes de variação

Umidade no solo (kg kg ⁻¹)	Altura das plantas (cm)			Massa seca da parte aérea (g)		
	Trifloxysulfuron-sodium	Tebuthiuron	Sem herbicida	Trifloxysulfuron-sodium	Tebuthiuron	Sem herbicida
0,287	178,33 a	39,67 b	165,00 a	12,98 a	3,02 b	12,44 a
0,358	183,33 a	24,45 b	176,67 a	23,78 a	2,46 b	24,32 a
0,431	195,68 a	0,00 b	194,99 a	26,15 a	0,00 b	26,41 a
0,575	191,67 a	0,00 b	181,67 a	26,57 a	0,00 b	23,09 a
CV (%)	8,55			9,65		

Médias seguidas de mesma letra na linha, para cada variável, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Quando se avaliou o comportamento das espécies remediadoras com o aumento da umidade, observou-se que em solo com presença e ausência do herbicida trifloxysulfuron-sodium o aumento de umidade interferiu no crescimento de *C. ensiformis*. Na presença de trifloxysulfuron-sodium, a altura máxima foi de 110,55 cm na umidade de 0,444 kg kg⁻¹ e, na ausência deste, de 212,50 cm na umidade de 0,472 kg

kg⁻¹ (Figura 2). Na presença desse herbicida, o maior valor de MSPA obtido (19,97 g) foi na umidade de 0,455 kg kg⁻¹ e na ausência (42,74 g) na umidade de 0,449 kg kg⁻¹ (Figura 3).

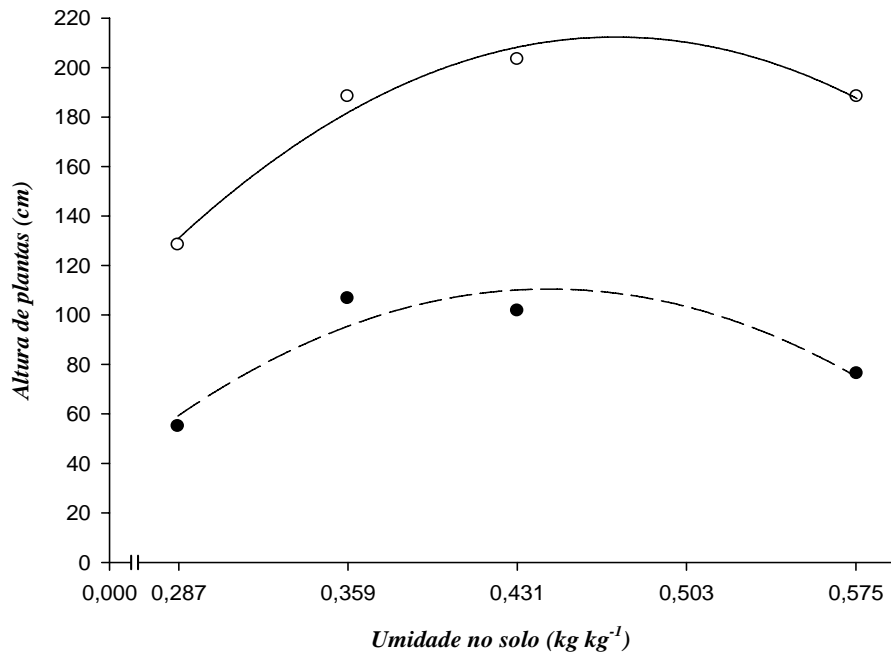


Figura 2 – Estimativa e valor observado da altura de plantas de *Canavalia ensiformis* cultivadas em solo com e sem aplicação de trifloxysulfuron-sodium, em função de diferentes níveis de umidade (U). (com herbicida: ● – $\hat{Y} = -298,73 + 1843,7U - 2076,3*U^2$, $r^2 = 0,87$; e sem herbicida: ○ – $\hat{Y} = -317,09 + 2242,4U - 2373,67*U^2$, $r^2 = 0,97$).

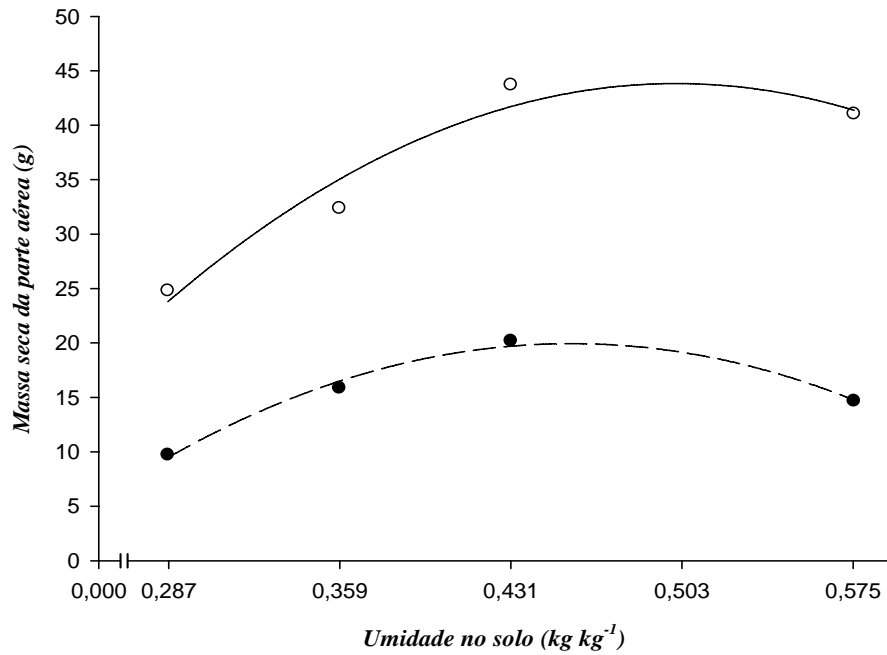


Figura 3 - Estimativa e valor observado da massa seca da parte aérea de plantas de *Canavalia ensiformis* cultivadas em solo com e sem aplicação de trifloxysulfuron-sodium, em função de diferentes níveis de umidade (U). (com herbicida: ● – $\hat{Y} = -56,432 + 335,24*U - 367,74*U^2$, $r^2 = 0,99$; e sem herbicida: ○ – $\hat{Y} = -66,919 + 443,47*U - 443,73*U^2$, $r^2 = 0,95$).

Com o aumento da umidade do solo, observou-se acréscimo na MSPA de *S. aterrimum* na presença e ausência do herbicida trifloxysulfuron-sodium. Na presença desse herbicida, o maior valor de MSPA (28,71 g) foi obtido quando a espécie foi cultivada em solo com umidade de 0,494 kg kg⁻¹. Na ausência de herbicida, a maior produção de MSPA (28,25 g) foi obtida quando cultivada em solo com umidade de 0,468 kg kg⁻¹. Nos níveis de umidade superiores a esses observou-se tendência em reduzir a produção de MSPA (Figura 4).

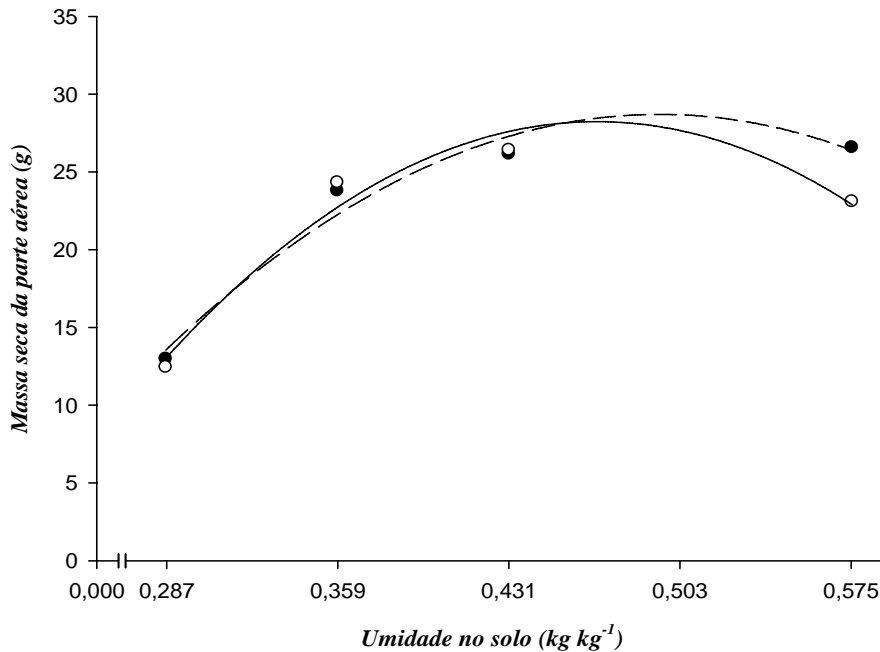


Figura 4 - Estimativa e valor observado da massa seca da parte aérea de plantas de *Stizolobium aterrimum* cultivadas em solo com e sem aplicação de trifloxysulfuron-sodium, em função de diferentes níveis de umidade (U). (com herbicida: ● – $\hat{Y} = - 57,636 + 349,86U - 354,36*U^2$, $r^2= 0,94$; e sem herbicida: ○ – $\hat{Y} = - 73,588 + 435,65U - 465,87*U^2$, $r^2= 0,95$).

Quanto ao herbicida tebuthiuron, aos 20 dias após a semeadura (DAS) da espécie indicadora (soja) observaram-se os efeitos das espécies remediadoras e dos diferentes níveis de umidade sobre a altura, a MSPA e os sintomas de intoxicação nas plantas de soja. Plantas cultivadas nos solos anteriormente remediados pelas espécies *C. ensiformis* e *S. aterrimum* evidenciaram menor disponibilidade desse herbicida na solução do solo, permitindo melhor crescimento da soja em comparação ao tratamento não-fitorremediado. Nessas condições, verificou-se que a altura e a MSPA das plantas de soja foram maiores que no solo sem cultivo prévio. No que se refere ao efeito do teor de água no solo nos tratamentos anteriormente remediados por *S. aterrimum*, as plantas de soja apresentaram maior crescimento quando cultivadas em solo com maior nível de água (Tabela 4). Admitindo que o tebuthiuron apresente maior taxa de degradação em solos mais úmidos (Rodrigues & Almeida, 2005), espera-se, no maior nível de umidade no solo, menor residual desse produto.

Avaliando a intoxicação das plantas de soja, verificou-se que *S. aterrimum* foi mais eficiente na descontaminação do solo, quando comparada a *C. ensiformis*. Foi

observada maior severidade dos sintomas de intoxicação nas plantas de soja cultivadas em solo remediado por *C. ensiformis* mantido anteriormente na menor umidade (0,287 kg kg⁻¹). Admitindo-se que, no cultivo da soja, a umidade do solo foi padronizada para 0,431 kg kg⁻¹, é provável que o herbicida anteriormente não disponibilizado totalmente para *C. ensiformis*, por estar fortemente adsorvido à argila do solo, tenha se tornado disponível para a soja devido à maior disponibilidade de água, que promoveu a liberação do herbicida para solução do solo (Tabela 4). Rocha (2003), estudando a sorção de 2,4-D e diuron, verificou que a mineralização desses herbicidas foi maior nas amostras com maior teor de água, sendo o 2,4-D mais mineralizado que o diuron.

Tabela 4 – Valores médios de massa seca da parte aérea (MSPA), altura e intoxicação de plantas de soja aos 20 dias após semeadura cultivadas em solo mantido com diferentes níveis de umidade, com e sem aplicação de tebuthiuron, remediados ou não por *Canavalia ensiformis* e *Stizolobium aterrimum* por 60 dias após aplicação do herbicida, com os respectivos coeficientes de variação

Característica avaliada	*Umidade no solo (kg kg ⁻¹)	<i>Canavalia ensiformis</i>		<i>Stizolobium aterrimum</i>		<i>Sem cultivo prévio</i>
		<i>Tebuthiuron</i>	<i>Sem herbicida</i>	<i>Tebuthiuron</i>	<i>Sem herbicida</i>	<i>Tebuthiuron</i>
MSPA (g)	0,287	0,307 c	0,463 a b	0,383 b c	0,497 a	0,253 d
	0,358	0,360 b	0,567 a	0,333 b	0,627 a	0,031 c
	0,431	0,317 c	0,450 b	0,320 c	0,660 a	0,071 d
	0,575	0,327 c	0,570 a	0,413 b	0,540 a	0,031 d
CV (%)		-----9,71-----				
Altura (cm)	0,287	14,40 a	16,03 a	17,23 a	16,77 a	4,00 b
	0,358	19,93 a b	16,70 b	16,77 b	21,63 a	3,00 c
	0,431	15,47 b	16,13 b	16,93 b	21,27 a	5,00 c
	0,575	15,37 b	18,17 a b	17,41 a b	18,80 a	5,17 c
CV (%)		-----9,93-----				
Intoxicação (%)	0,287	80,00 b	0,00 d	26,67 c	0,00 d	92,67 a
	0,358	30,00 b	0,00 c	34,00 b	0,00 c	93,33 a
	0,431	56,67 b	0,00 d	48,33 c	0,00 d	86,67 a
	0,575	70,00 b	0,00 d	23,33 c	0,00 d	89,00 a
CV (%)		-----8,88-----				

Médias seguidas de mesma letra, em cada linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. * Para a bioindicação do herbicida durante o cultivo da soja, a umidade do solo foi padronizada para 0,431 kg kg⁻¹.

Observa-se, na Figura 6, que no solo cultivado com *S. aterrimum* que não recebeu o herbicida ocorreu aumento na MSPA em plantas de soja até a umidade de 0,441 kg kg⁻¹. No solo que foi anteriormente tratado com tebuthiuron e cultivado com *S. aterrimum*, menor valor de MSPA de plantas de soja foi observado quando essa cultura foi cultivada em solo com umidade de 0,417 kg kg⁻¹. Como *S. aterrimum* se desenvolveu na época de avaliação (60 DAS) até a umidade de 0,358 kg kg⁻¹, acredita-se que o herbicida não degradado anteriormente por *S. aterrimum* fique disponível para soja.

Na Figura 7, observa-se o poder remediador de *S. aterrimum* resultante em menor índice de intoxicação das plantas de soja, quando comparado ao crescimento desta em solo onde não houve cultivo prévio de espécies remediadoras. Verifica-se que o efeito dos níveis de umidade do solo não foi significativo para os tipos de cultivo prévio com *C. ensiformis* na ausência e presença do herbicida tebuthiuron. Valores médios de MSPA, altura e intoxicação podem ser observados na Tabela 5.

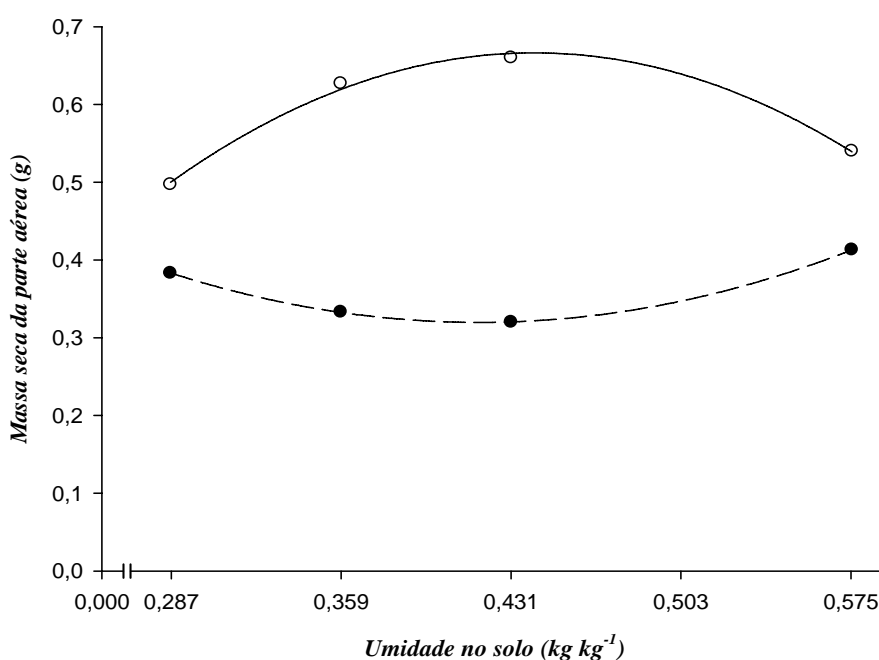


Figura 6 - Estimativa e valor observado da massa seca da parte aérea de plantas de soja cultivadas em solo com e sem aplicação de tebuthiuron, em função de diferentes níveis de umidade (U) após 60 dias de remediação do solo pela espécie *Stizolobium aterrimum* (com herbicida: ● – $\hat{Y} = 0,9726 - 3,1306U + 3,7519*U^2$, $r^2 = 0,97$; e sem herbicida: ○ – $\hat{Y} = - 0,7053 + 6,2295U - 7,0706*U^2$, $r^2 = 0,96$).

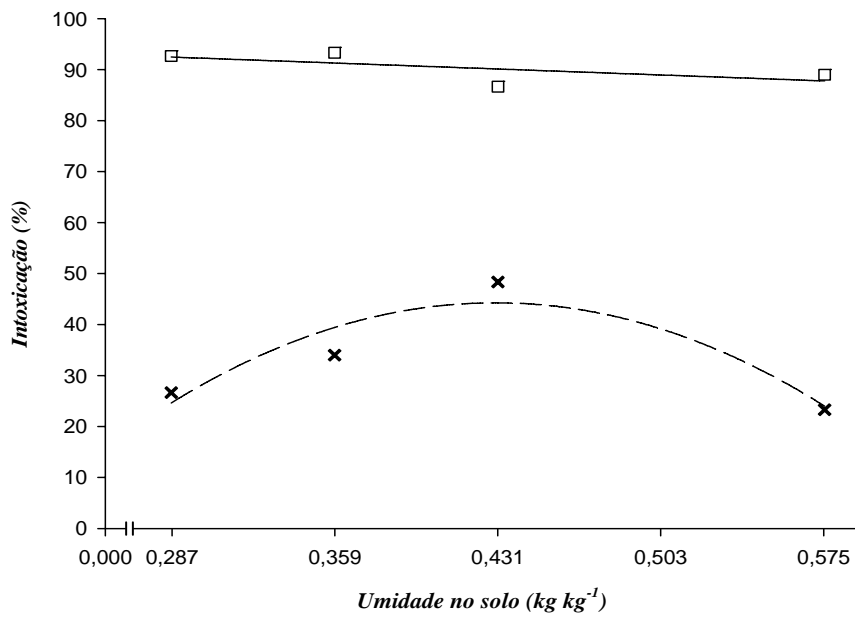


Figura 7 – Estimativa e valor observado da intoxicação de plantas de soja cultivadas em solo com aplicação de tebuthiuron, em função de diferentes níveis de umidade (U) após 60 dias de remediação do solo pela espécie *Stizolobium aterrimum* (x – $\hat{Y} = -134,22 + 830,8U - 966,32*U^2$, $r^2=0,87$) e sem cultivo prévio de espécies fitorremediadoras (□ – $\hat{Y} = 94,8333 - 1,76667*U$, $r^2=0,97$).

Tabela 5 - Equações ajustadas para massa seca da parte aérea, altura e intoxicação de plantas de soja aos 20 dias após semeadura em solo com diferentes níveis de umidade (U), com e sem aplicação de tebuthiuron, remediados ou não pelas espécies *Canavalia ensiformis* e *Stizolobium aterrimum* por 60 dias após aplicação do herbicida, com os respectivos coeficientes de determinação

Tratamento	Equação	r ²
Massa seca da parte aérea (g)		
<i>Stizolobium aterrimum</i> na presença de tebuthiuron	$\hat{Y} = 0,9726 - 3,1306U + 3,7519U^2$	0,97
<i>Stizolobium aterrimum</i> na ausência de tebuthiuron	$\hat{Y} = - 0,7053 + 6,2295U - 7,0706U^2$	0,96
<i>Canavalia ensiformis</i> na presença de tebuthiuron	$\hat{Y} = 0,328$	-
<i>Canavalia ensiformis</i> na ausência de tebuthiuron	$\hat{Y} = 0,513$	-
Sem cultivo prévio e com presença de tebuthiuron	$\hat{Y} = 0,040$	-
Altura de plantas (cm)		
<i>Stizolobium aterrimum</i> na presença de tebuthiuron	$\hat{Y} = 17,09$	-
<i>Stizolobium aterrimum</i> na ausência de tebuthiuron	$\hat{Y} = 19,62$	-
<i>Canavalia ensiformis</i> na presença de tebuthiuron	$\hat{Y} = 16,29$	-
<i>Canavalia ensiformis</i> na ausência de tebuthiuron	$\hat{Y} = 16,76$	-
Sem cultivo prévio e com presença de tebuthiuron	$\hat{Y} = 4,29$	-
Intoxicação (%)		
<i>Stizolobium aterrimum</i> na presença de tebuthiuron	$\hat{Y} = - 8,41669 + 40,85U - 8,08334U^2$	0,62
<i>Stizolobium aterrimum</i> na ausência de tebuthiuron	$\hat{Y} = 0,00$	-
<i>Canavalia ensiformis</i> na presença de tebuthiuron	$\hat{Y} = 59,17$	-
<i>Canavalia ensiformis</i> na ausência de tebuthiuron	$\hat{Y} = 0,00$	-
Sem cultivo prévio e com presença de tebuthiuron	$\hat{Y} = 94,8333 - 1,76667U$	0,97

Vinte dias após a semeadura (DAS) da espécie indicadora em solo sob contaminação do herbicida trifloxysulfuron-sodium, observaram-se efeitos das espécies remediadoras e dos diferentes níveis de umidade sobre altura, MSPA e grau de intoxicação das plantas de sorgo utilizadas na bioindicação desse herbicida.

A fitorremediação do solo contaminado pelo trifloxysulfuron-sodium foi eficiente por ambas as espécies remediadoras, independentemente do nível de umidade adotado. Isso ficou evidenciado pelo fato de que plantas de sorgo cultivadas em amostras de solo oriundas de vasos que receberam o trifloxysulfuron-sodium, sem cultivo prévio das espécies remediadoras, tiveram seu crescimento severamente reduzido. Tanto a altura quanto a MSPA das plantas de sorgo não variaram onde houve cultivo prévio de *C. ensiformis* ou *S. aterrimum*, não sendo observados, em ambos os casos, sintomas de intoxicação (Tabela 6). Também Procópio et al. (2005) verificaram que, entre 15 espécies de adubos verdes utilizados em programa de fitorremediação desse herbicida, somente *C. ensiformis* e *S. aterrimum* possibilitaram o cultivo

seqüencial de plantas de feijão, sem prejuízos para biomassa, altura e toxidez da parte aérea, em solo com a umidade em torno de 80% da capacidade de campo e contaminado com até duas vezes a dosagem comercialmente recomendada.

Tabela 6 – Valores médios de massa seca da parte aérea (MSPA), altura e intoxicação de plantas de sorgo aos 20 dias após sementeira cultivadas em solo com diferentes níveis de umidade, com e sem aplicação de trifloxysulfuron-sodium, remediados ou não por *Canavalia ensiformis* e *Stizolobium aterrimum* por 60 dias após aplicação do herbicida, com os respectivos coeficientes de variação

Característica avaliada	*Umidade no solo (kg kg ⁻¹)	<i>Canavalia ensiformis</i>		<i>Stizolobium aterrimum</i>		<i>Sem cultivo prévio</i>
		<i>Trifloxysulfuron-sodium</i>	<i>Sem herbicida</i>	<i>Trifloxysulfuron-sodium</i>	<i>Sem herbicida</i>	<i>Trifloxysulfuron-sodium</i>
MSPA (g)	0,287	0,317 a b	0,267 b	0,357 a b	0,370 a	0,014 c
	0,358	0,360 a	0,333 a	0,327 a	0,297 a	0,036 b
	0,431	0,317 a b	0,243 b	0,353 a b	0,253 b	0,044 c
	0,575	0,388 a	0,323 a	0,337 a	0,313 a	0,052 b
CV (%)		-----15,95-----				
Altura (cm)	0,287	18,02 a	18,05 a	17,97 a	18,05 a	5,00 b
	0,358	18,03 a	18,07 a	18,03 a	17,98 a	5,67 b
	0,431	18,08 a	18,03 a	18,08 a	18,00 a	9,83 b
	0,575	18,04 a	18,06 a	17,92 a	18,01 a	10,67 b
CV (%)		-----5,98-----				
Intoxicação (%)	0,287	0,00	0,00	0,00	0,00	85,00
	0,358	0,00	0,00	0,00	0,00	92,00
	0,431	0,00	0,00	0,00	0,00	90,00
	0,575	0,00	0,00	0,00	0,00	85,00

Médias seguidas de mesma letra, em cada linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. * Para a bioindicação do herbicida durante o cultivo do sorgo, a umidade do solo foi padronizada para 0,431 kg kg⁻¹.

O aumento da umidade do solo só foi significativo para altura de plantas de sorgo cultivadas em solos contaminados com o herbicida trifloxysulfuron-sodium, não remediados por *C. ensiformis* ou *S. aterrimum* (Tabela 7). Maior valor de altura foi observado para as plantas de sorgo cultivadas em solos mantidos anteriormente na maior umidade. Como não houve cultivo prévio das espécies remediadoras, acredita-se que a maior disponibilidade de água tenha contribuído para ativar a degradação das moléculas do herbicida (Figura 8). Segundo Rodrigues & Almeida (2005), o trifloxysulfuron-sodium degrada no solo inicialmente por hidrólise química.

Tabela 7 – Equações ajustadas para massa seca da parte aérea, altura e intoxicação de plantas de sorgo aos 20 dias após semeadura em solo com diferentes níveis de umidade (U), com e sem aplicação de trifloxysulfuron-sodium, remediados ou não pelas espécies *Canavalia ensiformis* e *Stizolobium aterrimum* por 60 dias após aplicação do herbicida, com os respectivos coeficientes de determinação

Tratamento	Equação	r ²
	Massa seca da parte aérea (g)	
<i>Stizolobium aterrimum</i> na presença de trifloxysulfuron-sodium	$\hat{Y} = 0,343$	-
<i>Stizolobium aterrimum</i> na ausência de trifloxysulfuron-sodium	$\hat{Y} = 0,308$	-
<i>Canavalia ensiformis</i> na presença de trifloxysulfuron-sodium	$\hat{Y} = 0,346$	-
<i>Canavalia ensiformis</i> na ausência de trifloxysulfuron-sodium	$\hat{Y} = 0,292$	-
Sem cultivo prévio e com presença de trifloxysulfuron-sodium	$\hat{Y} = 0,036$	-
Altura de plantas (cm)		
<i>Stizolobium aterrimum</i> na presença de trifloxysulfuron-sodium	$\hat{Y} = 18,00$	-
<i>Stizolobium aterrimum</i> na ausência de trifloxysulfuron-sodium	$\hat{Y} = 18,01$	-
<i>Canavalia ensiformis</i> na presença de trifloxysulfuron-sodium	$\hat{Y} = 18,04$	-
<i>Canavalia ensiformis</i> na ausência de trifloxysulfuron-sodium	$\hat{Y} = 18,05$	-
Sem cultivo prévio e com presença de trifloxysulfuron-sodium	$\hat{Y} = 2,5 + 2,11667U$	0,73
Intoxicação (%)		
<i>Stizolobium aterrimum</i> na presença de trifloxysulfuron-sodium	$\hat{Y} = 0,00$	-
<i>Stizolobium aterrimum</i> na ausência de trifloxysulfuron-sodium	$\hat{Y} = 0,00$	-
<i>Canavalia ensiformis</i> na presença de trifloxysulfuron-sodium	$\hat{Y} = 0,00$	-
<i>Canavalia ensiformis</i> na ausência de trifloxysulfuron-sodium	$\hat{Y} = 0,00$	-
Sem cultivo prévio e com presença de trifloxysulfuron-sodium	$\hat{Y} = 87,53$	-

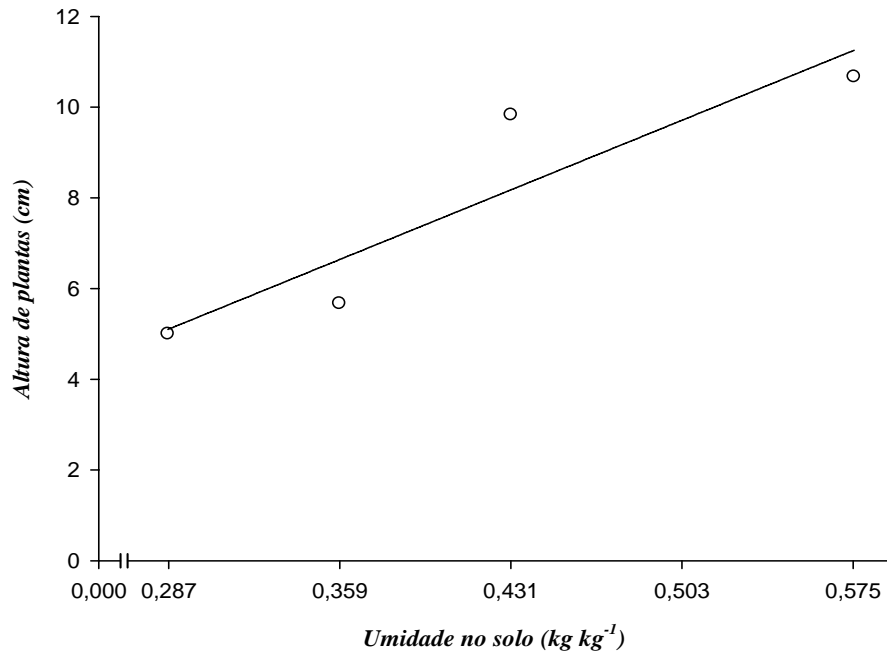


Figura 8 – Estimativa e valor observado da altura de plantas de sorgo cultivadas em solo com aplicação de trifloxysulfuron-sodium, em função de diferentes níveis de umidade (U) após 60 dias sem cultivo prévio de espécies fitorremediadoras (○ – $\hat{Y} = 2,5 + 2,11667*U$, $r^2 = 0,73$).

Dessa forma, os resultados indicam que os níveis de umidade de 0,287, 0,358, 0,431 e 0,575 kg de água por kg⁻¹ de solo não interferem na remediação do herbicida trifloxysulfuron-sodium pelas espécies vegetais *Canavalia ensiformis* e *Stizolobium aterrimum*. Para o tebuthiuron, o nível de umidade em torno de 0,431 kg kg⁻¹ promoveu baixo crescimento nas plantas de soja, provavelmente em razão da maior disponibilidade desse produto na solução do solo. *Stizolobium aterrimum* foi mais eficiente na descontaminação do solo com residual do tebuthiuron, comparada a *Canavalia ensiformis*.

LITERATURA CITADA

BLANCO, H.G. Destino, comportamento e resíduos dos herbicidas no solo. **Biológico**, v. 45, p. 225-248, 1979.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2° ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212 p.

FLURY, M. Experimental evidence of transport of pesticides through field soils: a review. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 25, n. 1, p. 25-45, 1996.

LEVANON, D.; CODLING, E. E.; MEISSINGER, J. J.; STARR, J. L. Mobility of agrochemicals through soil from two tillage systems. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 22, n. 1, p. 155-161, 1993.

MUELLER, T. C.; SHAW, D. R.; WITT, W. W. Relative dissipation of acetochlor, alachlor, metolachlor, and SAN 582 from three surface soils. **Weed Science**, Lawrence, v. 13, n. 1, p. 341-346, 1999.

OLIVEIRA, M. F. Comportamento de herbicidas no ambiente. In: OLIVEIRA Jr., R. S.; CONSTANTIN, J. **Plantas daninhas e seu manejo**. Guaíba: Agropecuária, 2001. p. 315-362.

PROCÓPIO, S.O.; SANTOS, J.B.; SILVA, A.A.; PIRES, F.R.; RIBEIRO JUNIOR, J.I.; SANTOS, E.A. Potencial de espécies vegetais para a remediação do herbicida trifloxysulfuron-sodium. **Planta Daninha**, v.23, n.1, p.9-16, 2005.

ROCHA, W.S.D. **Sorção de 2,4-D e diuron nos agregados organominerais de latossolos em função dos conteúdos de matéria orgânica e de água**. 2003. 88p. Dissertação (Doutorado em Solos e Nutrição e Plantas)-Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

RODRIGUES, B. N.; ALMEIDA, F. S. **Guia de herbicidas**. 5° ed. Londrina: Edição dos Autores, 2005. 591p.

WALKER, A.; MOON, Y.; WELCH, S. J. Influence of temperature, soil moisture and soil characteristics on the persistence of alachlor. **Pesticide Science**, London, v. 35, n. 1, p. 109-116, 1992.

WEED, D.A.J.; KANWAR, R.S.; STOLTENBERG, D.E.; PFEIFFER, R.L. Dissipation and distribution of herbicides in the soil profile. **Journal of Environmental of Quality**, Madison, v. 24, n. 1, p. 68-79, 1995.

CONSIDERAÇÕES GERAIS

A fitorremediação é uma opção para o tratamento eficiente de solo e água contaminados com herbicidas de longo período residual. Para o sucesso dessa técnica, além do uso de plantas associadas à sua microbiota, outros fatores são importantes na degradação do herbicida, como matéria orgânica, umidade, pH, entre outros.

Neste trabalho, objetivou-se definir técnicas agronômicas, visando remediar solo contaminado com os herbicidas tebuthiuron e trifloxysulfuron-sodium. Para isso, três experimentos foram conduzidos em casa de vegetação. No primeiro, avaliou-se a capacidade remediadora das espécies vegetais *Canavalia ensiformis* e *Stizolobium aterrimum* em solo enriquecido com composto orgânico e tratado com o herbicida tebuthiuron; no segundo, avaliou-se a capacidade remediadora das mesmas espécies em solo enriquecido com composto orgânico e tratado com o herbicida trifloxysulfuron-sodium; e, no terceiro, avaliou-se a capacidade remediadora dessas em solos com diferentes níveis de umidade e tratados com o herbicida tebuthiuron ou trifloxysulfuron-sodium.

Concluiu-se que:

- A adição de composto orgânico em solo contaminado com trifloxysulfuron-sodium e tebuthiuron promoveu maior crescimento das espécies remediadoras *Canavalia ensiformis* e *Stizolobium aterrimum*, aumentando a capacidade de descontaminação.
- Os níveis de umidade adotados não interferiram na remediação do solo tratado com o herbicida trifloxysulfuron-sodium pelas espécies vegetais *Canavalia ensiformis* e *Stizolobium aterrimum*; contudo, para o tebuthiuron o nível de umidade em torno de 0,431 kg kg⁻¹ promoveu baixo crescimento nas plantas de soja.
- *Stizolobium aterrimum* foi mais eficiente na descontaminação do solo com residual do tebuthiuron, comparada a *Canavalia ensiformis*.