

ALESSANDRA FERREIRA BELO

ASPECTOS FISIOLÓGICOS DE PLANTAS COM POTENCIAL REMEDIADOR  
DE SOLO CONTAMINADO COM SULFENTRAZONE E PICLORAM

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

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2010

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

T

B452a  
2010

Belo, Alessandra Ferreira, 1975-

Aspectos fisiológicos de plantas com potencial remediador  
de solo contaminado com sulfentrazone e picloram /

Alessandra Ferreira Belo. – Viçosa, MG, 2010.

viii, 68f. : il. ; 29cm.

Orientador: Lino Roberto Ferreira.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Fitorremediação. 2. Solos - Descontaminação.  
3. Herbicidas. 4. Plantas - Aspectos fisiológicos.

I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22.ed. 628.5

ALESSANDRA FERREIRA BELO

ASPECTOS FISIOLÓGICOS DE PLANTAS COM POTENCIAL REMEDIADOR  
DE SOLO CONTAMINADO COM SULFENTRAZONE E PICLORAM

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

APROVADA: 30 de abril de 2010.

---

Antonio Alberto da Silva  
(Co-orientador)

---

José Barbosa dos Santos  
(Co-orientador)

---

Paulo Roberto Cecon

---

Evander Alves Ferreira

---

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.

A minha sobrinha Brenda, pela alegria e carinho em todos os momentos.

Ao meu avô Vitorino, pelo incentivo e carinho.

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, José Barbosa dos Santos e Paulo Roberto Cecon, pelos conselhos e pelas sugestões, que contribuíram para realização deste trabalho.

Aos amigos e colegas do Grupo de Pesquisa de Manejo Integrado de Plantas Daninhas, 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 maio de 2006, tornou-se Mestre em Fitotecnia pela Universidade Federal de Viçosa. Nesse mesmo mês, iniciou o curso de Doutorado no Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, nessa mesma universidade, submetendo-se à defesa de tese em abril de 2010.

## SUMÁRIO

<b>RESUMO .....</b>	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>viii</b>
<b>INTRODUÇÃO GERAL.....</b>	<b>1</b>
<b>LITERATURA CITADA .....</b>	<b>5</b>
<b>ATIVIDADE FOTOSSINTÉTICA DE PLANTAS CULTIVADAS EM SOLO CONTAMINADO COM SULFENTRAZONE.....</b>	<b>9</b>
RESUMO .....	9
ABSTRACT.....	10
INTRODUÇÃO .....	10
MATERIAL E MÉTODOS .....	12
RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	14
LITERATURA CITADA.....	20
<b>POTENCIAL DE ESPÉCIES VEGETAIS NA REMEDIAÇÃO DE SOLO CONTAMINADO COM SULFENTRAZONE.....</b>	<b>23</b>
RESUMO .....	23
ABSTRACT.....	24
INTRODUÇÃO .....	25
MATERIAL E MÉTODOS .....	27
RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	29
LITERATURA CITADA.....	34
<b>ATIVIDADE FOTOSSINTÉTICA DE PLANTAS CULTIVADAS EM SOLO CONTAMINADO COM PICLORAM .....</b>	<b>38</b>
RESUMO .....	38
ABSTRACT.....	39
INTRODUÇÃO .....	39
MATERIAL E MÉTODOS .....	42
RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	43
LITERATURA CITADA.....	49

<b>POTENCIAL DE ESPÉCIES VEGETAIS NA REMEDIAÇÃO DE SOLO CONTAMINADO COM PICLORAM .....</b>	<b>53</b>
RESUMO .....	53
ABSTRACT.....	54
INTRODUÇÃO .....	55
MATERIAL E MÉTODOS .....	56
RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	59
LITERATURA CITADA.....	64
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>68</b>



## RESUMO

BELO, Alessandra Ferreira, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, abril de 2010.  
**Aspectos fisiológicos de plantas com potencial remediador de solo contaminado com sulfentrazone e picloram.** Orientador: Lino Roberto Ferreira.  
Co-orientadores: Antonio Alberto da Silva e José Barbosa dos Santos.

Objetivou-se, com este trabalho, avaliar a potencialidade de espécies vegetais na remediação de solos contaminados com os herbicidas sulfentrazone e picloram, por meio do processo de fitorremediação, bem como, a influência desses herbicidas nas variáveis associadas à atividade fotossintética dessas espécies. Para isso foram conduzidos quatro experimentos em casa de vegetação. No primeiro, avaliou-se os efeitos do herbicida sulfentrazone sobre as características associadas à atividade fotossintética das espécies *Helianthus annuus*, *Canavalia ensiformis*, *Dolichos lab lab* e *Arachis hypogaea*; no segundo, o potencial dessas mesmas espécies vegetais na remediação de solo contaminado com sulfentrazone; no terceiro, os efeitos do herbicida picloram sobre as características associadas à atividade fotossintética das espécies *Brachiaria brizantha*, *Brachiaria decumbens*, *Eleusine coracana* e *Zea mays*; e, no quarto o potencial dessas mesmas espécies vegetais na remediação de solo contaminado com picloram. Para o solo contaminado com sulfentrazone, constatou-se que as variáveis associadas à atividade fotossintética das espécies estudadas podem ser afetadas. Todavia, o acúmulo de matéria seca da parte aérea dessas espécies não foi comprometido, independentemente de sua concentração no solo, comprovando a tolerância das espécies ao sulfentrazone. *H. annuus* é a espécie que apresenta melhor capacidade de remediação de solo contaminado com esse herbicida. Para o solo contaminado com picloram, constatou-se que *Z. mays* foi a espécie menos afetada por esse herbicida, com base nos atributos fisiológicos. Constatou-se, também que *B. brizantha*, *B. decumbens*, *E. coracana* e *Z. mays* apresentam potencialidade de remediação, entretanto, *B. decumbens*, *E. coracana* e *B. brizantha* mostraram-se mais eficientes que *Z. mays*.

## ABSTRACT

BELO, Alessandra Ferreira, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, April, 2010.  
**Physiological aspects of plants with remediation potential of soil contaminated with picloram and sulfentrazone.** Adviser: Lino Roberto Ferreira. Co-advisers: Antonio Alberto da Silva and José Barbosa dos Santos.

The aimed of this work was to evaluate the potentiality of vegetal species in remediation of contaminated soils with the herbicides sulfentrazone and picloram, through phytoremediation process, as well as, the influence of these herbicides in the variables associated to photosynthetic activity of these species. For that, were conducted four experiments in greenhouse. In the first, was evaluated the effects of herbicide sulfentrazone on characteristics associated to photosynthetic activity of species *Helianthus annuus*, *Canavalia ensiformis*, *Dolichos lab lab* and *Arachis hypogaea*; in second, was evaluated the potential of these same species in soil remediation contaminated by sulfentrazone; in the third, was evaluated the effects of herbicide picloram on characteristics associated to photosynthetic activity of species *Brachiaria brizantha*, *Brachiaria decumbens*, *Eleusine coracana* and *Zea mays*; and in fourth, was evaluated the potential of these same species in soil remediation contaminated by picloram. For soil contaminated with sulfentrazone, was found that the variables associated with photosynthetic activity of the studied species may be affected. However, the dry matter accumulation of these species was not compromised, independently of herbicide concentration in the soil, demonstrating the tolerance of species to sulfentrazone. *H. annuus* showed the best capacity of remediation of contaminated soil with this herbicide. For soil contaminated with picloram, was found that *Z. mays* was less affected by this herbicide, based on physiological attributes. Was found also that *B. brizantha*, *B. decumbens*, *E. coracana* and *Z. mays* showed potential remediation of contaminated soil by picloram, however, *B. decumbens*, *E. coracana* and *B. brizantha* were more efficient than *Z. mays*.

## INTRODUÇÃO GERAL

Os herbicidas são compostos biologicamente ativos, cuja atividade e persistência podem afetar não somente as plantas daninhas de uma área, como os organismos não alvos, a exemplo da microbiota do solo (Reis et al., 2008), considerando que, quanto maior o período de atividade desses compostos, maiores os efeitos destes no solo.

Quando a molécula de um herbicida chega ao solo, essa pode ser degradada por processos bióticos e abióticos, ser sorvida aos colóides do solo ou lixiviada. A sorção e a degradação do composto químico definem a disponibilidade deste na solução do solo, onde pode ser absorvido pelas plantas ou ser lixiviado para camadas subsuperficiais, podendo atingir os cursos hídricos subterrâneos (Prata e Lavorenti, 2000).

As culturas agrícolas, também, podem ser afetadas negativamente com os residuais de herbicidas aplicados anteriormente na área, fenômeno esse chamado de *carryover*. Este fenômeno tem sido observado para os herbicidas simazine, linuron, diuron (Marriage et al., 1975), atrazine (Marriage et al., 1975; Robinson, 2008; Jablonowski et al., 2009), ametryn (Vivian et al., 2007), tebuthiuron (Blanco e Oliveira, 1987; Meyer e Bovey, 1988; Pires et al., 2008), trifloxysulfuron-sodium (Procópio et al., 2004, 2005a), além de outros, como picloram (Carmo et al., 2008b, Procópio et al. 2008) e sulfentrazone (Main et al., 2004; Blanco e Velini, 2005) comprovando a persistência e a potencialidade de contaminação ambiental desses compostos.

Dentre os herbicidas que apresentam longo período residual no solo destacam-se o picloram e o sulfentrazone. O picloram é muito utilizado em pastagens, pertence ao grupo dos herbicidas mimetizadores de auxinas. Esse produto, quando aplicado em plantas sensíveis, provoca distúrbios no metabolismo dos ácidos nucléicos, aumento da atividade enzimática, causando a destruição do floema por

provocar alongamento, turgescência e rompimento das membranas celulares (Silva, et al., 2007). Os herbicidas auxínicos atuam na sinalização do ácido abscísico (ABA), na obstrução de vasos de transporte e também causam acúmulo de cálcio nas células (Mercier, 2004), em ambos os casos promovendo o fechamento estomático, limitando a atividade fotossintética.

O sulfentrazone é recomendado para o controle de plantas daninhas em pré-emergência nas culturas da cana-de-açúcar, soja, citrus, café, eucalipto e em áreas não agrícolas (Rodrigues e Almeida, 2005). Esse herbicida pertence ao grupo dos inibidores da enzima Protox (protoporfirinogênio oxidase). A Protox está presente na rota de síntese da clorofila e dos citocromos (Silva et al., 2007). Com a inibição dessa enzima ocorrem diversos processos que culminam na formação de oxigênio “singlet”. Este radical livre, altamente reativo, provoca a peroxidação de lipídeos das membranas (Jacobs et al., 1991; Hess, 2000). A atuação desse herbicida pode promover a destruição da estrutura celular, comprometendo a atividade fotossintética (Tripathy et al., 2007). Por apresentar longa persistência no solo, o sulfentrazone pode inviabilizar o cultivo de plantas sensíveis por um longo período após a sua aplicação, dependendo da dose aplicada e das condições edafoclimáticas (Vivian et al., 2006).

Para minimizar o impacto ambiental causado pelos herbicidas, especialmente aqueles com longo período de atividade no solo, várias técnicas tem sido empregadas, destacando-se a fitorremediação que consiste na utilização de espécies vegetais para acelerar a desintoxicação de solos e águas contaminados com compostos tóxicos (Cunningham et al., 1996). Essa técnica tem sido uma opção promissora para o tratamento eficiente de ambientes edáficos e aquáticos contaminados com herbicidas (Pires et al., 2003a).

Diversos trabalhos de pesquisa têm comprovado a eficiência da técnica de fitorremediação na descontaminação de solos contaminados por herbicidas (Anderson et al., 1994; Rice et al., 1997; Wilson et al., 2000; Santos et al., 2004; Pires et al., 2005; Procópio et al., 2006; Belo et al., 2007a,b; Carmo et al. 2008a), no entanto, há carência de informações sobre a aplicabilidade dessa técnica a campo.

A utilização da fitorremediação para descontaminação de ambientes com resíduo de herbicidas é baseada na seletividade, natural ou desenvolvida, que algumas espécies vegetais exibem a determinados compostos ou mecanismos de ação. Esse fato pode ser de ocorrência comum em espécies agrícolas melhoradas

geneticamente e por várias espécies de plantas daninhas, tolerantes ou resistentes a certos herbicidas ou grupos de herbicidas. Essa seletividade deve-se ao fato de que os herbicidas podem ser absorvidos pelas folhas, caule ou raízes e serem translocados para diferentes tecidos da planta podendo, ainda ocorrer o processo de volatilização. Podem ainda ocorrer parcial ou completa degradação ou serem transformados em compostos menos tóxicos, combinados e/ou ligados a tecidos das plantas (Santos et al., 2007b).

Segundo diversos autores (Cunningham et al., 1996; Pires et al., 2003a; Santos et al., 2007a), a remediação de solo contaminado por herbicidas utilizando plantas, em alguns casos, pode ocorrer em decorrência da liberação de exsudatos radiculares, que estimulam a atividade de grupos de microrganismos que atuam diretamente na degradação do composto, caracterizando-se como um processo de bioestimulação (Seklemova et al., 2001).

A estimulação da microbiota do solo ocorre com o fornecimento de energia facilmente assimilável (Baxter e Cummings, 2006). Esses autores verificaram que em solo esterilizado não houve alteração nas concentrações de bromoxynil por 30 dias, entretanto, no mesmo solo não esterilizado houve redução da concentração com aplicação de glicose. Neste caso, verificou-se aceleração da degradação do herbicida, a qual foi concluída em apenas oito dias, evidenciando a importância da atividade microbiana na degradação de herbicida. Acredita-se que os exsudatos radiculares de algumas espécies vegetais possam, também, estimular a atividade microbiológica do solo, promovendo a aceleração da degradação dos herbicidas presentes no meio.

A identificação de espécies vegetais tolerantes ao herbicida é o primeiro passo para a elaboração de programas de descontaminação de solos (Pires et al., 2003b; Procópio et al. 2005b). Essas espécies, além de tolerantes ao herbicida devem apresentar eficiência na remediação de solos contaminados com esse. É importante que a espécie selecionada possua outras características desejáveis, como produção elevada de biomassa, que pode ser utilizada como fonte de alimento para animais ou contribuir para o aumento da matéria orgânica do solo (Belo, 2006).

Uma das maneiras para selecionar espécies tolerantes a herbicidas pode ser através das alterações fisiológicas provocadas pelos herbicidas nas plantas. Os herbicidas inibidores da fotossíntese, por exemplo, agem diretamente no transporte de elétrons no cloroplasto, no entanto, outros herbicidas interferem de forma indireta na fotossíntese, tais como os inibidores da Protox (Carreteiro, 2008) e os auxínicos,

que induzem o fechamento estomático e em muitos casos provocam danos aos tecidos das plantas que comprometem a atividade fotossintética e a respiração (Pemadasa e Jeyaseelan, 1976).

Face à grande utilização do picloram e sulfentrazone no Brasil, ao elevado potencial desses herbicidas de causar sérios problemas ambientais, há necessidade de pesquisas visando a descontaminação de solos contaminados com esses produtos. Sendo a fitorremediação uma técnica promissora tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental, objetivou-se, com este trabalho, avaliar a tolerância de espécies vegetais cultivadas em solo contaminado com os herbicidas sulfentrazone e picloram, com base nas variáveis associadas a atividade fotossintética, bem como, o potencial dessas espécies na remediação de solo contaminado com os referidos herbicidas.

## LITERATURA CITADA

ANDERSON, T.A. et al. Enhanced degradation of a mixture of three herbicides in the rhizosphere of a herbicide-tolerant plant. **Chemosphere**, v.28, p.1551-1557, 1994.

BAXTER, J.; CUMMINGS, S.P. The application of the herbicide bromoxynil to a model soil-derived bacterial community: impact on degradation and community structure. **Lett. Appl. Microbiol.**, v.43, p.659-665, 2006.

BELO, A.F. et al. Efeito da umidade do solo sobre a capacidade de *Canavalia ensiformis* e *Stizolobium aterrimum* em remediar solos contaminados com herbicidas. **Planta Daninha**, v.25, p.239-249, 2007a.

BELO, A.F. et al. Fitorremediação de solo adubado com composto orgânico e contaminado com trifloxysulfuron-sodium. **Planta Daninha**, v.25, p.251-258, 2007b.

BELO, A.F. **Técnicas para fitorremediação de solo contaminado com herbicidas**. 2006. 56f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

BLANCO, F.M.G.; VELINI, E.D. Persistência do herbicida sulfentrazone em solo cultivado com soja e seu efeito em culturas sucedâneas. **Planta Daninha**, v.23, p.693-700, 2005.

BLANCO, J.G.; OLIVEIRA, D.A. Persistência de herbicidas em Latossolo Vermelho-Amarelo em cultura de cana-de-açúcar. **Pesq. Agropec. Bras.**, v.22, p.681-687, 1987.

CARMO, M.L. et al. Influência do período de cultivo de *Panicum maximum* (Cultivar Tanzânia) na fitorremediação de solo contaminado com picloram. **Planta Daninha**, v.26, p.315-322, 2008a.

CARMO, M.L. et al. Seleção de plantas para fitorremediação de solos contaminados com picloram. **Planta Daninha**, v.26, p.301-313, 2008b.

CARRETEIRO, D.M. **Efeitos da inibição da protoporfirinogênio IX oxidase sobre as trocas gasosas e fluorescência da clorofila a em plantas de soja (*Glycine max* L. Merrill)**. 2008. 57f. Dissertação (Mestrado em Fisiologia Vegetal). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

CUNNINGHAM, S.D. et al. Phytoremediation of soils contaminated with organic pollutants. **Adv. Agron.**, v.56, p.55-114, 1996.

HESS, F.D. Light-dependent herbicides: an overview. **Weed Science**, v.48, p.160-170, 2000.

JABLONOWSKI, N.D. et al. Persistence of <sup>14</sup>C-labeled atrazine and its residues in a field lysimeter soil after 22 years. **Environ. Pollut.**, v.157, p.2126-2131, 2009.

JACOBS, J.M. et al. Effects of diphenyl ether herbicides on oxidation of protoporphyrinogen to protoporphyrin in organellar and plasma membrane enriched fractions of barley. **Plant Physiology**, v.97, p.197-203, 1991.

MAIN, C.L. et al. Sulfentrazone persistence in southern soils: bioavailable concentration and effect on a rotational cotton crop. **Weed Technol.**, v.18, p.346-352, 2004.

MARRIAGE, P.B.; SAIDAK, W.J.; VONSTRYK, F.G. Residues of atrazine, simazine, linuron and diuron after repeated annual applications in a peach orchard. **Weed Res.**, v.15, p.373-379, 1975.

MERCIER, H. Auxinas. In: KERBAUY, G.B (Ed). **Fisiologia Vegetal**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogans S.A., 2004. p.217-249.

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

PEMADASA, M.A.; JEYASEELAN, K. Some effects of three herbicidal auxins on stomatal movements. **New Phytol.**, v.77, p.569-573, 1976.

PIRES, F.R. et al. Avaliação da fitorremediação de tebuthiuron utilizando *Crotalaria juncea* como planta indicadora. **Rev. Ciênc. Agron.**, v.39, p.245-250, 2008.

PIRES, F.R. et al. Fitorremediação de solos contaminados com herbicidas. **Planta Daninha**, v. 21, p.335-341, 2003a.

PIRES, F.R. et al. Inferências sobre atividade rizosférica de espécies com potencial para fitorremediação do herbicida tebuthiuron. **R. Bras. Ci. Solo**, v.29, p.627-634, 2005.

PIRES, F.R. et al. Seleção de plantas com potencial para fitorremediação de tebuthiuron. **Planta Daninha**, v.21, p.451-458, 2003b.

PRATA, F.; LAVORENTI, A. Comportamento de herbicidas no solo: influência da matéria orgânica. **Rev. biociênc.**, v.6, p.17-22, 2000.

PROCÓPIO, S.O. et al. Fitorremediação de solo contaminado com trifloxysulfuron sodium por diferentes densidades populacionais de feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis* (L). DC.). **Ci. Agrotec.**, v.30, p.444-449, 2006.



PROCÓPIO, S.O. et al. Fitorremediação de solo contaminado com trifloxysulfuron-sodium por mucuna-preta (*Stizolobium aterrimum*). **Planta Daninha**, v.23, p.719-724, 2005a.

PROCÓPIO, S.O. et al. Fitorremediação de solo contaminado com picloram por capim-pé-de-galinha-gigante (*Eleusine coracana*). **Rev. Bras. Ci. Solo**, v.32, p.2517-2524, 2008.

PROCÓPIO, S.O. et al. Potencial de espécies vegetais para a remediação do herbicida trifloxysulfuron-sodium. **Planta Daninha**, v.23, p.9-16, 2005b.

PROCÓPIO, S.O. et al. Seleção de plantas com potencial para fitorremediação de solos contaminados com o herbicida trifloxysulfuron sodium. **Planta Daninha**, v.22, p.315-322, 2004.

REIS, M.R. et al. Atividade microbiana em solo cultivado com cana-de-açúcar após aplicação de herbicidas. **Planta Daninha**, v.26, p.323-331, 2008.

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, 1997, Washington, DC: **ACS Symposium Series...** Washington, DC: American Chemical Society, 1997. p.133-151

ROBINSON, D.E. Atrazine accentuates carryover injury from mesotrione in vegetable crops. **Weed Technol.**, v.22, p.641-645, 2008.

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

SANTOS, E.A. et al. Fitoestimulação por *Stizolobium aterrimum* como processo de remediação de solo contaminado com trifloxysulfuron-sodium. **Planta Daninha**, v.25, p.259-265, 2007a.

SANTOS, M.V. et al. Eficácia e persistência no solo de herbicidas utilizados em pastagem. **Planta Daninha**, v.24, p.391-398, 2006.

SANTOS, J.B. et al. Fitorremediação de áreas contaminadas por herbicidas. In: SILVA, A.A.; SILVA, J.F. Ed. **Tópicos em manejo de plantas daninhas**. Viçosa: Ed. UFV, 2007b. p.210-239.

SANTOS, J.B. et al. Fitorremediação do herbicida trifloxysulfuron-sodium. **Planta Daninha**, v.22, p.223-330, 2004.

SEKLEMOVA, E.; PAVLOVA, A.; KOVACHEVA, K. Biostimulation-based bioremediation of diesel fuel: field demonstration. **Biodegradation**, v.12, p.311-316, 2001.

SILVA A.A. et al. Herbicidas: Classificação e Mecanismo de ação. In: SILVA, A.A.; SILVA, J.F. Ed. **Tópicos em manejo de plantas daninhas**. Viçosa: Ed. UFV, 2007. p.83-148.

TRIPATHY, B.C.; MOHAPATRA, A.; GUPTA, I. Impairment of the photosynthetic apparatus by oxidase stress induced by photosensitization reaction of protoporphyrin IX. **Biochimica et Biophysica Acta**. v.1767, p.860-868, 2007.

VIVIAN, R. et al. Persistência de sulfentrazone em argissolo vermelho-amarelo cultivado com cana-de-açúcar. **Planta Daninha**, v.24, p.741-750, 2006

VIVIAN, R. et al. Persistência e lixiviação de ametryn e trifloxysulfuron-sodium em solo cultivado com cana-de-açúcar. **Planta Daninha**, v.25, p.111-124, 2007.

WILSON, P.C.; WHITWELL, T.; KLAINÉ, S.J. Phytotoxicity, uptake, and distribution of <sup>14</sup>C-simazine in *Acorus gramineus* and *Pontederia cordata*. **Weed Sci.**, v.48, p.701-709, 2000.

## ATIVIDADE FOTOSSINTÉTICA DE PLANTAS CULTIVADAS EM SOLO CONTAMINADO COM SULFENTRAZONE

### RESUMO

Objetivou-se, com este trabalho, avaliar os efeitos do sulfentrazone sobre as características associadas à atividade fotossintética de *Helianthus annuus*, *Canavalia ensiformis*, *Dolichos lab lab* e *Arachis hypogaea* consideradas espécies com potencial de remediação de solo contaminado por esse herbicida. O experimento foi conduzido em esquema fatorial 4 x 3 em delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições. O primeiro fator constou do cultivo das espécies *H. annuus*, *C. ensiformis*, *D. lab lab* e *A. hypogaea* e o segundo de três doses (0, 250 e 500 g ha<sup>-1</sup>) de sulfentrazone aplicadas em pré-emergência. Após o preenchimento dos vasos com 6,0 kg de solo, classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo, fez-se a irrigação e aplicou-se à superfície do solo o herbicida. Um dia após esta aplicação, procedeu-se a semeadura das espécies vegetais. Aos 40 dias após a emergência (DAE) das espécies vegetais, foram determinadas a condutância estomática (gs - mol m<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>), a taxa de transpiração (E - mol H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>), a concentração de CO<sub>2</sub> na câmara subestomática (Ci - μmol mol<sup>-1</sup>), o gradiente de CO<sub>2</sub> (ΔC - μmol mol<sup>-1</sup>) e a taxa fotossintética (A - μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>). Essas avaliações foram realizadas utilizando-se um analisador de gases no infravermelho (IRGA). Aos 100 DAE das plantas foi coletada a parte aérea e determinada a matéria seca. Resíduos de sulfentrazone no solo podem afetar as variáveis fisiológicas estudadas, todavia, a produção de matéria seca da parte aérea dessas espécies não foi influenciada pela ação do herbicida, independentemente das doses aplicadas, indicando a tolerância das espécies ao sulfentrazone.

**Palavras-chave:** fitorremediação, herbicida, taxa fotossintética

## PHOTOSYNTETIC ACTIVITY OF CULTIVATED PLANTS IN SOIL CONTAMINATED WITH SULFENTRAZONE

### ABSTRACT

The goal of this work was to evaluate the sulfentrazone effects on the characteristics associated with photosynthetic activity of *Helianthus annuus*, *Canavalia ensiformis*, *Dolichos lab lab* and *Arachis hypogaea* regarded species with potential of remediation of contaminated soil with this herbicide. The experiment was conducted in factorial 4 x 3, completely randomized design, with four replications. The first factor consisted by cultivation of species *H. annuus*, *C. ensiformis*, *D. lab lab* and *A. hypogaea*; the second factor by three sulfentrazone doses (0, 250 and 500 g ha<sup>-1</sup>) applied in pre-emergence. After filling the pots with 6.0 kg of soil, classified with red-yellow Hapludalf, it was done the irrigation and it was done the herbicide application herbicide in soil surface. One day after this application, proceeded the sowing of vegetal species. At 40 days after the emergency of the vegetal species, were evaluated the stomatal conductance ( $g_s - \text{mol m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ), transpiration rate ( $E - \text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), sub-stomatal CO<sub>2</sub> concentration ( $C_i - \mu\text{mol mol}^{-1}$ ), CO<sub>2</sub> gradient ( $\Delta C - \mu\text{mol mol}^{-1}$ ) and the photosynthetic rate ( $A - \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ). These evaluations were performed using an infrared gas analyzer (IRGA). At 100 days after the plants emergency was collected the shoot for determination of shoot dry matter. Sulfentrazone residues in soil can affect the physiological variables studied, however, the shoot dry matter wasn't influenced by the herbicide action, independently of the doses applied, indicating tolerance of the species to the sulfentrazone.

**Keywords:** phytoremediation, herbicide, photosynthetic rate

### INTRODUÇÃO

A fitorremediação consiste no método de descontaminação de solo ou água utilizando-se plantas. Estas devem apresentar tolerância aos contaminantes e possuir habilidade para remover, extrair e/ou mesmo mineralizá-los no ambiente (Wilson et al., 2000; Accioly e Siqueira, 2000).

A presença de resíduos de herbicidas no solo causa elevado impacto ambiental que pode ser responsável por perdas econômicas, quando afeta culturas sensíveis, e também redução na biodiversidade (Gove et al., 2007; Reis et al., 2008; Robinson, 2008). Além disso, pode ocorrer a lixiviação desses herbicidas, os quais podem contaminar os cursos hídricos, e causar efeitos tóxicos em organismos aquáticos como fitoplânctons e peixes (Jones, 2005; Scheil et al., 2009).

Atualmente diversas pesquisas (Santos et al., 2004; Carmo et al., 2008; Procópio et al., 2005, 2008) têm comprovado a eficiência da fitorremediação na descontaminação de áreas contaminadas com herbicidas de elevada persistência no solo.

Dentre os herbicidas que apresentam elevada persistência, e conseqüentemente, elevado potencial de contaminação ambiental, encontra-se o sulfentrazone, que é muito utilizado, no Brasil, nas culturas da cana-de-açúcar, soja, citrus, café, eucalipto e em áreas não agrícolas (Rodrigues e Almeida, 2005). Estudos sobre o comportamento desse herbicida no ambiente e de técnicas para reduzir sua persistência no ambiente são necessários. Uma das alternativas para descontaminação de solo contaminado por esse herbicida é a fitorremediação. Todavia, para viabilizar esse processo a primeira etapa é a identificação de plantas tolerantes a esse herbicida, que apresenta como mecanismo de ação a inibição da rota metabólica de síntese da enzima protoporfirinogênio oxidase (PROTOX), atuando indiretamente na síntese de clorofila em plantas sensíveis (Silva et al., 2007).

Ao inibir a enzima PROTOX, localizada nos cloroplastos, o sulfentrazone reduz a síntese das clorofilas, uma vez que essa enzima é a precursora das reações que transformam protoporfirinogênio IX em protoporfirina IX, e estes compostos são responsáveis pela formação das clorofilas. Com isso, ocorre o acúmulo de protoporfirinogênio IX e saída deste para o citoplasma, onde é oxidado formando a protoporfirina IX (Jacobs et al., 1991), esta que por sua vez interage com oxigênio e luz, formando oxigênio “singlet”, uma espécie reativa de oxigênio (ROS), que desencadeia processos oxidativos como a peroxidação de lipídios das membranas (Jacobs et al., 1991; Hess, 2000; Tripathy et al., 2007).

Os primeiros sintomas, causados pelo sulfentrazone, são manchas verde-escuras nas folhas, dando a impressão de que estão encharcadas, devido ao rompimento da membrana celular e derramamento de líquido citoplasmático nos espaços intercelulares. Sintomas esses que evoluem rapidamente para necrose foliar.

Quando a aplicação é realizada em pré-emergência, o tecido hipocótilo ou epicótilo são danificados pelo contato com o produto, no momento em que a plântula emerge. Similarmente, na aplicação em pós-emergência, o sintoma característico é a necrose do tecido que entrou em contato com o herbicida (Weller, 2003).

O influxo de CO<sub>2</sub> pode ser comprometido devido a atuação dos herbicidas inibidores da enzima PROTOX, sendo um dos fatores a formação de óxido nítrico por meio das ROS. O óxido nítrico estimula a síntese e atividade do ácido abscísico (ABA), hormônio que atua regulando o fechamento estomático (Mata e Lamattina, 2001; Webb et al., 2001). Também, pode ocorrer o fechamento estomático pela ação das ROS favorecendo o acúmulo de cálcio no citossol (Taiz e Zeiger, 2004), ou ainda devido a peroxidação das membranas celulares das células adjacentes aos estômatos.

O sulfentrazone causa redução da fotossíntese devido a menor síntese de clorofilas, que são proteínas que apresentam função vital, capturando a energia luminosa, que será convertida em poder redutor para o processo de fixação e assimilação do CO<sub>2</sub> no ciclo de Calvin (Carretero, 2008). Além disso, as clorofilas podem sofrer os danos causados pelas ROS (Gan, 2007), reduzindo ainda mais a atividade fotossintética. À medida que aumenta o estresse oxidativo em função do tempo de exposição à luz, os tilacóides são danificados e perdem sua capacidade de realizar fotossíntese, devido a danos na maquinaria fotossintética (Tripathy et al., 2007).

Objetivou-se, com este trabalho, avaliar as características relacionadas à atividade fotossintética das espécies *Helianthus annuus*, *Canavalia ensiformis*, *Dolichos lab lab* e *Arachis hypogaea* quando cultivadas em solo contaminado com diferentes concentrações de sulfentrazone.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

O trabalho foi conduzido em casa de vegetação da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, no período de novembro de 2007 a janeiro de 2008. O experimento constou de um fatorial 4 x 3, no delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições. O primeiro fator foi constituído pelo cultivo das espécies *Heliantum annuus*, *Canavalia ensiformis*, *Dolichos lab lab* e *Arachis hypogaea* e o segundo de três doses (0, 250 e 500 g ha<sup>-1</sup>) de sulfentrazone, aplicadas em pré-emergência.

Como substrato para o crescimento das plantas, utilizou-se amostras de solo classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo, cujas características físicas e químicas estão apresentadas na tabela 1. As amostras do solo em estudo foram coletadas na profundidade de 0-20 cm, em área sem histórico de aplicação de herbicidas. Essas foram passadas em peneira com malha de 4 mm e adubadas com superfosfato simples na proporção de 10,0 g kg<sup>-1</sup> de solo.

**Tabela 1.** Resultados das análises física e química das amostras do Argissolo Vermelho-Amarelo utilizado no experimento

Análise Física (dag kg <sup>-1</sup> ) <sup>1</sup>										
Argila	Silte	Areia fina	Areia grossa		Classificação textural					
24	20	31	25		Franco Argilo Arenosa					
Análise Química <sup>1</sup>										
pH H <sub>2</sub> O	P	K <sup>+</sup>	H + Al	Al <sup>3+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	CTC pH 7,0	V	m	MO
	mg dm <sup>-3</sup>		cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>				%		dag kg <sup>-1</sup>	
5,0	49,7	122	3,63	0,1	5,9	1,5	11,34	68	1	1,3

<sup>1</sup>Análises realizadas no Laboratório de Análise de Solos Viçosa Ltda.

Após o preparo do solo, o mesmo foi colocado em vasos revestidos com filme de polietileno visando evitar perda do herbicida por lixiviação. Foi utilizado 6,0 kg do substrato por vaso, estes foram irrigados ajustando-se a umidade em valor próximo a 80% da capacidade de campo, fazendo-se a seguir a aplicação do herbicida com um pulverizador de precisão, equipado com bicos TT110.02, espaçados a 0,5 m, calibrado para aplicação de 100 L ha<sup>-1</sup> de calda herbicida.

A semeadura das espécies *H. annuus*, *C. ensiformis*, *D. lab lab* e *A. hypogaea* foi realizada um dia após a aplicação do sulfentrazone. Sete dias após a emergência foi realizado o desbaste, deixando três plantas por vaso. Para o bom crescimento e desenvolvimento das plantas, foram feitas irrigações diárias, mantendo-se a umidade do solo próxima a 80% da capacidade de campo. O controle da umidade do solo foi realizado por meio de pesagens semanais dos vasos repondo-se a água evapotranspirada.

Aos 30, 45 e 60 dias após emergência (DAE) foi adicionado em cada vaso 0,3 g de uréia visando melhor crescimento das plantas. A partir dos 60 DAE foram feitas adubações semanais de cobertura com 100 mL por vaso de solução Ouro Verde® contendo (g L<sup>-1</sup>): N (3,75), P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (3,75), K<sub>2</sub>O (5,00), CaO (0,75), S (1,00), MgO (0,20), Cl (0,10), Mn (0,075), Fe (0,015), B (0,012) e Zn (0,010).

Aos 40 DAE das plantas foram realizadas as avaliações na folha mais jovem, com limbo foliar totalmente expandido, das quatro espécies, utilizando-se analisador de gases no infravermelho (IRGA), marca ADC, modelo LCA PRO (Analytical Development Co. Ltd, Hoddesdon, UK). Foram determinadas a condutância estomática ( $g_s$  -  $\text{mol m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ), a taxa de transpiração ( $E$  -  $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), a concentração de  $\text{CO}_2$  na câmara subestomática ( $C_i$  -  $\mu\text{mol mol}^{-1}$ ), o gradiente de  $\text{CO}_2$  ( $\Delta C$  -  $\mu\text{mol mol}^{-1}$ ) e a taxa fotossintética ( $A$  -  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ). Essas avaliações foram realizadas entre 7 e 9 horas da manhã, em dia de céu limpo e com iluminação artificial de  $1.200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , de forma a manter as condições ambientais homogêneas durante as avaliações em casa de vegetação aberta, permitindo livre circulação do ar.

Aos 100 DAE fez-se a colheita da parte aérea das plantas, que foram secas em estufa de circulação forçada de ar ( $70 \pm 1^\circ\text{C}$ ) até massa constante, determinando-se a matéria seca.

Os dados foram submetidos à análise de variância e de regressão, comparando somente o fator doses. 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 ( $r^2 = \text{SQReg}/\text{SQTrat}$ ).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observou-se redução da condutância estomática ( $g_s$ ) nas plantas de *H. annuus*, *C. ensiformis*, *D. lab lab* e *A. hypogaea* quando estas espécies foram cultivadas em solo tratado com sulfentrazone, apresentando os menores valores com a maior concentração do herbicida no solo (Tabela 2). Esse herbicida induz a produção de espécies reativas de oxigênio (ROS), estas que por sua vez atuam como mensageiros secundários na ativação de canais da membrana plasmática, possibilitando o influxo de cálcio, que se concentra no citossol causando fechamento estomático (Taiz e Zeiger, 2004), reduzindo assim a condutância estomática. As ROS, também, podem promover a formação de óxido nítrico, o qual estimula a síntese e atividade do ácido abscísico, hormônio que atua regulando o fechamento estomático (Mata e Lamattina, 2001; Webb et al., 2001).



De acordo com Brodribb e Holbrook (2003) a condutância estomática é proporcional ao número, tamanho e diâmetro de abertura dos estômatos, características que dependem de outros fatores endógenos e ambientais. Entretanto, em condições de estresse a planta tende a fechar os estômatos como mecanismo de defesa contra a perda de água, aumentando a resistência e por consequência reduzindo a condutância estomática (Taiz e Zeiger, 2004).

A redução da condutância estomática foi observada em soja e *Portulaca oleracea* 6 horas após a aplicação do lactofen, um herbicida inibidor da enzima PROTOX (Wichert e Talbert, 1993). Esse herbicida pode promover o fechamento estomático devido aos processos oxidativos e aumento da concentração de óxido nítrico que atuam como sinalizadores para o ABA, hormônio que atua regulando o fechamento estomático (Mata e Lamattina, 2001; Webb et al., 2001). Esta atuação do óxido nítrico tem sido observada em plantas de soja após a aplicação de lactofen (Carretero, 2008).

**Tabela 2.** Condutância estomática (gs) de espécies fitorremediadoras, cultivadas por 40 dias em solo tratado ou não com sulfentrazone, com as respectivas equações de regressão e coeficientes de determinação

Espécies fitorremediadoras	gs ( $\text{mol m}^{-1} \text{s}^{-1}$ )			Equação de regressão	$r^2$
	Doses ( $\text{g ha}^{-1}$ )				
	0	250	500		
<i>Helianthus annuus</i>	5,97	4,23	2,75	$\hat{Y} = 5,9300 - 0,0065 * D$	0,693
<i>Canavalia ensiformis</i>	3,66	3,16	1,21	$\hat{Y} = 3,8983 - 0,0049 * D$	0,608
<i>Dolichos lab lab</i>	0,99	1,19	0,28	$\hat{Y} = 1,1746 - 0,0014 * D$	0,502
<i>Arachis hypogaea</i>	1,66	1,04	0,71	$\hat{Y} = 1,6088 - 0,0019 * D$	0,489
C.V. (%)	31,16				

\* Significativo a 5% pelo teste t.

A taxa de transpiração (E) das espécies *H. annuus* e *A. hypogaea* não apresentou alteração independentemente das concentrações de sulfentrazone no solo (Tabela 3). No entanto, as espécies *C. ensiformis* e *D. lab lab* apresentaram correlação negativa dessa variável com a concentração do sulfentrazone no solo, havendo redução do valor da E com o aumento da concentração deste herbicida no solo.

A menor E está associada ao fechamento dos estômatos, e variações na abertura estomática causam alterações no potencial hídrico, por atuarem sobre a E (Brodribb e Hill, 2000). A variação da abertura estomática afeta a transpiração e a fotossíntese em intensidades diferentes (Cowan e Troughton, 1971; Machado e

Lagôa, 1994). A planta tende a fechar os estômatos quando os níveis de luz estão abaixo da radiação fotossinteticamente ativa, ou para evitar o estresse hídrico (Cochard et al., 2002).

**Tabela 3.** Taxa de transpiração (E) de espécies fitorremediadoras, cultivadas por 40 dias em solo tratado ou não com sulfentrazone, com as respectivas equações de regressão e coeficientes de determinação

Espécies fitorremediadoras	E (mol H <sub>2</sub> O m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )			Equação de regressão	r <sup>2</sup>
	Doses (g ha <sup>-1</sup> )				
	0	250	500		
<i>Helianthus annuus</i>	4,22	4,16	4,30	$\hat{Y} = 4,22$	-
<i>Canavalia ensiformis</i>	5,63	5,65	5,09	$\hat{Y} = 5,7242 - 0,0011 * D$	0,431
<i>Dolichos lab lab</i>	4,70	4,95	4,05	$\hat{Y} = 4,8925 - 0,0013 * D$	0,277
<i>Arachis hypogaea</i>	4,51	4,31	4,38	$\hat{Y} = 4,40$	-
C.V. (%)	5,83				

\* Significativo a 5% pelo teste t.

Para *H. annuus* não foi observada diferenças na concentração de CO<sub>2</sub> na câmara subestomática (Ci) independentemente das concentrações do herbicida no solo (Tabela 4). No entanto, para *C. ensiformis*, *D. lab lab* e *A. hypogaea* foi observado correlação negativa da Ci com a concentração do sulfentrazone no solo, havendo redução do valor da Ci com o aumento da concentração. Esses resultados demonstram haver menor influxo de CO<sub>2</sub> para o espaço subestomático com aumento da concentração do herbicida no solo.

A redução da Ci é ocasionada, geralmente, por fatores que reduzem o influxo de CO<sub>2</sub> para o espaço interno das folhas devido a redução da condutância estomática. Isso, geralmente, ocorre pelo fechamento dos estômatos que são influenciados por alguns fatores ambientais como disponibilidade hídrica, luz e energia, entre outros (Ometto et al., 2003). Essa variável fisiológica, também, pode ser influenciada pelas ROS, estas que atuam como mensageiros secundários na ativação de canais da membrana plasmática, possibilitando o influxo de cálcio, que se concentra no citossol causando fechamento estomático (Taiz e Zeiger, 2004), reduzindo assim a condutância estomática (menor influxo de CO<sub>2</sub>).

O controle estomático é importante propriedade fisiológica, por meio da qual, as plantas limitam a perda de água, ocasionando reduções na condutância estomática e, geralmente, reduzindo as trocas gasosas como forma de resposta das plantas a diversos fatores, incluindo o estresse hídrico (Paiva et al., 2005).

Galon et al., (2010), trabalhando com a aplicação de ametryn, verificaram que a concentração de CO<sub>2</sub> no mesófilo foliar foi ao redor de 50% maior nas plantas sob ação do herbicida ametryn do que na testemunha sem aplicação, considerando que este produto atua diretamente na fotossíntese (fotossistema II). Já o sulfentrazone, que também inibe a fotossíntese de forma indireta, apresenta efeitos diversos, isso devido a menor síntese de pigmentos. A redução no teor de pigmentos devido à ação de inibidores da PROTOX foi observada por diversos autores (Sherman et al., 1991; Mostowska et al., 1996; Tripathy et al., 2007). Esses efeitos na fotossíntese são intensificados pela ação das ROS, que leva a redução da maquinaria fotossintética.

**Tabela 4.** Concentração de CO<sub>2</sub> na câmara subestomática (Ci) de espécies fitorremediadoras, cultivadas por 40 dias em solo tratado ou não com sulfentrazone, com as respectivas equações de regressão e coeficientes de determinação

Espécies fitorremediadoras	Ci (µmol mol <sup>-1</sup> )			Equação de regressão	r <sup>2</sup>
	Doses (g ha <sup>-1</sup> )				
	0	250	500		
<i>Helianthus annuus</i>	240,00	239,50	234,25	$\hat{Y} = 237,92$	-
<i>Canavalia ensiformis</i>	227,25	239,00	211,00	$\hat{Y} = 239,750 - 0,056 * D$	0,596
<i>Dolichos lab lab</i>	229,25	232,25	186,75	$\hat{Y} = 238,833 - 0,091 * D$	0,707
<i>Arachis hypogaea</i>	201,68	193,00	181,25	$\hat{Y} = 202,187 - 0,041 * D$	0,637
C.V. (%)	4,16				

\* Significativo a 5% pelo teste t.

Para as plantas de *H. annuus*, *C. ensiformis* e *A. hypogaea* observou-se redução no gradiente de CO<sub>2</sub> (ΔC), quando essas espécies foram cultivadas em solo tratado com sulfentrazone em relação ao tratamento sem herbicida, com menores valores com aumento da concentração deste herbicida no solo. Já para *D. lab lab* não houve redução do ΔC independentemente da dose de sulfentrazone aplicada (Tabela 5).

A redução do ΔC foi observada em cana-de-açúcar após a aplicação do ametryn, que atua diretamente na fotossíntese (Galon et al., 2010). Segundo esses autores, o ΔC está diretamente relacionado à intensidade fotossintética da planta no momento da avaliação, ou seja, quanto mais lento for o metabolismo da planta, menor o consumo de CO<sub>2</sub> por unidade de tempo, reduzindo a diferença entre a concentração de carbono da atmosfera e do espaço interno da folha (ΔC). Como o sulfentrazone atua inibindo a atividade fotossintética, mesmo de forma indireta, os efeitos tendem a ser semelhantes.

**Tabela 5.** Gradiente de CO<sub>2</sub> ( $\Delta C$ ) de espécies fitorremediadoras, cultivadas por 40 dias em solo tratado ou não com sulfentrazone, com as respectivas equações de regressão e coeficientes de determinação

Espécies fitorremediadoras	$\Delta C$ ( $\mu\text{mol mol}^{-1}$ )			Equação de regressão	$r^2$
	Doses ( $\text{g ha}^{-1}$ )				
	0	250	500		
<i>Helianthus annuus</i>	114,75	96,75	101,75	$\hat{Y} = 113,417 - 0,036 * D$	0,877
<i>Canavalia ensiformis</i>	109,50	110,00	100,75	$\hat{Y} = 111,125 - 0,018 * D$	0,535
<i>Dolichos lab lab</i>	80,25	83,00	74,25	$\hat{Y} = 79,17$	-
<i>Arachis hypogaea</i>	125,00	120,75	83,00	$\hat{Y} = 130,583 - 0,084 * D$	0,801
C.V. (%)	2,96				

\* Significativo a 5% pelo teste t.

As plantas de *H. annuus* apresentaram redução da taxa fotossintética (A) quando cultivadas em solos contaminado com sulfentrazone, com maiores reduções nas maiores concentrações do herbicida (Tabela 6). Para essa espécie não foi observada influência do herbicida na  $C_i$  (Tabela 4), evidenciando que a fotossíntese provavelmente não foi reduzida pela deficiência do substrato CO<sub>2</sub>. Para *D. lab lab* e *A. hypogaea* a taxa fotossintética, também, foi proporcionalmente reduzida com aumento da concentração de sulfentrazone no solo. Houve redução de aproximadamente 21% e 34% para *D. lab lab* e *A. hypogaea* respectivamente, ao se comparar a dose de 500 g ha<sup>-1</sup> do sulfentrazone com a ausência deste herbicida. No entanto, para *C. ensiformis* não foi observada influência na atividade fotossintética por nenhuma das doses testadas do herbicida (Tabela 6).

Considerando o mecanismo de ação dos herbicidas inibidores da PROTOX, a atividade fotossintética é comprometida por alguns distúrbios relacionados com a peroxidação de lipídios e pigmentação foliar, pois os herbicidas desse grupo atuam na redução dos teores de clorofila e carotenóides foliares, efeitos estes que podem ser observados também em plantas tolerantes (Carretero, 2008). Esses herbicidas podem atuar também na liberação de etileno, etano e aldeído malônico (Kenyon et al. 1985), que podem atuar no balaço hormonal, e conseqüentemente em várias atividades fisiológicas das plantas.

Os efeitos provocados pelo sulfentrazone podem ser observados até mesmo em plantas consideradas tolerantes, como é o caso da soja, em que foi observado extravasamento de eletrólitos e outros danos celulares, com maiores efeitos tanto com aumento da luminosidade quanto da concentração do inibidor (Li et al., 2000).

Com a redução, especialmente, dos teores de carotenóides há dificuldade na dissipação de energia (Sherman et al., 1991; Mostowska et al., 1996; Tripathy et al.,

2007), levando a um estresse oxidativo, causando destruição de membranas e redução da maquinaria fotossintética. Também, há peroxidação dos lipídios provocado pelo oxigênio “singlet” gerado pela protoporfirina IX no citoplasma (Weller, 2003). A redução nos teores de clorofila total e de carotenóides foi observada em folhas de *Toona ciliata* tratadas com sulfentrazone nas doses 600 e 1.200 g ha<sup>-1</sup> (Oliveira et al. 2008).

**Tabela 6.** Taxa fotossintética (A) de espécies fitorremediadoras, cultivadas por 40 dias em solo tratado ou não com sulfentrazone, com as respectivas equações de regressão e coeficientes de determinação

Espécies fitorremediadoras	A ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )			Equação de regressão	r <sup>2</sup>
	Doses (g ha <sup>-1</sup> )				
	0	250	500		
<i>Helianthus annuus</i>	35,66	31,03	31,66	$\hat{Y} = 34,780 - 0,008 * D$	0,445
<i>Canavalia ensiformis</i>	31,79	35,09	34,15	$\hat{Y} = 33,68$	-
<i>Dolichos lab lab</i>	28,38	26,92	22,46	$\hat{Y} = 28,878 - 0,012 * D$	0,477
<i>Arachis hypogaea</i>	41,22	39,62	27,18	$\hat{Y} = 43,026 - 0,028 * D$	0,741
C.V. (%)	6,73				

\* Significativo a 5% pelo teste t.

O acúmulo de matéria seca da parte aérea das plantas de *H. annuus*, *C. ensiformis*, *D. lab lab* e *A. hypogaea* não foi influenciado pela ação do sulfentrazone, independentemente das doses aplicadas (Tabela 7), comprovando a tolerância dessas espécies ao herbicida, que é uma das características altamente desejável para que uma espécie seja utilizada como fitorremediadora. Dessa forma, *H. annuus*, *C. ensiformis*, *D. lab lab* e *A. hypogaea* apresentam potencial para fitorremediação de solos tratados com sulfentrazone.

Pode-se inferir que as plantas com ação fitorremediadora de um determinado herbicida apresentam tolerância do mesmo, em função dos aspectos fisiológicos relacionados com os mecanismos de desintoxicação, tais como metabolização, translocação diferenciada, compartimentalização do produto e impedimentos anatômicos a penetração ou absorção do produto, no entanto esses mecanismos podem não apresentar tanta eficiência na proteção das plantas, como observado por Carretero (2008) em plantas de soja.

**Tabela 7.** Matéria seca da parte aérea (MSPA) de espécies fitorremediadoras, cultivadas por 100 dias em solo tratado ou não com sulfentrazone, com as respectivas equações de regressão

Espécies fitorremediadoras	MSPA (g)			Equação de regressão
	Doses (g ha <sup>-1</sup> )			
	0	250	500	
<i>Helianthus annuus</i>	73,00	65,00	65,00	$\hat{Y} = 67,67$
<i>Canavalia ensiformis</i>	156,00	173,00	173,00	$\hat{Y} = 167,33$
<i>Dolichos lab lab</i>	107,00	126,00	126,00	$\hat{Y} = 119,67$
<i>Arachis hypogaea</i>	50,00	61,00	61,00	$\hat{Y} = 57,33$
C.V. (%)	15,58			

Conclui-se que o sulfentrazone pode afetar as características associadas a atividade fotossintética das espécies estudadas, sendo que a intensidade desse efeito variou com a espécie vegetal. Todavia, a produção de matéria seca da parte aérea não foi influenciada pelo sulfentrazone indicando que as espécies são tolerantes a esse herbicida.

#### 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. p.299-352.

BRODRIBB, T.J.; HILL, R.S. Increases in water potential gradient reduce xylem conductivity in whole plants. Evidence from a low-pressure conductivity method. **Plant Physiol.**, v.123, p.1021-1028, 2000.

BRODRIBB, T.J.; HOLBROOK, N.M. Stomatal closure during leaf dehydration, correlation with other leaf physiological traits. **Plant Physiol.**, v.132, p.2166-2173, 2003.

CARMO, M.L. et al. Influência do período de cultivo de *Panicum maximum* (Cultivar Tanzânia) na fitorremediação de solo contaminado com picloram. **Planta Daninha**, v.26, p.315-322, 2008.

CARRETERO, D.M. **Efeitos da inibição da protoporfirinogênio IX oxidase sobre as trocas gasosas e fluorescência da clorofila a em plantas de soja (*Glycine max* L. Merrill)**. 2008. 57f. Dissertação (Mestrado em Fisiologia Vegetal). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

COCHARD, H. et al. Unraveling the effects of plant hydraulics on stomatal closure during water stress in walnut. **Plant Physiol.**, v.128, p.282-290, 2002.

COWAN, I.R.; TROUGHTON, J.H. The relative role of stomata in transpiration and assimilation. **Planta**, v.97, p.325-336, 1971.

GALON, L. et al. Influência de herbicidas na atividade fotossintética de genótipos de cana-de-açúcar. **Planta Daninha**, no prelo, 2010.

GAN, S. **Senescence processes in plants**. Blackwell Publishing Ltd, Iowa, USA, 2007. p.322.

GOVE, B. et al. Effects of herbicide spray drift and fertilizer overspread on selected species of woodland ground flora: comparison between short-term and long-term impact assessments and field surveys. **J. Appl. Ecol.**, v.44, p.374-384, 2007.

HESS, F.D. Light-dependent herbicides: an overview. **Weed Science**, v.48, p.160-170, 2000.

JACOBS, J.M. et al. Effects of diphenyl ether herbicides on oxidation of protoporphyrinogen to protoporphyrin in organellar and plasma membrane enriched fractions of barley. **Plant Physiology**. v.97, p.197-203, 1991.

JONES, R.J. The ecotoxicological effects of photosystem II herbicides on corals. **Marine Pollut. Bull.**, v.51, p.495-506, 2005.

KENYON, W.H.; DUKE, S.O. Effects of acifluorfen on endogenous antioxidants and protective enzymes in cucumber (*Cucumis sativus* L.) cotyledons. **Plant Physiology**, v.79, p.862-866, 1985.

LI, Z. et al. Using electrolyte leakage to detect soybean (*Glycine max*) cultivars sensitive to sulfentrazone. **Weed Technology**, v.14, p.699-704, 2000.

MACHADO, E.C.; LAGÔA, A.M.M.A. Trocas gasosas e condutância estomática em três espécies de gramíneas. **Bragantia**, v.53, p.141-149, 1994.

MATTA, C.G.; LAMATTINA, L. Nitric oxide induces stomatal closure and enhances the adaptive plant responses against drought stress. **Plant physiology**, v.126, p.1196-1204, 2001.

MOSTOWSKA, A. et al. Effect to 2,22-bipyridyl, a photodynamic herbicide, on chloroplast ultrastructure, pigment content and photosynthesis rate in pea seedlings. **Acta physiology plant**, v.18, p.153-164, 1996.

OLIVEIRA, J.R. et al. Análise dos teores de clorofila e carotenóides como indicadores de fitotoxicidade de herbicidas em *Toona ciliata* var. australis. In: I JORNADA CIENTÍFICA e VI FIPA do CEFET Bambuí. Bambuí/MG - 2008.

OMETTO, J.P.H.B. et al. Variação temporal do isótopo estável do carbono em material arbóreo em florestas da região Amazônica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ECOLOGIA, 4., 2003, Fortaleza. **Anais...** Rio Claro: Sociedade de Ecologia do Brasil, 2003. CD-ROM.

PAIVA, A.S. et al. Condutância estomática em folhas de feijoeiro submetido a diferentes regimes de irrigação. **Eng. Agríc.**, v.25, p.161-169, 2005.

PROCÓPIO, S.O. et al. Potencial de espécies vegetais para a remediação do herbicida trifloxysulfuron-sodium. **Planta Daninha**, v.23, p.9-16, 2005.

- PROCÓPIO, S.O. et al. Fitorremediação de solo contaminado com picloram por capim-pé-de-galinha-gigante (*Eleusine coracana*). **Rev. Bras. Ci. Solo**, v.32, p.2517-2524, 2008.
- REIS, M.R. et al. Atividade microbiana em solo cultivado com cana-de-açúcar após aplicação de herbicidas. **Planta Daninha**, v.26, p.323-331, 2008.
- ROBINSON, D.E. Atrazine accentuates carryover injury from mesotrione in vegetable crops. **Weed Technol.**, v.22, p.641-645, 2008.
- SANTOS, J.B. et al. Fitorremediação do herbicida trifloxysulfuron-sodium. **Planta Daninha**, v.22, p.323-330, 2004.
- SCHEIL, V. et al. Effects of 3,4-dichloroaniline and diazinon on different biological organisation levels of zebrafish (*Danio rerio*) embryos and larvae. **Ecotoxicology**, v.18, p.355-363, 2009.
- SHERMAN, T.D. et al. Physiological basis for differential sensitivities of plant species to protoporphyrinogen oxidase-inhibiting herbicide. **Plant physiology**, v.97, p.280-287, 1991.
- SILVA, A.A. et al. Herbicidas: Classificação e mecanismo de ação. In: SILVA, A.A.; SILVA, J.F. Ed. **Tópicos em manejo de plantas daninhas**. Viçosa: Ed. UFV, 2007. p.63-81.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2004. p.449-484.
- TRIPATHY, B.C.; MOHAPATRA, A.; GUPTA, I. Impairment of the photosynthetic apparatus by oxidase stress induced by photosensitization reaction of protoporphyrin IX. **Biochimica et Biophysica Acta**. v.1767, p.860-868, 2007.
- WEBB, A.A.R. et al. The role of calcium in ABA-induced gene expression and stomatal movements. **Plant journal**, v.26, p.351-362, 2001.
- WELLER, S. Principles of selective weed control with herbicides. In: **Herbicide action course**. West Lafayette: Purdue University, 2003. p.101-130.
- WICHERT, R.A.; TALBERT, R.E. Soybean (*Glycine max* L.) response to lactofen. **Weed Science**. v.41, p.23-27, 1993.
- WILSON, P.C.; WHITWELL, T.; KLAINÉ, S.J. Phytotoxicity, uptake, and distribution of <sup>14</sup>C-simazine in *Acorus gramineus* and *Pontederia cordata*. **Weed Science**, v.48, p.701-709, 2000.



## POTENCIAL DE ESPÉCIES VEGETAIS NA REMEDIAÇÃO DE SOLO CONTAMINADO COM SULFENTRAZONE

### RESUMO

Objetivou-se, com este trabalho, avaliar a eficiência de espécies vegetais na remediação de um Argissolo Vermelho-Amarelo contaminado com sulfentrazone. O trabalho foi conduzido em duas etapas. Na primeira, avaliou-se o crescimento de espécies vegetais em solo contaminado com sulfentrazone. O experimento constou de um fatorial 4 x 3, no delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições. O primeiro fator foi constituído pelo cultivo das espécies *Helianthus annuus*, *Canavalia ensiformis*, *Dolichos lab lab* e *Arachis hypogaea* e o segundo de três doses (0, 250 e 500 g ha<sup>-1</sup>) de sulfentrazone, aplicadas em pré-emergência. Na segunda etapa avaliou-se a capacidade remediadora dessas espécies através do crescimento de uma espécie indicadora (sorgo) de resíduos no solo desse herbicida. O experimento constou de um fatorial 5 x 3, no delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições. O primeiro fator foi constituído pelo cultivo ou não das espécies *H. annuus*, *C. ensiformis*, *D. lab lab* e *A. hypogaea* e o segundo de três doses (0, 250 e 500 g ha<sup>-1</sup>) de sulfentrazone, aplicadas em pré-emergência. Na primeira etapa, foram utilizados vasos revestidos com filme de polietileno contendo 6,0 kg do substrato. Após a irrigação dos vasos, aplicou-se à superfície do solo o herbicida. Um dia após esta aplicação, procedeu-se a semeadura das espécies vegetais. Estas foram colhidas 100 dias depois e secadas em estufa de circulação forçada de ar (70 ± 1°C) até massa constante para determinação do acúmulo de matéria seca da parte aérea. Na segunda etapa, foram coletadas amostras de 3,0 kg de solo de cada vaso da etapa anterior. Essas amostras foram colocadas em vasos revestidos com filme de polietileno fazendo-se a seguir o cultivo de sorgo, espécie previamente definida como indicadora de resíduos do sulfentrazone. Aos 20 e 50 dias após a emergência (DAE) foi avaliada, visualmente, a intoxicação das plantas de sorgo, atribuindo notas de 0 (ausência de intoxicação) a 100 (morte da planta). Aos

50 DAE, num primeiro corte, foi determinada a matéria seca da parte aérea das plantas de sorgo. Já a matéria seca da rebrota dessas foi avaliada aos 50 dias após o primeiro corte, coincidente a colheita final. A produção de matéria seca da parte aérea das espécies vegetais não foi afetada, indicando que essas foram tolerantes ao sulfentrazone; entretanto, *Helianthus annuus* apresentou melhor capacidade para remediação de solo contaminado com esse herbicida.

**Palavras-chave:** descontaminação de solo, fitorremediação, *Helianthus annuus*

## POTENTIAL OF VEGETAL SPECIES IN SOIL REMEDIATION CONTAMINATED WITH SULFENTRAZONE

### ABSTRACT

The goal of this work was to evaluate the efficiency of vegetal species in the remediation of red-yellow Hapludalf contaminated with sulfentrazone. The work was conducted in two stages. In the first stage, was evaluated the vegetal species growth in soil contaminated with sulfentrazone. The experiment consisted in factorial 4 x 3, in completely randomized design, with four replications. The first factor was constituted by the cultivation of *Helianthus annuus*, *Canavalia ensiformis*, *Dolichos lab lab* and *Arachis hypogaea*; the second by three sulfentrazone doses (0, 250 e 500 g ha<sup>-1</sup>), applied in pre-emergence. In the second stage was evaluated the remediating capacity of these species trough the growth of an indicator specie (sorghum) of residues in soil of this herbicide. The experiment consisted in factorial 5 x 3, in completely randomized design, with four replications. The first factor was constituted by the cultivation or not of *H. annuus*, *C. ensiformis*, *D. lab lab* and *A. hypogaea*; the second by three sulfentrazone doses (0, 250 e 500 g ha<sup>-1</sup>), applied in pre-emergence. In the first stage, were used pots lined with polyethylene film containing 6.0 kg of substrate. After pots irrigation, the herbicide was applied on the soil surface. One day after the application was performed the sowing of vegetal species. These species were collected at 100 days after and drier in stove, until constant weight for determination of shoot dry matter accumulation. In the second stage, were collected soil samples of 3.0 kg of each pot from the previous stage. These samples were

placed in pots lined with polyethylene film by making to follow the cultivation of sorghum, specie previously defined as an indicator of sulfentrazone residues. Was evaluated visually, at 20 and 50 days after emergence (DAE), the intoxication of sorghum plants, assigning scores from 0 (intoxication lack) to 100 (plant death). At 50 DAE, in first cut, was determined to shoot dry matter of sorghum plants. The dry weight of regrowth of these plants was assessed at 50 days after the first cut. The production of dry matter of the species was not affected, indicating that all species were tolerant to sulfentrazone, however *Helianthus annuus* showed greater capacity for the soil remediation contaminated with this herbicide.

**Keywords:** soil decontamination, phytoremediation, *Helianthus annuus*

## INTRODUÇÃO

As atividades industriais, mineração e agricultura têm sido apontadas como as principais responsáveis pela contaminação do solo, cursos de água e lençol freático por diferentes compostos químicos. Atualmente, o aumento dos insumos químicos na agricultura, dentre eles os herbicidas tem preocupado a sociedade em geral, em razão da contaminação ambiental.

O herbicida sulfentrazone - N-[2,4-dicloro-5[4-(difluorometil)-4,5-dihidro-3 metil-5-oxo-1 H-1,2,4-triazol-1-il] metanosulfonamida - é registrado no Brasil para o controle de plantas daninhas em pré-emergência nas cultura da cana-de-açúcar, soja, citrus, café, eucalipto e em áreas não agrícolas. A absorção desse herbicida ocorre pelo sistema radicular e sua translocação ocorre por pequena movimentação pelo floema. Ele age nas plantas por um processo de ruptura da membrana celular, provocando rápida dessecação foliar nas plantas que emergem (Rodrigues e Almeida, 2005). É um herbicida inibidor da Protox (protoporfirinogênio oxidase), registrado para aplicação em pré ou pós emergência das plantas daninhas (Vidal, 2002), controlando amplo espectro de folhas largas e gramíneas.

A dissipação do sulfentrazone está diretamente relacionada com a disponibilidade de água que pode melhorar as condições de degradação da molécula ou mesmo lixiviá-la em profundidade no solo (Ohmes, et al. 2000). O tempo médio de permanência no solo varia de 110 a 280 dias, dependendo do tipo de solo e das condições ambientais (Concenço et al., 2001).

A lixiviação do sulfentrazone em diferentes tipos de solo e submetidos a diferentes regimes pluviométricos foi avaliada por Rossi et al. (2003 e 2005). Após precipitação de 90 mm, o herbicida foi detectado até 12,5 cm de profundidade em coluna preenchida com Nitossolo Vermelho. Em Chernossolo ocorreu uniformidade da distribuição do produto ao longo da coluna de solo, proporcional à precipitação, e no Latossolo Vermelho o sulfentrazone foi pouco móvel, permanecendo na camada superficial, independentemente da precipitação. O sulfentrazone também se mostrou bastante móvel quando aplicado sobre palhada (cobertura vegetal), devido à sua boa solubilidade em água (Cobucci, et al. 2004).

O efeito residual prolongado do sulfentrazone no solo, superior a 200 dias (Concenço et al., 2001) pode acarretar danos às culturas sucedâneas suscetíveis como milheto, aveia-preta, sorgo (Pereira et al., 2000). Além disso, pode também provocar intoxicação no milho em sucessão à soja (Artuzi e Contiero 2006) e em milheto, aveia e trigo; contudo, não prejudicou o desenvolvimento das culturas de girassol e feijão (Blanco e Velini, 2005).

A persistência do sulfentrazone em Argissolo Vermelho-Amarelo cultivado com cana-de-açúcar foi de 640 e 197 dias após a aplicação em 2003 e 2004 respectivamente, indicando o alto risco de intoxicação das culturas em sucessão à cana-de-açúcar (Vivian et al., 2006). Reduções superiores a 30% na produção de algodão foram avaliadas por Main et al. (2004).

Quando a molécula de um herbicida chega ao solo, ela pode ser degradada por processos químicos e biológicos, ser sorvida aos colóides do solo ou lixiviada. 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 (Prata e Lavorenti, 2000).

A biorremediação é o processo de remediação normalmente *in situ* de áreas contaminadas que emprega organismos vivos (microrganismos e plantas) capazes de se desenvolverem em meio contendo o material poluente, reduzindo-o ou até mesmo eliminando sua toxicidade. Essa técnica é utilizada para remediação de áreas contaminadas com metais pesados (Franco, 2004; Querol et al., 2006) e herbicidas (Santos et al., 2004; Pires et al., 2006; Carmo et al. 2008a). Quando se trata da descontaminação pela utilização de plantas isoladas ou estimulando a microbiota

associada às suas raízes, tem-se a fitorremediação (Accioly e Siqueira, 2000; Wilson et al. 2000).

A fitorremediação tem se mostrado técnica promissora para descontaminação de solos contaminados com vários herbicidas como tebuthiuron (Belo et al., 2007a; Pires et al., 2005a,b, 2006, 2008), trifloxysulfuron-sodium (Santos et al., 2004; Procópio et al., 2004, 2005a,b, 2006; Belo et al., 2007b; Santos et al., 2007) e picloram (Carmo et al. 2008a,b). Sendo assim, objetivou-se, neste trabalho, avaliar o potencial das espécies *Helianthus annuus*, *Canavalia ensiformis*, *Dolichos lab lab* e *Arachis hypogaea* na remediação de solo contaminado com sulfentrazone.

## MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho, composto por duas etapas, foi realizado em casa de vegetação na Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG. Na primeira etapa, avaliou-se o crescimento de espécies vegetais com potencial de descontaminação de solo contaminado com sulfentrazone. O experimento constou de um fatorial 4 x 3, no delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições. O primeiro fator foi constituído pelo cultivo das espécies *H. annuus*, *C. ensiformis*, *D. lab lab* e *A. hypogaea* e o segundo de três doses (0, 250 e 500 g ha<sup>-1</sup>) de sulfentrazone, aplicadas em pré-emergência. Na segunda etapa, avaliou-se a capacidade remediadora dessas espécies através do crescimento de uma espécie indicadora (sorgo) de resíduos no solo desse herbicida. O experimento constou de um fatorial 5 x 3, no delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições. O primeiro fator foi constituído pelo cultivo ou não das espécies *H. annuus*, *C. ensiformis*, *D. lab lab* e *A. hypogaea* e o segundo de três doses (0, 250 e 500 g ha<sup>-1</sup>) de sulfentrazone, aplicadas em pré-emergência.

Como substrato para o crescimento das plantas, utilizou-se amostras de solo classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo, cujas características físicas e químicas estão apresentadas na tabela 1. As amostras do solo em estudo foram coletadas na profundidade de 0-20 cm, em área sem histórico de aplicação de herbicidas. Essas foram passadas em peneira com malha de 4 mm e adubadas com superfosfato simples na proporção de 10,0 g kg<sup>-1</sup> de solo.

**Tabela 1.** Resultados das análises física e química das amostras do Argissolo Vermelho-Amarelo utilizado no experimento

Análise Física (dag kg <sup>-1</sup> ) <sup>1</sup>										
Argila	Silte	Areia fina			Areia grossa		Classificação textural			
24	20	31			25		Franco Argilo Arenosa			
Análise Química <sup>1</sup>										
pH H <sub>2</sub> O	P	K <sup>+</sup>	H + Al	Al <sup>3+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	CTC pH 7,0	V	m	MO
	mg dm <sup>-3</sup>		cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>					%		dag kg <sup>-1</sup>
5,0	49,7	122	3,63	0,1	5,9	1,5	11,34	68	1	1,3

<sup>1</sup>Análises realizadas no Laboratório de Análise de Solos Viçosa Ltda.

Na primeira etapa, foram utilizados vasos revestidos com filme de polietileno contendo 6,0 kg do substrato. Após a irrigação dos vasos visando atingir uma umidade próxima a 80% da capacidade de campo, fez-se a aplicação do herbicida com um pulverizador de precisão, equipado com bicos TT110.02, espaçados a 0,5 m, calibrado para aplicação de 100 L ha<sup>-1</sup> de calda herbicida.

A semeadura das espécies vegetais potencialmente remediadoras (*H. annuus*, *C. ensiformis*, *D. lab lab* e *A. hypogaea*) foi realizada um dia após a aplicação do sulfentrazone. Sete dias após a emergência foi realizado o desbaste, deixando três plantas por vaso. Para o bom crescimento e desenvolvimento das plantas, foram feitas irrigações diárias, mantendo-se a umidade do solo próxima a 80% da capacidade de campo. O controle da umidade do solo foi realizado por meio de pesagens semanais dos vasos repondo-se a água evapotranspirada.

Aos 30, 45 e 60 dias após emergência (DAE) foi adicionado em cada vaso 0,3 g de uréia visando melhor crescimento das plantas. A partir dos 60 DAE foram feitas adubações semanais de cobertura com 100 mL por vaso de solução Ouro Verde® contendo (g L<sup>-1</sup>): N (3,75), P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (3,75), K<sub>2</sub>O (5,00), CaO (0,75), S (1,00), MgO (0,20), Cl (0,10), Mn (0,075), Fe (0,015), B (0,012) e Zn (0,010).

Aos 100 DAE fez-se a colheita da parte aérea das plantas, que foram secas em estufa de circulação forçada de ar (70 ± 1°C) até massa constante, determinando-se a matéria seca de cada espécie em função dos tratamentos.

Na segunda etapa, foram coletadas amostras de solo de cada vaso da etapa anterior. Essas amostras foram secas ao ar e peneiradas para retirada de raízes e eventuais torrões. Em seguida, foram colocados 3,0 kg desse solo em vasos revestidos com filme de polietileno, onde foi semeada a espécie indicadora (*Sorghum bicolor*), previamente selecionada como de alta sensibilidade ao sulfentrazone. Após

a emergência das plântulas de sorgo realizou-se o desbaste deixando-se seis plantas por vaso. Estas plantas foram irrigadas diariamente para manutenção da umidade do solo próximo a 80% da capacidade de campo e adubadas com 50 mL de solução de Ouro Verde<sup>®</sup> conforme especificado na etapa anterior.

Aos 20 e 50 DAE foi avaliada, visualmente, a intoxicação das plantas de sorgo pelo sulfentrazone. Atribuíram-se notas de 0 (ausência de intoxicação) a 100 (morte da planta). Aos 50 DAE, num primeiro corte, foi determinada a matéria seca da parte aérea das plantas de sorgo, enquanto que a matéria seca da rebrota do sorgo foi avaliada aos 50 dias após o primeiro corte, coincidente a colheita final. Essa avaliação foi realizada aos 200 dias após a aplicação do sulfentrazone no solo, ou seja, 100 dias cultivando as espécies vegetais potencialmente remediadoras e mais 100 dias cultivando sorgo.

Todos os dados obtidos foram submetidos à análise de variância. Para comparação das médias entre os tipos de cultivo utilizou-se o teste de Tukey a 5% de probabilidade e, para avaliar os efeitos de doses do sulfentrazone no crescimento e desenvolvimento das plantas remediadoras a análise de 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 ( $r^2 = \text{SQReg}/\text{SQTrat}$ ).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O acúmulo de matéria seca da parte aérea das plantas de *Helianthus annuus*, *Canavalia ensiformis*, *Dolichos lab lab* e *Arachis hypogaea* não foi influenciado pela ação do sulfentrazone, independentemente das doses aplicadas (Tabela 2), comprovando a tolerância dessas espécies ao herbicida, que é uma das características altamente desejável para que uma espécie seja utilizada como fitorremediadora. Dessa forma, *H. annuus*, *C. ensiformis*, *D. lab lab* e *A. hypogaea* apresentam potencial para fitorremediação de solos tratados com sulfentrazone.

**Tabela 2.** Matéria seca da parte aérea de espécies fitorremediadoras, cultivadas por 100 dias em solo tratado ou não com sulfentrazone, com as respectivas equações de regressão

Espécies fitorremediadoras	Matéria seca (g)			Equação de regressão
	Doses (g ha <sup>-1</sup> )			
	0	250	500	
<i>Helianthus annuus</i>	73,00	65,00	65,00	$\hat{Y} = 67,67$
<i>Canavalia ensiformis</i>	156,00	173,00	173,00	$\hat{Y} = 167,33$
<i>Dolichos lab lab</i>	107,00	126,00	126,00	$\hat{Y} = 119,67$
<i>Arachis hypogaea</i>	50,00	61,00	61,00	$\hat{Y} = 57,33$
C.V. (%)	15,58			

Não foram observados sintomas de intoxicação, aos 20 e 50 dias após a emergência (DAE), nas plantas de sorgo, quando estas foram semeadas no solo com 250 g ha<sup>-1</sup> de sulfentrazone após o cultivo com *H. annuus*. Verificou-se, também para esta espécie, menor intoxicação nas plantas de sorgo (55%) aos 20 DAE no solo com 500 g ha<sup>-1</sup> do herbicida (Tabela 3). Esses resultados mostram melhor eficiência de *H. annuus* em remediar o solo contaminado com sulfentrazone, o que pode ser devido a maior absorção e metabolização do herbicida por essa espécie. Já foi evidenciado que o *H. annuus* apresenta maior absorção de metais pesados quando comparados com outras espécies de plantas como a *Brassica juncea* e *Phaseolus coccineus* (Dushenkov et al., 1997).

Embora tenha ocorrido intoxicação nas plantas de sorgo nos tratamentos com 500 g ha<sup>-1</sup> de sulfentrazone com cultivo prévio de *H. annuus*, *D. lab lab*, *A. hypogaea* e *C. ensiformis* verificou-se, aos 50 DAE, que esses sintomas foram menores quando comparados ao tratamento sem cultivo prévio (Tabela 3).

Com o aumento da concentração do sulfentrazone no solo observou-se comportamento linear crescente na intoxicação das plantas de sorgo aos 20 e 50 DAE. Todavia, nos solos remediados pelas espécies *H. annuus*, *D. lab lab*, *A. hypogaea* e *C. ensiformis* o crescimento e desenvolvimento das plantas de sorgo evidenciaram menor disponibilidade de sulfentrazone no solo, quando comparado com o solo sem cultivo (Tabela 3). Neste trabalho, os sintomas de intoxicação do sulfentrazone às plantas de sorgo foram: redução da altura das plantas, clorose e necrose das folhas.

Embora na literatura não tenha sido encontrado trabalhos específicos sobre fitorremediação de solos com resíduos do herbicida sulfentrazone, vários autores mostram a eficiência dessa técnica para outros herbicidas: tebuthiuron (Belo et al., 2007a; Pires et al., 2005a,b, 2006, 2008), trifloxysulfuron-sodium (Santos et al.,



2004; Procópio et al., 2005a,b, 2006; Belo et al., 2007b; Santos et al., 2007) e picloram (Carmo et al. 2008a,b).

**Tabela 3.** Efeito residual do sulfentrazone, aos 100 dias após sua aplicação, em solo após o cultivo ou não de espécies fitorremediadoras, expresso em porcentagem de intoxicação de plantas de sorgo aos 20 e 50 dias após a emergência (DAE), com as respectivas equações de regressão e coeficientes de determinação

Espécies fitorremediadoras	Intoxicação (%)			Equação de regressão	r <sup>2</sup>
	Doses (g ha <sup>-1</sup> )				
	0	250	500		
-----20 DAE-----					
<i>Helianthus annuus</i>	0,00 A	0,00 B	55,00 C	$\hat{Y} = 0,088 * D$	0,727
<i>Canavalia ensiformis</i>	0,00 A	5,00 B	77,50 A	$\hat{Y} = 0,128 * D$	0,776
<i>Dolichos lab lab</i>	0,00 A	18,75 A	71,25 AB	$\hat{Y} = 0,129 * D$	0,907
<i>Arachis hypogaea</i>	0,00 A	2,50 B	63,75 BC	$\hat{Y} = 0,104 * D$	0,748
Sem cultivo prévio <sup>2</sup>	0,00 A	30,00 A	82,50 A	$\hat{Y} = 0,156 * D$	0,940
C.V. (%)	24,19				
-----50 DAE-----					
<i>Helianthus annuus</i>	0,00 A	0,00 B	23,75 B	$\hat{Y} = 0,038 * D$	0,717
<i>Canavalia ensiformis</i>	0,00 A	8,75 A	23,75 B	$\hat{Y} = 0,045 * D$	0,841
<i>Dolichos lab lab</i>	0,00 A	0,00 B	21,25 B	$\hat{Y} = 0,034 * D$	0,739
<i>Arachis hypogaea</i>	0,00 A	0,00 B	26,25 B	$\hat{Y} = 0,042 * D$	0,723
Sem cultivo prévio <sup>2</sup>	0,00 A	12,50 A	61,65 A	$\hat{Y} = 0,108 * D$	0,836
C.V. (%)	38,57				

<sup>1</sup>/Médias seguidas pelas mesmas letras, na coluna, não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

<sup>2</sup>/Solo que permaneceu no vaso sem cultivo até o plantio do sorgo.

\* Significativo a 5% pelo teste t.

Não foram observadas diferenças no acúmulo de matéria seca da parte aérea (MSPA) das plantas de sorgo, nos tratamentos com aplicação de 0 e 250 g ha<sup>-1</sup> de sulfentrazone (Tabela 4). Isso indica que em doses menores pode ter havido algum tipo de imobilização ou degradação do herbicida. Sabe-se que os microrganismos podem responder de forma diferenciada a doses de um herbicida, variando, então, o tempo requerido para sua degradação.

Martinez (2006) verificou, em diferentes tipos de solo, que o herbicida sulfentrazone estimulou o crescimento de actinomicetos. Por outro lado, o crescimento de bactérias foi favorecido pelo herbicida apenas em Argissolo Vermelho-Amarelo (AVA), solo este com características físicas e químicas semelhante ao solo utilizado nesse trabalho. O contrário ocorreu para o crescimento fúngico que não foi afetado pelo mesmo no AVA. Nos solos, foram encontrados

vários microrganismos capazes de degradar o sulfentrazone, dentre eles encontra-se o gênero *Penicillium* sp.

Os fungos do gênero *Penicillium* sp. associam-se com a rizosfera de plantas cultivadas (Silva e Cavalcanti, 1990; Silvério, 2007), estes organismos saprofíticos encontram-se em maior concentração na região do solo com maior aporte de carbono facilmente metabolizável, como na rizosfera das plantas, onde há a deposição dos exsudados radiculares. Os exsudados (açúcares, aminoácidos, carboidratos, entre outros) são extremamente relevantes na degradação de orgânicos, visto que, além de proporcionarem condições favoráveis ao aumento da população microbiana, atuam diretamente na degradação, através da liberação de enzimas degradadoras (Monteiro, 2008).

Na dose de 500 g ha<sup>-1</sup>, não se observou diferença no acúmulo de MSPA das plantas de sorgo nos tratamentos com cultivo prévio das espécies com potencial de fitorremediação. Todavia, os tratamentos com cultivo prévio de *H. annuus* e *D. lab lab* foram superiores à testemunha sem cultivo (Tabela 4), evidenciando a maior eficiência dessas espécies na fitorremediação do solo contaminado com até 500 g ha<sup>-1</sup> de sulfentrazone. De alguma forma, *H. annuus* e *D. lab lab* podem ter estimulado sua microbiota rizosférica, resultando numa degradação mais eficiente do sulfentrazone. Visto que, o *H. annuus* apresenta ampla associação com microrganismos da rizosfera, endofíticos de raízes e de colmos (Horikoshi et al., 2008).

Pires, et al. (2005b) avaliaram a atividade rizosférica de quatro espécies vegetais com potencial de fitorremediação de solo contaminado com tebuthiuron e concluíram que a maior evolução de CO<sub>2</sub> no solo rizosférico tratado com tebuthiuron ocorreu no solo cultivado com *Canavalia ensiformis*, sendo, esta espécie a mais promissora para a fitorremediação do tebuthiuron. A ação das plantas influenciando a microbiota rizosférica, acelerando a degradação de compostos no solo, é conhecida como fitoestimulação. A mesma se constitui em um dos principais mecanismos de fitorremediação de herbicidas no solo. Segundo, Santos et al. (2007) a maior capacidade apresentada por *Stizolobium aterrimum* na descontaminação de solos com resíduos do trifloxysulfuron-sodium envolve também o processo de fitoestimulação.

Comparando-se as espécies em cultivo prévio, nas doses testadas, não foi observado efeito no acúmulo de MSPA das plantas de sorgo, após o cultivo de *D. lab lab*. Nos demais tratamentos foi verificada a redução da MSPA das plantas de sorgo com o aumento da concentração do sulfentrazone no solo (Tabela 4), o que confirma

a diferença na capacidade remediadora das espécies vegetais testadas. Pires, et al. (2005a), avaliando a capacidade de sete espécies vegetais na descontaminação de solos contaminados com tebuthiuron, observaram que até a dose de 0,5 kg ha<sup>-1</sup> do herbicida, a espécie que melhor fitorremediou o solo foi *Lupinus albus*. No entanto, quando o solo foi tratado com 1,0 kg ha<sup>-1</sup> de tebuthiuron, *Canavalia ensiformes* foi a espécie que melhor fitorremediou o solo.

**Tabela 4.** Efeito residual do sulfentrazone, no solo após o cultivo ou não de espécies fitorremediadoras, expresso em matéria seca da parte aérea de plantas de sorgo cultivadas aos 100 dias após aplicação do herbicida e colhidas 50 dias após a emergência, com as respectivas equações de regressão e coeficientes de determinação

Espécies fitorremediadoras	Matéria seca (g)			Equação de regressão	r <sup>2</sup>
	Doses (g ha <sup>-1</sup> )				
	0	250	500		
<i>Helianthus annuus</i>	26,77 A <sup>1</sup>	25,58 A	21,81 A	$\hat{Y} = 27,2037 - 0,0099 * D$	0,353
<i>Canavalia ensiformis</i>	24,22 A	21,06 A	17,60 AB	$\hat{Y} = 24,2746 - 0,0132 * D$	0,549
<i>Dolichos lab lab</i>	24,20 A	22,66 A	21,00 A	$\hat{Y} = 22,62$	-
<i>Arachis hypogaea</i>	23,52 A	21,38 A	18,28 AB	$\hat{Y} = 23,6817 - 0,0105 * D$	0,437
Sem cultivo prévio <sup>2</sup>	24,38 A	24,44 A	13,60 B	$\hat{Y} = 26,1996 - 0,0216 * D$	0,541
C.V. (%)	13,99				

<sup>1</sup>Médias seguidas pelas mesmas letras, na coluna, não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

<sup>2</sup>Solo que permaneceu no vaso sem o cultivo até o plantio do sorgo.

\* Significativo a 5% pelo teste t.

Não houve efeito do sulfentrazone sobre a MSPA da rebrota das plantas de sorgo nos tratamentos com cultivo prévio das espécies potencialmente fitorremediadoras. Somente observou-se diminuição no acúmulo de MSPA dessas plantas no tratamento sem cultivo na dose de 500 g ha<sup>-1</sup>. O que mais uma vez confirma a ação fitorremediadora das espécies avaliadas. Esses resultados também comprovam a longa persistência desse herbicida no solo na ausência das espécies fitorremediadoras, uma vez que até 200 dias após a aplicação, o sulfentrazone ainda causa problemas às plantas de sorgo (Tabela 5), estando de acordo com Rodrigues e Almeida, (2005), que relataram meia-vida de 180 dias, do sulfentrazone em solos brasileiros.

Avaliando os tipos de cultivo, nas doses testadas, não se observou diferenças no acúmulo de MSPA da rebrota de plantas de sorgo, após o cultivo prévio de *H. annuus*, *C. ensiformis*, *D. lab lab* e *A. hypogaea*. Todavia, no tratamento sem cultivo

prévio, com o aumento da concentração do sulfentrazone no solo constatou-se redução da matéria seca da parte aérea (Tabela 5).

**Tabela 5.** Efeito residual do sulfentrazone, no solo após o cultivo ou não de espécies fitorremediadoras, expresso em matéria seca da parte aérea da rebrota de plantas de sorgo cultivadas aos 150 dias após aplicação do herbicida e colhidas 50 dias após a emergência, com as respectivas equações de regressão e coeficientes de determinação

Espécies fitorremediadoras	Matéria seca (g)			Equação de regressão	r <sup>2</sup>
	Doses (g ha <sup>-1</sup> )				
	0	250	500		
<i>Helianthus annuus</i>	7,66 A <sup>1</sup>	5,38 A	5,54 A	Ŷ= 6,19	-
<i>Canavalia ensiformis</i>	7,48 A	6,85 A	6,75 A	Ŷ= 7,03	-
<i>Dolichos lab lab</i>	6,60 A	5,89 A	6,04 A	Ŷ= 6,18	-
<i>Arachis hypogaea</i>	5,81 A	5,24 A	5,18 A	Ŷ= 5,41	-
Sem cultivo prévio <sup>2</sup>	8,14 A	7,68 A	4,62 B	Ŷ= 8,5767-0,0070*D	0,359
C.V. (%)	31,92				

<sup>1</sup>Médias seguidas pelas mesmas letras, na coluna, não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

<sup>2</sup>Solo que permaneceu no vaso sem o cultivo de espécie vegetal.

\* Significativo a 5% pelo teste t.

Todas as espécies cultivadas são tolerantes ao sulfentrazone e apresentam potencial de remediação de solo contaminado com esse herbicida, entretanto, *Helianthus annuus* apresenta melhor capacidade de remediação de solo contaminado com esse herbicida.

## 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. p.299-352.

ARTUZI, J.P.; CONTIERO, R.L. Herbicidas aplicados na soja e produtividade do milho em sucessão. **Pesq. Agropec. Bras.**, v.41, p.1119-1123, 2006.

BELO, A.F. et al. Efeito da umidade do solo sobre a capacidade de *Canavalia ensiformis* e *Stizolobium aterrimum* em remediar solos contaminados com herbicidas. **Planta Daninha**, v.25, p.239-249, 2007a.

BELO, A.F. et al. Fitorremediação de solo adubado com composto orgânico e contaminado com trifloxysulfuron-sodium. **Planta Daninha**, v.25, p.251-258, 2007b.

BLANCO, F.M.G.; VELINI, E.D. Persistência do herbicida sulfentrazone em solo cultivado com soja e seu efeito em culturas sucedâneas. **Planta Daninha**, v.23, p.693-700, 2005.

CARMO, M.L. et al. Influência do período de cultivo de *Panicum maximum* (Cultivar Tanzânia) na fitorremediação de solo contaminado com picloram. **Planta Daninha**, v.26, p.315-322, 2008a.

CARMO, M.L. et al. Influência do período de cultivo do capim-pé-de-galinha gigante (*Eleusine coracana*) na fitorremediação de solo contaminado com picloram. **Planta Daninha**, v.26, p.601-609, 2008b.

COBUCCI, T. et al. Comportamento de herbicidas com efeito residual em diferentes coberturas na cultura do feijoeiro. **Planta Daninha**, v.22, p.591-596, 2004.

CONCENÇO, G. et al. Uso da técnica de bioensaio para verificar a presença de herbicidas no solo. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 10., 2001, Pelotas. **Resumos...** Pelotas: UFPel, 2001.

DUSHENKOV, S. et al. Removal of Uranium from Water Using Terrestrial Plants. **Environmental Science & Technology**, v.31, p.3468-3474, 1997.

FRANCO, L.O.; MAIA, R.C.C.; PORTO, A.L.F. Remoção de metais pesados por quitina e quitosana isoladas de *Cunninghamella elegans*. **Brazilian Journal of Microbiology**, v.35, p.243-247, 2004.

HORIKOSHI, H.M. et al. Avaliação preliminar da comunidade bacteriana associada à plantas de girassol (*Helianthus annuus*) e capacidade de produção de auxina por alguns isolados. In: SEMANA DE BIOTECNOLOGIA, 4., 2008, Londrina. **Anais...** Londrina-PR, p.8, 2008.

MAIN, C.L. et al. Sulfentrazone persistence in southern soils: bioavailable concentration and effect on a rotational cotton crop. **Weed Tech.**, v.18, p.346-352, 2004.

MARTINEZ, C.O. **Biotransformação do herbicida sulfentrazone em solos brasileiros**. 2006. 93f. Dissertação (Mestrado em Ciência de Alimentos). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

MONTEIRO, M.T. **Fitorremediação de rejeito contaminado proveniente do Canal do Fundão, na Baía da Guanabara-RJ**. 2008. 317f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

OHMES, G.A. et al. Sulfentrazone dissipation in a Tennessee soil. **Weed Tech.**, v.14, p.100-105, 2000.

PEREIRA, F.A.R. et al. Seletividade de sulfentrazone em cultivares de soja e efeitos residuais sobre culturas sucessivas em solos de cerrado. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v.1, p.219-224, 2000.

PIRES, F.R. et al. Adubos verdes na fitorremediação de solos contaminados com o herbicida tebuthiuron. **Caatinga**, v.19, p.92-97, 2006.

PIRES, F.R. et al. Avaliação da fitorremediação de tebuthiuron utilizando *Crotalaria juncea* como planta indicadora. **Rev. Ciênc. Agron.**, v.39, p.245-250, 2008.

PIRES, F.R. et al. Fitorremediação de solos contaminados com tebuthiuron utilizando-se espécies cultivadas para adubação verde. **Planta Daninha**, v.23, p.711-717, 2005a.

PIRES, F.R. et al. Inferências sobre atividade rizosférica de espécies com potencial para fitorremediação do herbicida tebuthiuron. **R. Bras. Ci. Solo**, v.29, p.627-634, 2005b.

PRATA, F.; LAVORENTI, A. Comportamento de herbicidas no solo: influência da matéria orgânica. **Rev. biociênc.**, v.6, p.17-22, 2000.

PROCÓPIO, S.O. et al. Fitorremediação de solo contaminado com trifloxysulfuron-sodium por diferentes densidades populacionais de feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis* (L). DC.). **Ci. Agrotec.**, v.30, p.444-449, 2006.

PROCÓPIO, S.O. et al. Fitorremediação de solo contaminado com trifloxysulfuron-sodium por mucuna-preta (*Stizolobium aterrimum*). **Planta Daninha**, v.23, p.719-724, 2005a.

PROCÓPIO, S.O. et al. Potencial de espécies vegetais para a remediação do herbicida trifloxysulfuron-sodium. **Planta Daninha**, v.23, p.9-16, 2005b.

PROCÓPIO, S.O. et al. Seleção de plantas com potencial para fitorremediação de solos contaminados com o herbicida trifloxysulfuron-sodium. **Planta Daninha**, v.22, p.315-322, 2004.

QUEROL, X. et al. Immobilization of heavy metals in polluted soils by the addition of zeolitic material synthesized from coal fly ash. **Chemosphere**, v.62, p.171-180, 2006.

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

ROSSI, C.V.S. et al. Mobilidade do sulfentrazone em latossolo vermelho e em chernossolo. **Planta Daninha**, v.23, p.701-710, 2005.

ROSSI, C.V.S. et al. Mobilidade do sulfentrazone em nitossolo vermelho e em neossolo quartzarênico. **Planta Daninha**, v.21, p.111-120, 2003.

SANTOS, E.A. et al. Fitoestimulação por *Stizolobium aterrimum* como processo de remediação de solo contaminado com trifloxysulfuron-sodium. **Planta Daninha**, v.25, p.259-265, 2007.

SANTOS, J.B. et al. Fitorremediação do herbicida trifloxysulfuron-sodium. **Planta Daninha**, v.22, p.223-330, 2004.

SILVA, M.I.L.; CAVALCANTI, M.A.Q. Fungos na rizosfera de sementes de tomate (*Lycopersicon esculentum*). **Fitopatol. Bras.**, v.15, p.323-326, 1990.

SILVÉRIO, M.L. **Fungos filamentosos isolados da rizosfera de plantas nativas da caatinga e de cultivos de goiabeira (*Psidium guajava* L.) sadias e infestadas por nematóides.** 2007. 47f. Dissertação (Mestrado em Biologia dos Fungos). Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

VIDAL, R.A. **Ação dos herbicidas.** Porto Alegre: Ribas A. Vidal, 2002. 89p.

VIVIAN, R. et al. Persistência de sulfentrazone em argissolo vermelho-amarelo cultivado com cana-de-açúcar. **Planta Daninha**, v.24, p.741-750, 2006.

WILSON, P.C. et al. Phytotoxicity, uptake, and distribution of <sup>14</sup>C-simazine in *Acorus gramineus* and *Pontederia cordata*. **Weed Sci.**, v.48, p.701-709, 2000.

## ATIVIDADE FOTOSSINTÉTICA DE PLANTAS CULTIVADAS EM SOLO CONTAMINADO COM PICLORAM

### RESUMO

Objetivou-se, com este trabalho, avaliar os efeitos do picloram sobre as características associadas à atividade fotossintética de *Brachiaria brizantha*, *Brachiaria decumbens*, *Eleusine coracana* e *Zea mays* consideradas espécies com potencial de remediação de solo contaminado por esse herbicida. O experimento foi conduzido em esquema fatorial 4 x 3, no delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições. O primeiro fator constou do cultivo das espécies *B. brizantha*, *B. decumbens*, *E. coracana* e *Z. mays* e o segundo de três doses (0, 80 e 160 g ha<sup>-1</sup>) de picloram, aplicadas em pré-emergência. Após o preenchimento dos vasos com 6,0 kg de solo, classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo, fez-se a irrigação e aplicou-se à superfície do solo o herbicida. Um dia após esta aplicação, procedeu-se a semeadura das espécies vegetais. Aos 40 dias após a emergência das espécies vegetais, foram determinadas a condutância estomática (gs - mol m<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>), a taxa de transpiração (E - mol H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>), a concentração de CO<sub>2</sub> na câmara subestomática (C<sub>i</sub> - μmol mol<sup>-1</sup>), o gradiente de CO<sub>2</sub> (ΔC - μmol mol<sup>-1</sup>) e a taxa fotossintética (A - μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>). Essas avaliações foram realizadas utilizando-se um analisador de gases no infravermelho (IRGA). Aos 90 DAE das plantas foi coletada a parte aérea e determinada a matéria seca. Resíduos de picloram no solo podem afetar as variáveis fisiológicas estudadas, todavia, a produção de matéria seca da parte aérea dessas espécies não foi influenciada pela ação do herbicida, independentemente das doses aplicadas, indicando tolerância das espécies ao picloram.

**Palavras-chave:** fitorremediação, herbicida, pastagem



## PHOTOSYNTETIC ACTIVITY OF CULTIVATED PLANTS IN SOIL CONTAMINATED WITH PICLORAM

### ABSTRACT

The goal of this work was to evaluate the picloram effects on the characteristics associated with photosynthetic activity of *Brachiaria brizantha*, *Brachiaria decumbens*, *Eleusine coracana* and *Zea mays* regarded species with potential of remediation of contaminated soil with this herbicide. The experiment was conducted in factorial 4 x 3, completely randomized design, with four replications. The first factor consisted by cultivation of species *B. brizantha*, *B. decumbens*, *E. coracana* and *Z. may*; the second factor by three picloram doses (0, 80 and 160 g ha<sup>-1</sup>) applied in pre-emergence. After filling the pots with 6.0 kg of soil, classified with red-yellow Hapludalf, it was done the irrigation and it was done the herbicide application herbicide in soil surface. One day after this application, proceeded the sowing of vegetal species. At 40 days after the emergency of the vegetal species, were evaluated the stomatal conductance (gs - mol m<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>), transpiration rate (E - mol H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>), sub-stomatal CO<sub>2</sub> concentration (Ci - μmol mol<sup>-1</sup>), CO<sub>2</sub> gradient (ΔC - μmol mol<sup>-1</sup>) and the photosynthetic rate (A - μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>). These evaluations were performed using an infrared gas analyzer (IRGA). At 90 days after the plants emergency was collected the shoot for determination of shoot dry matter. Picloram residues in soil can affect the physiological variables studied, however, the shoot dry matter wasn't influenced by the herbicide action, independently of the doses applied, indicating tolerance of the species to the picloram.

**Keywords:** phytoremediation, herbicide, pasture

### INTRODUÇÃO

A contaminação ambiental causada pelo uso indiscriminado de agrotóxicos, em especial os herbicidas, que são aplicados em maior volume nos sistemas de produção vegetal, têm gerado preocupações.

Os herbicidas de longo efeito residual apresentam como principais problemas à possibilidade de contaminação de culturas cultivadas em sucessão e a

contaminação ambiental ocasionada pela lixiviação, podendo atingir cursos de águas subterrâneas (Santos et al., 2007a).

O picloram é um herbicida amplamente utilizado, principalmente em pastagens, que apresenta elevada persistência no solo (Santos et al., 2006). Esse herbicida pertence ao grupo dos mimetizadores de auxinas, controla as plantas do grupo das magnoliopsidas e apresenta seletividade às plantas da família das Poáceas.

Quando aplicado em espécies vegetais sensíveis, os herbicidas desse grupo provocam distúrbios no metabolismo dos ácidos nucléicos, aumento da atividade enzimática, e destruição do floema, por provocar alongamento, turgescência e rompimento das células (Machado et al., 2006). Também, os herbicidas auxínicos induzem o fechamento estomático e em muitos casos provocam distúrbios na atividade fotossintética e respiração, provocados pelas alterações do balanço iônico nas células (Pemadasa e Jeyaseelan, 1976). No entanto, esses autores sugerem outros mecanismos que podem induzir o fechamento estomático, como o acúmulo de potássio e amido nas células guardas, efeitos observados em *Stachytarpheta indica* tratada com 2,4-D.

A dinâmica do picloram no solo pode variar em razão do tipo e conteúdo de argila, do teor de matéria orgânica e da umidade do solo (Walker et al., 1992), visto que, esse apresenta relativa sorção às partículas de argila e matéria orgânica (Grover, 1971). Desse modo, essas características influenciam diretamente no potencial de impacto ambiental do herbicida em questão. O pH é outro fator que influencia sua sorção no solo, que com aumento dos valores há menor adsorção aos colóides (D'Antonino et al., 2009). Sendo assim, o picloram pode atingir as águas subterrâneas e superficiais (Pang et al., 2000; Close et al., 2003), podendo causar efeitos negativos aos organismos fotossintetizantes (Wong, 2000), como observado com o herbicida auxínico 2,4-D.

Uma maneira de reduzir o efeito residual no solo do picloram e conseqüentemente o impacto ambiental, é o cultivo de espécies vegetais com capacidade de remediação dos solos (Carmo et al., 2008a,b). Essa técnica baseia-se na capacidade que algumas espécies vegetais possuem de acelerar a retirada de compostos tóxicos do ambiente (solo e água), promovendo sua descontaminação (Cunningam et al., 1996).

O emprego da fitorremediação na despoluição de solos contaminados com herbicidas vem sendo pesquisado nos últimos anos (Santos et al., 2004, 2007b; Belo

et al., 2007a,b; Pires et al., 2003, 2005a,b, 2008; Procópio et al., 2005, 2006, 2008; Carmo et al., 2008a,b,c) e apresenta-se como técnica promissora, pois além de menor custo, possibilita a metabolização dos compostos orgânicos, não havendo, nessa situação, necessidade de retirada das plantas remediadoras da área contaminada (Cunningham et al., 1996). Dessa forma, o sucesso no emprego da fitorremediação depende da natureza química e das propriedades do composto, além da aptidão ecológica da espécie vegetal a ser empregada, visando efetivar a remediação e diminuir o tempo de descontaminação da área (Santos et al., 2007a).

A escolha de uma espécie com potencial de remediação de áreas contaminadas com herbicidas mimetizadores de auxinas é difícil, pois esses herbicidas causam distúrbios fisiológicos nas plantas (Pemadasa e Jeyaseelan, 1976). Esse grupo de herbicidas pode alterar os aspectos fotossintéticos até mesmo de plantas consideradas tolerantes, como o milho (Zhao e Wang, 2010), podendo atuar no fechamento estomático por meio da menor absorção de água pelo sistema radicular (Machado et al., 2006), reduzindo a turgescência foliar, levando a planta a reduzir as perdas de água com o fechamento estomático.

Outro processo conhecido é o estímulo à produção do etileno pelas plantas, este que por sua vez, estimula a síntese do ácido abscísico (ABA) que atua na indução do fechamento estomático (Mercier, 2004), reduzindo o influxo de CO<sub>2</sub> para o interior da folha. O etileno, também, promove a formação de celulasas, que atuam na parede celular, reduzindo a resistência física desta, provocando a alongação celular (Mercier, 2004; Machado et al., 2006) e subsequentemente interrupção dos canais dos feixes vasculares reduzindo a translocação de água.

Considerando que o sucesso na adoção de espécies vegetais para a remediação de solos contaminados com herbicidas é limitado pela susceptibilidade dessas ao contaminante, e sabendo que o herbicida picloram atua indiretamente na atividade fotossintética, as variáveis associadas à fotossíntese podem ser utilizadas como indicadores da tolerância das plantas a esse herbicida. Com isso, objetivou-se, com este trabalho, avaliar as características associadas à atividade fotossintética de *Brachiaria brizantha*, *Brachiaria decumbens*, *Eleusine coracana* e *Zea mays* quando cultivadas em solo contaminado com diferentes concentrações de picloram.

## MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi conduzido em casa de vegetação da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, no período de novembro de 2007 a janeiro de 2008. O experimento constou de um fatorial 4 x 3, no delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições. O primeiro fator foi constituído pelo cultivo das espécies *Brachiaria brizantha*, *Brachiaria decumbens*, *Eleusine coracana* e *Zea mays* e o segundo de três doses (0, 80 e 160 g ha<sup>-1</sup>) de picloram, aplicadas em pré-emergência.

Como substrato para o crescimento das plantas, utilizou-se amostras de solo classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo, cujas características físicas e químicas estão apresentadas na tabela 1. As amostras do solo em estudo foram coletadas na profundidade de 0-20 cm, em área sem histórico de aplicação de herbicidas. Essas foram passadas em peneira com malha de 4 mm e adubadas com superfosfato simples na proporção de 10,0 g kg<sup>-1</sup> de solo.

**Tabela 1.** Resultados das análises física e química das amostras do Argissolo Vermelho-Amarelo utilizado no experimento

Análise Física (dag kg <sup>-1</sup> ) <sup>1</sup>											
Argila	Silte	Areia fina		Areia grossa		Classificação textural					
24	20	31		25		Franco Argilo Arenosa					
Análise Química <sup>1</sup>											
pH H <sub>2</sub> O	P	K <sup>+</sup>	H + Al	Al <sup>3+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	CTC pH 7,0		V	m	MO
	mg dm <sup>-3</sup>		cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>						%		dag kg <sup>-1</sup>
5,0	49,7	122	3,63	0,1	5,9	1,5	11,34		68	1	1,3

<sup>1</sup>Análises realizadas no Laboratório de Análise de Solos Viçosa Ltda.

Após o preparo do solo, o mesmo foi colocado em vasos revestidos com filme de polietileno visando evitar perda do herbicida por lixiviação. Foi utilizado 6,0 kg do substrato por vaso, estes foram irrigados ajustando-se a umidade em valor próximo a 80% da capacidade de campo, fazendo-se a seguir a aplicação do herbicida com um pulverizador de precisão, equipado com bicos TT110.02, espaçados a 0,5 m, calibrado para aplicação de 100 L ha<sup>-1</sup> de calda herbicida.

A semeadura das espécies *B. brizantha*, *B. decumbens*, *E. coracana* e *Z. mays* foi realizada um dia após a aplicação do picloram. Sete dias após a emergência foi realizado o desbaste, deixando três plantas por vaso. Para o bom crescimento e desenvolvimento das plantas, foram feitas irrigações diárias, mantendo-se a umidade do solo próxima a 80% da capacidade de campo. O controle da umidade do solo foi

realizado por meio de pesagens semanais dos vasos repondo-se a água evapotranspirada.

Aos 30, 45 e 60 dias após emergência (DAE) foi adicionado em cada vaso 0,3 g de uréia visando melhor crescimento das plantas. A partir dos 60 DAE foram feitas adubações semanais de cobertura com 100 mL por vaso de solução Ouro Verde® contendo (g L<sup>-1</sup>): N (3,75), P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (3,75), K<sub>2</sub>O (5,00), CaO (0,75), S (1,00), MgO (0,20), Cl (0,10), Mn (0,075), Fe (0,015), B (0,012) e Zn (0,010).

Aos 40 DAE das plantas foram realizadas as avaliações na folha mais jovem, com limbo foliar totalmente expandido, das quatro espécies, utilizando-se analisador de gases no infravermelho (IRGA), marca ADC, modelo LCA PRO (Analytical Development Co. Ltd, Hoddesdon, UK). Foram determinadas a condutância estomática (gs - mol m<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>), a taxa de transpiração (E - mol H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>), a concentração de CO<sub>2</sub> na câmara subestomática (C<sub>i</sub> - μmol mol<sup>-1</sup>), o gradiente de CO<sub>2</sub> (ΔC - μmol mol<sup>-1</sup>) e a taxa fotossintética (A - μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>). Essas avaliações foram realizadas entre 7 e 9 horas da manhã, em dia de céu limpo e com iluminação artificial de 1.400 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, de forma a manter as condições ambientais homogêneas durante as avaliações em casa de vegetação aberta, permitindo livre circulação do ar.

Aos 90 DAE fez-se a colheita da parte aérea das plantas, que foram secas em estufa de circulação forçada de ar (70 ± 1°C) até massa constante, determinando-se a matéria seca.

Os dados foram submetidos à análise de variância e de regressão, comparando somente o fator doses. 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<sup>2</sup>= SQReg/SQTrat).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observou-se redução da condutância estomática (gs) nas espécies *B. decumbens*, *E. coracana* e *B. brizantha* com o aumento da concentração de picloram no solo. A menor gs pode ter sido provocada pela ação do picloram, que estimula a produção do etileno nas plantas, este que por sua vez estimula a síntese do ácido abscísico, que se acumula inicialmente nas folhas, e depois é translocado pela planta,

atuando no fechamento estomático (Mercier, 2004). Todavia, não foram observadas diferenças na gs da espécie *Z. mays* independentemente das doses de picloram avaliadas (Tabela 2).

A regulação estomática é o mecanismo fisiológico que as plantas terrestres vasculares possuem para o controle da transpiração (Messinger et al., 2006). Segundo Naves-Barbiero et al. (2000), a epiderme das folhas encontra-se normalmente envolvida por uma cutícula relativamente impermeável, tanto ao vapor d'água quanto ao gás carbônico, mas contém grande quantidade de estômatos, cuja resposta, mediante a regulação da condutância estomática, controla a transpiração da folha e é influenciada pela luz, pela concentração de gás carbônico atmosférico, pela umidade e temperatura. Para Ludlow (1980), a condutância estomática é proporcional à transpiração, à fotossíntese líquida e ao potencial da água na folha.

**Tabela 2.** Condutância estomática (gs) de espécies fitorremediadoras, cultivadas por 40 dias em solo tratado ou não com picloram, com as respectivas equações de regressão e coeficientes de determinação

Espécies fitorremediadoras	gs (mol m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> )			Equação de regressão	r <sup>2</sup>
	Doses (g ha <sup>-1</sup> )				
	0	80	160		
<i>Brachiaria decumbens</i>	0,24	0,15	0,14	$\hat{Y} = 0,2254 - 0,0006 * D$	0,595
<i>Eleusine coracana</i>	0,17	0,15	0,13	$\hat{Y} = 0,1688 - 0,0002 * D$	0,454
<i>Brachiaria brizantha</i>	0,28	0,17	0,19	$\hat{Y} = 0,2546 - 0,0005 * D$	0,337
<i>Zea mays</i>	0,17	0,15	0,15	$\hat{Y} = 0,16$	-
C.V. (%)	22,06				

\* Significativo a 5% pelo teste t.

A taxa transpiratória (E) não foi alterada na espécie *Z. mays*, independentemente das concentrações de picloram no solo. No entanto, as espécies *B. decumbens*, *E. coracana* e *B. brizantha* apresentaram redução da E proporcionalmente com o aumento da concentração do herbicida no solo (Tabela 3).

A transpiração é a perda de vapor d'água pelas plantas, assim, plantas que apresentam maior período de abertura estomática, maximizando a absorção de CO<sub>2</sub> apresentam, também elevadas taxas de transpiração e, provavelmente, grande consumo de água (Klar, 1984). A transpiração da maioria das espécies vegetais é determinada pela demanda climática relacionada à radiação solar, mecanismos fisiológicos relacionados com respostas estomáticas a fatores ambientais, índice de área foliar e disponibilidade de água no solo (Taiz e Zeiger, 2004).

O fechamento estomático influencia na redução da transpiração. A  $g_s$  é responsável pelo fluxo de entrada de  $CO_2$  e saída de água pelo estômato, quanto menor sua abertura, maior a resistência estomática e conseqüente diminuição na transpiração (Taiz e Zeiger, 2004). Os herbicidas auxínicos podem atuar no fechamento estomático através da menor absorção de água pelo sistema radicular (Machado et al., 2006), reduzindo a turgescência foliar, levando a planta a reduzir as perdas de água com o fechamento estomático.

**Tabela 3.** Taxa de transpiração (E) de espécies fitorremediadoras, cultivadas por 40 dias em solo tratado ou não com picloram, com as respectivas equações de regressão e coeficientes de determinação

Espécies fitorremediadoras	E (mol H <sub>2</sub> O m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )			Equação de regressão	r <sup>2</sup>
	Doses (g ha <sup>-1</sup> )				
	0	80	160		
<i>Brachiaria decumbens</i>	2,37	1,80	1,79	$\hat{Y} = 2,2758 - 0,0036 * D$	0,647
<i>Eleusine coracana</i>	1,78	1,74	1,58	$\hat{Y} = 1,7992 - 0,0013 * D$	0,741
<i>Brachiaria brizantha</i>	2,81	2,18	1,83	$\hat{Y} = 2,7625 - 0,0061 * D$	0,912
<i>Zea mays</i>	1,74	1,60	1,58	$\hat{Y} = 1,64$	-
C.V. (%)					

\* Significativo a 5% pelo teste t.

A concentração de  $CO_2$  na câmara subestomática ( $C_i$ ) não foi alterada nas espécies *B. brizantha* e *Z. mays*, independentemente das doses de picloram avaliadas. Para as espécies *B. decumbens* e *E. coracana* houve redução da  $C_i$  proporcionalmente com o aumento da concentração do herbicida no solo (Tabela 4). A menor concentração do  $CO_2$  no espaço interno da folha pode ser devido a maior atividade fotossintética, com maior taxa de carboxilação, incorporando o  $CO_2$  a compostos orgânicos, ou por outro lado, pode ser devido a maior resistência para o influxo de  $CO_2$  pelos estômatos, que é representada pela condutância estomática.

A  $C_i$  é considerada variável fisiológica influenciada por fatores ambientais como disponibilidade hídrica, de luz e energia, entre outros (Ometto et al., 2003). Neste estudo, os resultados obtidos de menor  $C_i$  para algumas espécies podem ser atribuídos ao efeito do picloram, que pode atuar influenciando diretamente nos estômatos, ou provocar distúrbios indiretos, como menor absorção de água pelo sistema radicular (Machado et al., 2006), reduzindo a turgescência foliar, levando a planta a reduzir as perdas de água com o fechamento estomático e conseqüentemente reduzindo o influxo de  $CO_2$ .

Outro processo conhecido, provocado pelos herbicidas auxínicos, é o estímulo de produção do etileno nas plantas, este que por sua vez estimula a síntese do ácido abscísico (ABA), que se acumula inicialmente nas folhas, e depois é translocado pela planta, atuando no fechamento estomático (Mercier, 2004), reduzindo o influxo de CO<sub>2</sub> para o interior da folha, e conseqüentemente a Ci.

Outros herbicidas podem atuar de forma diferenciada, como observado em cultivares de cana-de-açúcar tratada com ametryn, em que a concentração interna de CO<sub>2</sub> do mesófilo foliar (Ci) foi maior que a testemunha sem aplicação de herbicidas (Galon et al., 2010), estes resultados são esperados, pois, o ametryn atua na inibição do fotossistema II da fotossíntese, sendo assim, o influxo de CO<sub>2</sub> não é alterado, mas a taxa de carboxilação é reduzida (fotossíntese), ocorrendo acúmulo de CO<sub>2</sub> no interior da folha.

**Tabela 4.** Concentração de CO<sub>2</sub> na câmara subestomática (Ci) de espécies fitorremediadoras, cultivadas por 40 dias em solo tratado ou não com picloram, com as respectivas equações de regressão e coeficientes de determinação

Espécies fitorremediadoras	Ci ( $\mu\text{mol mol}^{-1}$ )			Equação de regressão	r <sup>2</sup>
	Doses ( $\text{g ha}^{-1}$ )				
	0	80	160		
<i>Brachiaria decumbens</i>	146,00	140,25	106,50	$\hat{Y} = 150,667 - 0,247 * D$	0,565
<i>Eleusine coracana</i>	219,00	204,25	168,00	$\hat{Y} = 222,583 - 0,318 * D$	0,712
<i>Brachiaria brizantha</i>	133,25	127,25	118,25	$\hat{Y} = 126,25$	-
<i>Zea mays</i>	174,50	174,75	164,75	$\hat{Y} = 171,33$	-
C.V. (%)	8,72				

\*Significativo a 5% pelo teste t.

O gradiente de CO<sub>2</sub> ( $\Delta C$ ), que representa a diferença entre a concentração do CO<sub>2</sub> atmosférico e do CO<sub>2</sub> no interior da folha, decresceu nas espécies *B. decumbens*, *B. brizantha* e *Z. mays* com o aumento da concentração de picloram no solo. O menor  $\Delta C$  pode ser resultante do menor consumo de CO<sub>2</sub> pela atividade fotossintética, resultando em maior concentração de CO<sub>2</sub> no interior da folha. Todavia, não foram observadas diferenças no  $\Delta C$  pela espécie *E. coracana* independentemente das doses de picloram avaliadas (Tabela 5).

Esse efeito de redução do  $\Delta C$ , também, foi observado em cana-de-açúcar após a aplicação do ametryn, que atua diretamente na fotossíntese (Galon et al., 2010). Segundo esses autores, o CO<sub>2</sub> consumido está diretamente relacionado à intensidade fotossintética da planta no momento da avaliação, ou seja, de maneira



geral, quanto mais intenso for o metabolismo da planta, maior o consumo de CO<sub>2</sub> por unidade de tempo e maior o valor de ΔC.

**Tabela 5.** Gradiente de CO<sub>2</sub> (ΔC) de espécies fitorremediadoras, cultivadas por 40 dias em solo tratado ou não com picloram, com as respectivas equações de regressão e coeficientes de determinação

Espécies fitorremediadoras	ΔC (μmol mol <sup>-1</sup> )			Equação de regressão	r <sup>2</sup>
	Doses (g ha <sup>-1</sup> )				
	0	80	160		
<i>Brachiaria decumbens</i>	73,75	54,00	42,25	Ŷ= 72,417-0,197*D	0,879
<i>Eleusine coracana</i>	39,25	39,75	33,00	Ŷ= 37,33	-
<i>Brachiaria brizantha</i>	83,75	63,25	54,75	Ŷ= 81,750-0,181*D	0,879
<i>Zea mays</i>	47,90	43,75	39,00	Ŷ= 48,000-0,056*D	0,729
C.V. (%)	8,57				

\*Significativo a 5% pelo teste t.

A fotossíntese e, conseqüentemente, a respiração dependem de vários fatores, dentre eles do constante fluxo de CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> entrando e saindo da célula; este fluxo livre é função da concentração de CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> nos espaços intercelulares dependentes da abertura estomática, controladora majoritária do fluxo de gases (Taylor Jr. e Gunderson, 1986; Messinger et al., 2006). Essa, por sua vez, é em grande parte controlada pela turgescência tanto das células-guarda (que controlam a abertura dos estômatos) como das células epidérmicas dos estômatos (Humble e Hsiao, 1970). Desse modo, qualquer efeito, causado pelo picloram, que leve a menor absorção ou a translocação de água pode afetar primeiramente a condutância estomática e/ou mesofílica, reduzindo a taxa fotossintética.

Alguns dos efeitos dos herbicidas auxínicos são o acúmulo de cálcio no citoplasma, estímulo na produção de etileno e acidificação da parede celular. O etileno promove a formação de celulase (enzimas que degradam celulose) na parede celular reduzindo a resistência física desta e, com a pressão interna da célula pela água, ocorre alongação celular (Mercier, 2004; Machado et al., 2006), com o aumento da célula pode ocorrer interrupção dos canais dos feixes vasculares reduzindo a translocação de água.

Aos 40 dias após a emergência das plantas, verificou-se uma correlação negativa entre a concentração do picloram no solo e a taxa fotossintética das espécies *B. decumbens* e *B. brizantha* apesar destas terem apresentado preliminarmente tolerância a esse herbicida (Tabela 6). Para *E. coracana* e *Z. mays* não se verificou alterações na taxa fotossintética quando cultivadas em solo com diferentes

concentrações do picloram. Evidenciando a distinção entre essas espécies ao efeito do picloram. Esses efeitos de redução da taxa fotossintética podem ser por algumas inibições relacionadas às trocas gasosas, como comentado anteriormente, ou por outros mecanismos como a redução da concentração de clorofilas ou carotenóides, que estão diretamente relacionados a atividade fotossintética, envolvidos na captação e dissipação de energia.

Sunohara e Matsumoto (1997) observaram que o quinclorac provocou clorose em plantas de milho jovens. Quando pequenos discos foliares de plantas de milho foram submetidos ao herbicida, observaram diminuição na quantidade de clorofila total e um aumento no teor de etileno. Segundo os autores existe uma correlação negativa entre produção de etileno e clorofila total. Também, foi observado que coleóptilos de milho tratados com outros reguladores de crescimento como o ácido indol-acético (AIA) e o 2,4-D, apresentaram aumento significativo nos teores de etileno e queda nos teores de clorofila total.

Outro provável mecanismo de limitação da atividade fotossintética é devido a alteração da expressão gênica das plantas intoxicadas, que pode alterar as taxas de síntese de algumas enzimas essenciais para o processo fotossintético (Chapman e Estelle, 2009).

**Tabela 6.** Taxa fotossintética (A) de espécies fitorremediadoras, cultivadas por 40 dias em solo tratado ou não com picloram, com as respectivas equações de regressão e coeficientes de determinação

Espécies fitorremediadoras	A ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )			Equação de regressão	r <sup>2</sup>
	Doses ( $\text{g ha}^{-1}$ )				
	0	80	160		
<i>Brachiaria decumbens</i>	23,50	17,21	13,44	$\hat{Y} = 23,075 - 0,063 * D$	0,876
<i>Eleusine coracana</i>	12,58	12,71	11,08	$\hat{Y} = 12,12$	-
<i>Brachiaria brizantha</i>	26,66	20,05	17,42	$\hat{Y} = 25,994 - 0,058 * D$	0,878
<i>Zea mays</i>	13,88	11,92	11,78	$\hat{Y} = 12,52$	-
C.V. (%)	10,14				

\* Significativo a 5% pelo teste t.

Khan et al. (2002), trabalhando com herbicidas auxínicos em mostarda, observaram redução de aproximadamente 50% da taxa fotossintética e da condutância estomática na presença desses produtos. Em soja, o 2,4-D numa concentração de 100 ppm causou inibição da atividade fotossintética (Wedding et al., 1954). Wong (2000) também verificou redução de até 80% da taxa fotossintética de algas quando tratadas com 2 mg/L de 2,4-D. Lopez-Martinez et al. (1997)

trabalhando com biótipos resistentes de *Echinochloa crus-galli*, não observaram alterações no aparato fotossintético das plantas tratadas com quinclorac, herbicida que apresenta mesmo mecanismos de ação do picloram.

As espécies *B. brizantha*, *B. decumbens*, *E. coracana* e *Z. mays* se mostram tolerantes ao picloram. Esse herbicida, nas condições avaliadas, não causou sinal visual de intoxicação às plantas (dados não apresentados) e também não interferiu na produção de matéria seca da parte aérea das referidas espécies (Tabela 7).

De forma geral, as plantas da família das Poáceas apresentam tolerância aos herbicidas auxínicos, pré-requisito básico para uma planta ser utilizada como fitorremediadora, isso devido as diferenças anatômicas dos vasos condutores, e de outros mecanismos de desintoxicação. No entanto, essas plantas podem ser intoxicadas por esse grupo de herbicidas, como observado por Zhao e Wang (2010), em que auxinas alteraram a atividade fisiológica de plantas de *Zea mays*.

**Tabela 7.** Matéria seca da parte aérea (MSPA) de espécies fitorremediadoras, cultivadas por 90 dias em solo tratado ou não com picloram, com as respectivas equações de regressão

Espécies fitorremediadoras	MSPA (g)			Equação de regressão
	Doses (g ha <sup>-1</sup> )			
	0	80	160	
<i>Brachiaria decumbens</i>	142,50	138,75	132,50	$\hat{Y} = 137,92$
<i>Eleusine coracana</i>	118,75	126,25	118,75	$\hat{Y} = 121,25$
<i>Brachiaria brizantha</i>	112,50	133,75	113,75	$\hat{Y} = 120,00$
<i>Zea mays</i>	147,50	150,00	135,00	$\hat{Y} = 144,17$
C.V. (%)	11,68			

O *Z. mays* foi a espécie menos afetada pelo picloram quando se avaliou as características associadas a atividade fotossintética, todavia, com base na matéria seca da parte aérea, todas as espécies estudadas mostraram-se tolerantes ao picloram. Isso indica que a avaliação prévia das características fisiológicas não pode ser utilizada como indicador de tolerância dessas espécies ao herbicida.

## LITERATURA CITADA

BELO, A.F. et al. Efeito da umidade do solo sobre a capacidade de *Canavalia ensiformis* e *Stizolobium aterrimum* em remediar solos contaminados com herbicidas. **Planta Daninha**, v.25, p.239-249, 2007a.

BELO, A.F. et al. Fitorremediação de solo adubado com composto orgânico e contaminado com trifloxysulfuron-sodium. **Planta Daninha**, v.25, p.251-258, 2007b.

CARMO, M.L. et al. Influência do período de cultivo de *Panicum maximum* (Cultivar Tanzânia) na fitorremediação de solo contaminado com picloram. **Planta Daninha**, v.26, p.315-322, 2008a.

CARMO, M.L. et al. Influência do período de cultivo do capim-pé-de-galinha gigante (*Eleusine coracana*) na fitorremediação de solo contaminado com picloram. **Planta Daninha**, v.26, p.601-609, 2008b.

CARMO, M.L. et al. Seleção de plantas para fitorremediação de solos contaminados com picloram. **Planta Daninha**, v.26, p.301-313, 2008c.

CHAPMAN, E.J.; ESTELLE, M. Mechanism of auxin-regulated gene expression in plants. **Annu. Rev. Genet.**, v.43, p.265-285, 2009.

CLOSE, M.E. et al. Field study of pesticide leaching in an allophonic soil in New Zealand. 1: Experimental results. **Austr. J. Soil Res.**, v.41, p.809-824, 2003.

CUNNINGHAM, S.D. et al. Phytoremediation of soils contaminated with organic pollutants. **Adv. Agron.** v.56, p.55-114, 1996.

D'ANTONINO, L. et al. Lixiviação do picloram em Argissolo vermelho-amarelo e Latossolo vermelho-amarelo com diferentes valores de pH. **Planta Daninha**, v.27, p.589-600, 2009.

GALON, L. et al. Influência de herbicidas na atividade fotossintética de genótipos de cana-de-açúcar. **Planta Daninha**, no prelo, 2010.

GROVER, R. Adsorption of picloram by soil colloids and various other adsorbents. **Weed Science**, v.19, p.417-418, 1971.

HUMBLE, G.D.; HSIAO, T.C. Light-dependent influx and efflux of potassium of guard cells during stomatal opening and closing. **Plant Physiol.**, v.46, p.483-487, 1970.

KHAN, N.A. et al. Auxin and defoliation effects on photosynthesis and ethylene evolution in mustard. **Scientia Horticulturae**, v.96, p.43-51, 2002.

KLAR, A.E. Evapotranspiração. In: **A água no sistema solo-planta-atmosfera**. 2ed. São Paulo: Nobel, 1984. 408p.

LOPEZ-MARTINEZ, N. et al. Resistance of barnyardgrass (*Echinochloa crus-galli*) to atrazine and quinclorac. **Pesticide Science**, v.51, p.171-175, 1997.

LUDLOW, M.M. Adaptive significance of stomatal responses to water stress. In: TURNER, N.C.; KRAMER, P.J., (Eds.). **Adaptation of plants to water and high temperature stress**. New York: John-Wiley, 1980. p.123-138.

MACHADO, R.F. et al. Reflexos do mecanismo de ação de herbicidas na qualidade fisiológica de sementes e na atividade enzimática em plântulas de arroz. **Revista Brasileira de Sementes**, v.28, p.151-160, 2006.

MERCIER, H. Auxinas. In: KERBAUY, G.B (Ed). **Fisiologia Vegetal**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogans S.A., 2004. p.217-249.

MESSINGER, S.M. et al. Evidence for involvement of photosynthetic processes in the stomatal response to CO<sub>2</sub>. **Plant Physiol.**, v.140, p.771-778, 2006.

NAVES-BARBIERO, C.C. et al. Fluxo de seiva e condutância estomática de duas espécies lenhosas sempre-verdes no campo sujo e cerrado. **R. Bras. Fisiol. Veg.**, v.12, p.119-134, 2000.

OMETTO, J.P.H.B. et al. Variação temporal do isótopo estável do carbono em material arbóreo em florestas da região Amazônica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ECOLOGIA, 4., 2003, Fortaleza. **Anais...** Rio Claro: Sociedade de Ecologia do Brasil, 2003. CD-ROM.

PANG, L.P. et al. Simulation of picloram, atrazine and simazine leaching through two New Zealand soils and into groundwater using Hydrus-2D. **J. Contam. Hydrol.**, v.44, p.19-46, 2000.

PEMADASA, M.A.; JEYASEELAN, K. Some effects of three herbicidal auxins on stomatal movements. **New Phytol.**, v.77, p.569-573, 1976.

PIRES, F.R. et al. Avaliação da fitorremediação de tebuthiuron utilizando *Crotalaria juncea* como planta indicadora. **Rev. Ciênc. Agron.**, v.39, p.245-250, 2008.

PIRES, F.R. et al. Fitorremediação de solos contaminados com tebuthiuron utilizando-se espécies cultivadas para adubação verde. **Planta Daninha**, v.23, p.711-717, 2005a.

PIRES, F.R. et al. Inferências sobre atividade rizosférica de espécies com potencial para fitorremediação do herbicida tebuthiuron. **R. Bras. Ci. Solo**, v.29, p.627-634, 2005b.

PIRES, F.R. et al. Seleção de plantas com potencial para fitorremediação de tebuthiuron. **Planta Daninha**, v.21, p.451-458, 2003.

PROCÓPIO, S.O. et al. Fitorremediação de solo contaminado com picloram por capim-pé-de-galinha-gigante (*Eleusine coracana*). **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v.32, p.2517-2524, 2008.

PROCÓPIO, S.O. et al. Fitorremediação de solo contaminado com trifloxysulfuron-sodium por mucuna-preta (*Stizolobium aterrimum*). **Planta Daninha**, v.23, p.719-724, 2005.

PROCÓPIO, S.O. et al. Fitorremediação de solo contaminado com trifloxysulfuron-sodium por diferentes densidades populacionais de feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis* (L). DC.). **Ci. Agrotec.**, v.30, p.444-449, 2006.

SANTOS, E.A. et al. Fitoestimulação por *Stizolobium aterrimum* como processo de remediação de solo contaminado com trifloxysulfuron-sodium. **Planta Daninha**, v.25, p.259-265, 2007b.

SANTOS, J.B. et al. Fitorremediação de áreas contaminadas por herbicidas. In: SILVA, A.A.; SILVA, J.F. **Tópicos em manejo de plantas daninhas**. Viçosa: Editora UFV, 2007a. p.210-329.

SANTOS, J.B. et al. Fitorremediação do herbicida trifloxysulfuron-sodium. **Planta Daninha**, v.22, p.323-330, 2004.

SANTOS, M.V. et al. Eficácia e persistência no solo de herbicidas utilizados em pastagem. **Planta Daninha**, v.24, p.391-398, 2006.

SUNOHARA, Y.; MATSUMOTO, H. Comparative physiological effects of quinclorac and auxins, and light involvement in quinclorac-induced chlorosis in corn leaves. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v.58, p.125-132, 1997.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2004. p.449-484.

TAYLOR Jr., G.E.; GUNDERSON, C.A. The response of foliar gas exchange to exogenously applied ethylene. **Plant Physiology**, v.82, p.653-657, 1986.

WALKER, A. et al. Influence of temperature, soil moisture and soil characteristics on the persistence of alachlor. **Pesticide Science**, v.35, p.109-116, 1992.

WEDDING, R.T. et al. Effect of 2,4-Dichlorophenoxyacetic acid on photosynthesis and respiration. **Plant Physiology**, v.29, p.64-69, 1954.

WONG, P.K. Effects of 2,4-D, glyphosate and paraquat on growth, photosynthesis and chlorophyll-a synthesis of *Scenedesmus quadricauda* Berb 614. **Chemosphere**, v.41, p.177-182, 2000.

ZHAO, G.W.; WANG, J.H. Effect of auxin on mesocotyl elongation of dark-grown maize under different seeding depths. **Russian Journal of Plant Physiology**, v.57, p.79-86, 2010.

## POTENCIAL DE ESPÉCIES VEGETAIS NA REMEDIAÇÃO DE SOLO CONTAMINADO COM PICLORAM

### RESUMO

Objetivou-se, com este trabalho, avaliar a eficiência de espécies vegetais na remediação de um Argissolo Vermelho-Amarelo contaminado com picloram. O trabalho foi conduzido em duas etapas. Na primeira, avaliou-se o crescimento de espécies vegetais em solo contaminado com picloram. O experimento constou de um fatorial 4 x 3, no delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições. O primeiro fator foi constituído pelo cultivo das espécies *Brachiaria brizantha*, *Brachiaria decumbens*, *Eleusine coracana* e *Zea mays* e o segundo de três doses (0, 80 e 160 g ha<sup>-1</sup>) de picloram, aplicadas em pré-emergência. Na segunda etapa avaliou-se a capacidade remediadora dessas espécies através do crescimento de uma espécie indicadora (feijão) de resíduos no solo desse herbicida. O experimento constou de um fatorial 5 x 3, no delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições. O primeiro fator foi constituído pelo cultivo ou não das espécies *B. brizantha*, *B. decumbens*, *E. coracana* e *Z. mays* e o segundo de três doses (0, 80 e 160 g ha<sup>-1</sup>) de picloram, aplicadas em pré-emergência. Na primeira etapa, foram utilizados vasos revestidos com filme de polietileno contendo 6,0 kg do substrato. Após a irrigação dos vasos, aplicou-se à superfície do solo o herbicida. Um dia após esta aplicação, procedeu-se a semeadura das espécies vegetais. Estas foram colhidas 90 dias depois e secadas em estufa de circulação forçada de ar (70 ± 1°C) até massa constante para determinação do acúmulo de matéria seca da parte aérea. Na segunda etapa, foram coletadas amostras de 3,0 kg de solo de cada vaso da etapa anterior. Essas amostras foram colocadas em vasos revestidos com filme de polietileno fazendo-se a seguir o cultivo de feijão, espécie previamente definida como indicadora de resíduos do picloram. Aos 20 dias após a emergência (DAE) foi avaliada, visualmente, a intoxicação das plantas de feijão, atribuindo notas de 0 (ausência de intoxicação) a 100 (morte da planta). Aos 90 DAE, na maturação

fisiológica do feijão, foi determinado o número de vagens por planta, o número de sementes por vagens, o peso das sementes a 13% de umidade e a matéria seca da haste por planta. Todas as espécies cultivadas foram tolerantes ao picloram; entretanto, *B. decumbens*, *E. coracana* e *B. brizantha* mostraram-se mais eficientes que *Z. mays* na remediação de solo contaminado com esse herbicida.

**Palavras-chave:** fitorremediação, herbicida, descontaminação, *Brachiaria* sp., *Eleusine coracana*

## POTENTIAL OF VEGETAL SPECIES IN SOIL REMEDIATION CONTAMINATED WITH PICLORAM

### ABSTRACT

The goal of this work was to evaluate the efficiency of vegetal species in the remediation of red-yellow Hapludalf contaminated with the herbicide picloram. The work was conducted in two stages. In the first stage, was evaluated the vegetal species growth in soil contaminated or not with picloram. The experiment consisted in factorial 4 x 3, in completely randomized design, with four replications. The first factor was constituted by the cultivation of *Brachiaria brizantha*, *Brachiaria decumbens*, *Eleusine coracana* and *Zea mays*; the second by three picloram doses (0, 80 e 160 g ha<sup>-1</sup>), applied in pre-emergence. In the second stage was evaluated the remediating capacity of these species trough the growth of an indicator specie (bean) of residues in soil of this herbicide. The experiment consisted in factorial 5 x 3, in completely randomized design, with four replications. The first factor was constituted by the cultivation or not of *B. brizantha*, *B. decumbens*, *E. coracana* and *Z. mays*; the second by three picloram doses (0, 80 e 160 g ha<sup>-1</sup>), applied in pre-emergence. In the first stage, were used pots lined with polyethylene film containing 6.0 kg of substrate. After pots irrigation, the herbicide was applied on the soil surface. One day after the application, was performed the sowing of vegetal species. These were collected at 90 days after and drier in stove, until constant weight, for determination of shoot dry matter accumulation. In the second stage, were collected soil samples of 3.0 kg of each pot from the previous stage. These samples were placed in pots lined with polyethylene film by making to follow the cultivation of bean, specie previously



defined as an indicator of picloram residues. At 20 days after emergence (DAE) was evaluated, visually, the intoxication of bean plants, assigning scores from 0 (intoxication lack) to 100 (plant death). At 90 DAE, in the bean physiological maturation, was determinate the number of pods per plant, the number of seeds per pods, the weight of seeds at 13% of humidity and the dry matter of branch per plant. All species were tolerant to picloram, nevertheless, *B. decumbens*, *E. coracana* and *B. brizantha* were considerate more efficient in the remediation of contaminated soil with this herbicide

**Keywords:** phytoremediation, herbicide, decontamination, *Brachiaria* sp., *Eleusine coracana*

## INTRODUÇÃO

O controle químico de plantas daninhas em pastagens é o método mais utilizado, em razão de sua eficiência e praticidade. Entretanto, os herbicidas recomendados apresentam elevado efeito residual (Santos et al., 2006), causando toxicidade a organismos não alvo na própria área de aplicação, como as culturas sensíveis semeadas posteriormente (D'Antonino et al., 2009a), ou ainda atingindo cursos hídricos, causando contaminação destes (Pinho et al., 2004).

Dentre os herbicidas mais utilizados em pastagens destaca-se o picloram, que apresenta elevada eficiência no controle de plantas daninhas dicotiledôneas perenes e anuais infestantes de pastagens (Santos et al., 2006; D'Antonino et al., 2009b). Esse herbicida possui longa persistência no solo, podendo intoxicar culturas sensíveis por até 360 dias, principalmente na camada mais superficial do solo, isso devido a maior sorção desse a fração orgânica do solo (Santos et al., 2006), o que pode limitar o uso da área com rotação de culturas por longo período após sua aplicação (*carryover*) (Bovey et al., 1982; Carmo et al., 2008b; D'Antonino et al., 2009a).

O picloram possui outras características que elevam o potencial de contaminação do ambiente, como o baixo  $K_{oc}$ , elevando o potencial de lixiviação no perfil do solo (Cheung e Biggar, 1974; Pang et al., 2000; Inoue et al., 2003; Celis et al., 2002, 2005; D'Antonino et al., 2009b), podendo atingir águas superficiais ou subterrâneas, ocasionando efeito negativo aos organismos não alvos, como observado para outros herbicidas auxínicos em algas (Wong, 2000).

Uma das alternativas para descontaminação de solo contaminado com herbicidas é a fitorremediação, que consiste no uso de plantas e sua microbiota associada como agentes de imobilização ou degradação desses contaminantes, tornando-os inofensivos ao ecossistema (Accioly e Siqueira, 2000; Wilson et al., 2000).

A fitorremediação é bastante estudada para extração de metais pesado do solo e da água (Khan et al., 2000; Jiang et al., 2009). No entanto, essa é uma técnica pouco utilizada para descontaminação de solos contaminados com herbicidas, embora já existam trabalhos demonstrando a eficiência dessa técnica para alguns herbicidas (Pires et al., 2003; Santos et al., 2004a,b; Procópio et al., 2004, 2005a; Belo et al., 2007b; Carmo et al., 2008a,b,c; Procópio et al., 2008, 2009). No entanto, ainda existem muitas dúvidas quanto a potencialidade das espécies na fitorremediação do solo contaminado com herbicidas, pois além de distinto metabolismo essas podem apresentar associação com os microrganismos do solo elevando a potencialidade de remediação.

A bioestimulação dos microrganismos do solo pelas plantas fitorremediadoras apresentam papel fundamental na degradação de herbicidas, caracterizando como uma das formas de fitorremediação. Testando esse efeito Belo et al. (2007a) avaliaram a adição de composto orgânico ao solo cultivado com *Canavalia ensiformis* e *Stizolobium aterrimum* e observaram eficiência na descontaminação do solo pelas espécies vegetais, sem, no entanto, efeito do composto orgânico. Evidenciando que, se o herbicida foi degradado pelos microrganismos, estes apresentam uma relação com as espécies vegetais, do contrário a descontaminação foi realizada através dos mecanismos da própria planta (absorção e ou degradação).

Considerando que o picloram é largamente utilizado no manejo de plantas daninhas em pastagem e que promove considerado efeito negativo no ambiente, objetivou-se, neste trabalho, avaliar o potencial das espécies *Brachiaria brizantha*, *Brachiaria decumbens*, *Eleusine coracana* e *Zea mays* na remediação de solo contaminado com esse herbicida.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

Este trabalho, composto por duas etapas, foi realizado em casa de vegetação na Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG. Na primeira etapa, avaliou-se o

crescimento de espécies vegetais com potencial de descontaminação de solo contaminado com picloram. O experimento constou de um fatorial 4 x 3, no delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições. O primeiro fator foi constituído pelo cultivo das espécies *B. brizantha*, *B. decumbens*, *E. coracana* e *Z. mays* e o segundo de três doses (0, 80 e 160 g ha<sup>-1</sup>) de picloram, aplicadas em pré-emergência. Na segunda etapa, avaliou-se a capacidade remediadora dessas espécies através do crescimento de uma espécie indicadora (feijão) de resíduos no solo desse herbicida. O experimento constou de um fatorial 5 x 3, no delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições. O primeiro fator foi constituído pelo cultivo ou não das espécies *B. brizantha*, *B. decumbens*, *E. coracana* e *Z. mays*. O segundo fator constou de três doses 0, 80 e 160 g ha<sup>-1</sup> de picloram, aplicadas em pré-emergência.

Como substrato para o crescimento das plantas, utilizou-se amostras de solo classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo, cujas características físicas e químicas estão apresentadas na tabela 1. As amostras do solo em estudo foram coletadas na profundidade de 0-20 cm, em área sem histórico de aplicação de herbicidas. Essas foram passadas em peneira com malha de 4 mm e adubadas com superfosfato simples na proporção de 10,0 g kg<sup>-1</sup> de solo.

**Tabela 1.** Resultados das análises física e química das amostras do Argissolo Vermelho-Amarelo utilizado no experimento

Análise Física (dag kg <sup>-1</sup> ) <sup>1</sup>										
Argila	Silte	Areia fina	Areia grossa		Classificação textural					
24	20	31	25		Franco Argilo Arenosa					
Análise Química <sup>1</sup>										
pH H <sub>2</sub> O	P	K <sup>+</sup>	H + Al	Al <sup>3+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	CTC pH 7,0	V	m	MO
	mg dm <sup>-3</sup>		cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>				%		dag kg <sup>-1</sup>	
5,0	49,7	122	3,63	0,1	5,9	1,5	11,34	68	1	1,3

<sup>1</sup>Análises realizadas no Laboratório de Análise de Solos Viçosa Ltda.

Na primeira etapa, foram utilizados vasos revestidos com filme de polietileno contendo 6,0 kg do substrato. Após a irrigação dos vasos visando atingir uma umidade próxima a 80% da capacidade de campo, fez-se a aplicação do herbicida com um pulverizador de precisão, equipado com bicos TT110.02, espaçados a 0,5 m, calibrado para aplicação de 100 L ha<sup>-1</sup> de calda herbicida.

A semeadura das espécies vegetais potencialmente remediadoras (*B. brizantha*, *B. decumbens*, *E. coracana* e *Z. mays*) foi realizada um dia após a

aplicação do picloram. Sete dias após a emergência foi realizado o desbaste, deixando três plantas por vaso. Para o bom crescimento e desenvolvimento das plantas, foram feitas irrigações diárias, mantendo-se a umidade do solo próxima a 80% da capacidade de campo. O controle da umidade do solo foi realizado por meio de pesagens semanais dos vasos repondo-se a água evapotranspirada.

Aos 30, 45 e 60 dias após emergência (DAE) foi adicionado em cada vaso 0,3 g de uréia visando melhor crescimento das plantas. A partir dos 60 DAE foram feitas adubações semanais de cobertura com 100 mL por vaso de solução Ouro Verde® contendo ( $\text{g L}^{-1}$ ): N (3,75),  $\text{P}_2\text{O}_5$  (3,75),  $\text{K}_2\text{O}$  (5,00), CaO (0,75), S (1,00), MgO (0,20), Cl (0,10), Mn (0,075), Fe (0,015), B (0,012) e Zn (0,010).

Aos 90 DAE fez-se a colheita da parte aérea das plantas, que foram secas em estufa de circulação forçada de ar ( $70 \pm 1^\circ\text{C}$ ) até massa constante, determinando-se a matéria seca de cada espécie em função dos tratamentos.

Na segunda etapa, foram coletadas amostras de solo de cada vaso da etapa anterior. Essas amostras foram secas ao ar e peneiradas para retirada de raízes e eventuais torrões. Em seguida, foram colocados 3,0 kg desse solo em vasos revestidos com filme de polietileno, onde foi semeada a espécie indicadora (*Phaseolus vulgaris*), previamente selecionada como de alta sensibilidade ao picloram. Após a emergência das plântulas de feijão realizou-se o desbaste deixando-se três plantas por vaso. Estas plantas foram irrigadas diariamente para manutenção da umidade do solo próximo a 80% da capacidade de campo e adubadas com 50 mL de solução de Ouro Verde® conforme especificado na etapa anterior.

Aos 20 DAE foi avaliada, visualmente, a intoxicação das plantas de feijão pelo picloram. Atribuíram-se notas de 0 (ausência de intoxicação) a 100 (morte da planta). Aos 90 DAE, quando ocorreu a maturação fisiológica do feijão, foi determinado o número de vagens por planta, o número de sementes por vagens, o peso das sementes a 13% de umidade e a matéria seca da haste por planta.

Todos os dados obtidos foram submetidos à análise de variância. Para comparação das médias entre os tipos de cultivo utilizou-se o teste de Tukey a 5% de probabilidade e, para avaliar os efeitos de doses do picloram no crescimento e desenvolvimento das plantas remediadoras a análise de 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 ( $r^2 = \text{SQReg}/\text{SQTrat}$ ).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

As espécies *B. brizantha*, *B. decumbens*, *E. coracana* e *Z. mays* se mostram tolerantes ao picloram nas doses avaliadas. Esse herbicida, nas condições avaliadas, não causou sinal visual de intoxicação às plantas (dados não apresentados) e também não interferiu na produção de matéria seca da parte aérea das referidas espécies (Tabela 2). Esses resultados corroboram com Carmo et al. (2008a), que não verificaram efeito do picloram no crescimento de *E. coracana*. Todavia, D'Antonino et al. (2009a) observaram a inibição de 13,6% no acúmulo de matéria seca de plantas de milho aos 90 DAE quando o solo foi tratado com picloram + 2,4-D (256 + 960 g ha<sup>-1</sup>) um dia após a semeadura. Apesar das gramíneas serem tolerantes às auxinas sintéticas essa característica é dependente de uma série de fatores como arranjo do tecido vascular, metabolismo diferencial do herbicida, doses aplicadas, condições climáticas, etc. (Silva et al. 2007), o que justifica os resultados observados.

**Tabela 2.** Matéria seca da parte aérea de espécies fitorremediadoras, cultivadas por 90 dias em solo tratado ou não com picloram, com as respectivas equações de regressão

Espécies fitorremediadoras	Matéria seca (g)			Equação de regressão
	Doses (g ha <sup>-1</sup> )			
	0	80	160	
<i>Brachiaria decumbens</i>	142,50	138,75	132,50	$\hat{Y} = 137,92$
<i>Eleusine coracana</i>	118,75	126,25	118,75	$\hat{Y} = 121,25$
<i>Brachiaria brizantha</i>	112,50	133,75	113,75	$\hat{Y} = 120,00$
<i>Zea mays</i>	147,50	150,00	135,00	$\hat{Y} = 144,17$
C.V. (%)		11,68		

Ao avaliar o desenvolvimento das plantas de feijão, verificou-se que estas, quando cultivadas 90 dias após tratamento do solo com 160 g ha<sup>-1</sup> do picloram, permanecendo o solo sem cultivo, apresentaram intoxicação superior a 96%, em avaliação aos 20 dias após a emergência. Todavia, quando o solo tratado com o herbicida foi cultivado com *E. coracana* ou *B. brizantha* os sintomas de intoxicação foram inferiores (em média 31,25%) indicando maior capacidade dessas espécies em remediar solos contaminados com o picloram (Tabela 3). Esse efeito residual do picloram no solo, após o cultivo ou não das plantas remediadoras, comprovou os resultados na literatura (Grover, 1971; Hamaker et al., 1966; Deubert e Corte-Real, 1986; Inoue et al., 2003, Celis, et al., 2002, 2005; Santos et al. 2006) que indicam longa persistência desse herbicida no solo.

A capacidade de espécies vegetais em remediar solos contaminados por herbicidas já foi comprovada para alguns herbicidas como trifloxysulfuron-sodium (Santos et al., 2004a; Procópio et al., 2005b, 2006; Belo et al., 2007b; Santos et al., 2007); atrazine (Anderson et al., 1994; Anderson e Coats, 1995; Perkovich et al., 1996; Arthur et al., 2000); tebuthiuron (Belo et al., 2007a; Pires et al., 2005a,b, 2006, 2008 ); e picloram (Carmo et al., 2008a,b,c; Procópio et al., 2008;2009). Diversas são as teorias que tentam explicar essa capacidade de descontaminação de solos por plantas. Segundo Burken e Schnoor (1996), isso pode ser devido a maior absorção e metabolização do herbicida em compostos não tóxicos por essas espécies. De acordo com Vidal e Merotto Jr. (2001) a metabolização dos herbicidas auxínicos é governada pelas enzimas, monoxigenases do citocromo P450 e glutatona que promovem reações de oxidação e conjugação sendo esse um dos mecanismos que conferem a tolerância ou resistência de algumas plantas a esses herbicidas.

**Tabela 3.** Efeito residual do picloram, aos 90 dias após sua aplicação, em solo após o cultivo ou não de espécies fitorremediadoras, expresso em porcentagem de intoxicação de plantas de feijão aos 20 dias após a emergência, com as respectivas equações de regressão e coeficientes de determinação

Espécies fitorremediadoras	Intoxicação (%)			Equação de regressão	r <sup>2</sup>
	Doses (g ha <sup>-1</sup> )				
	0	80	160		
<i>Brachiaria decumbens</i>	0,00 A <sup>1</sup>	0,00 C	72,50 B	$\hat{Y} = 0,300 * D$	0,743
<i>Eleusine coracana</i>	0,00 A	0,00 C	31,25 C	$\hat{Y} = 0,156 * D$	0,680
<i>Brachiaria brizantha</i>	0,00 A	0,00 C	31,25 C	$\hat{Y} = 0,156 * D$	0,680
<i>Zea mays</i>	0,00 A	21,25 B	68,75 B	$\hat{Y} = 0,300 * D$	0,888
Sem cultivo prévio <sup>2</sup>	0,00 A	51,25 A	96,25 A	$\hat{Y} = 0,300 * D$	0,968
C.V. (%)	26,76				

<sup>1</sup>Médias seguidas pelas mesmas letras, na coluna, não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

<sup>2</sup>Solo que permaneceu no vaso sem cultivo até o plantio do feijão.

\* Significativo a 5% pelo teste t.

Nas tabelas 4 e 5 fica evidente a longa persistência do picloram no solo, bem como, a eficiência das espécies vegetais na remediação do solo contaminado com esse herbicida. Verifica-se que a matéria seca da haste (MSH) e o número de vagens (NV) por planta de feijão foram afetados quando o solo foi tratado com 160 g ha<sup>-1</sup> de picloram e sem cultivo prévio.

**Tabela 4.** Efeito residual do picloram, no solo após o cultivo ou não de espécies fitorremediadoras, expresso em matéria seca da haste de plantas de feijão cultivadas aos 90 dias após aplicação do herbicida e colhidas na maturação fisiológica, com as respectivas equações de regressão e coeficientes de determinação

Espécies fitorremediadoras	Matéria seca (g)			Equação de regressão	r <sup>2</sup>
	Doses (g ha <sup>-1</sup> )				
	0	80	160		
<i>Brachiaria decumbens</i>	2,39 A <sup>1</sup>	2,57 A	2,45 A	$\hat{Y}= 2,47$	-
<i>Eleusine coracana</i>	2,45 A	1,99 A	2,04 A	$\hat{Y}= 2,16$	-
<i>Brachiaria brizantha</i>	2,23 A	2,41 A	1,83 AB	$\hat{Y}= 2,16$	-
<i>Zea mays</i>	2,36 A	2,72 A	2,75 A	$\hat{Y}= 2,61$	-
Sem cultivo prévio <sup>2</sup>	2,97 A	2,53 A	0,84 B	$\hat{Y}= 3,1849-0,0133*D$	0,472
C.V. (%)	22,54				

<sup>1</sup>Médias seguidas pelas mesmas letras, na coluna, não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

<sup>2</sup>Solo que permaneceu no vaso sem cultivo até o plantio do feijão.

\* Significativo a 5% pelo teste t.

**Tabela 5.** Efeito residual do picloram, no solo após o cultivo ou não de espécies fitorremediadoras, expresso em número de vagens de plantas de feijão cultivadas aos 90 dias após aplicação do herbicida e colhidas na maturação fisiológica com as respectivas equações de regressão e coeficientes de determinação

Espécies fitorremediadoras	Número de vagens			Equação de regressão	r <sup>2</sup>
	Doses (g ha <sup>-1</sup> )				
	0	80	160		
<i>Brachiaria decumbens</i>	4,83 A <sup>1</sup>	5,25 A	4,66 A	$\hat{Y}= 4,91$	-
<i>Eleusine coracana</i>	5,00 A	4,33 A	4,08 A	$\hat{Y}= 4,47$	-
<i>Brachiaria brizantha</i>	4,58 A	4,75 A	3,66 A	$\hat{Y}= 4,33$	-
<i>Zea mays</i>	5,08 A	4,33 A	5,50 A	$\hat{Y}= 4,97$	-
Sem cultivo prévio <sup>2</sup>	5,08 A	4,58 A	0,75 B	$\hat{Y}= 5,6389-0,0271*D$	0,667
C.V. (%)	21,21				

<sup>1</sup>Médias seguidas pelas mesmas letras, na coluna, não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

<sup>2</sup>Solo que permaneceu no vaso sem cultivo até o plantio do feijão.

\* Significativo a 5% pelo teste t.

Nos tratamentos onde o solo foi cultivado com as espécies fitorremediadoras antes do plantio do feijão a MSH e o NV por plantas de feijão não foram influenciados pelas doses testadas, indicando que houve descontaminação do solo. Entretanto, verificou-se a redução dos valores dessas variáveis com o aumento da concentração de picloram nos solos sem cultivo prévio (Tabela 4 e 5), comprovando a eficiência dessa técnica na descontaminação de solos tratados com picloram.

Outras características avaliadas que comprovam a capacidade remediadora das espécies vegetais são observadas nas tabelas 6 e 7. Verifica-se que o número de sementes e a massa destas não diferiram quando se cultivou o feijão aos 90 dias após

aplicação do picloram, em solo com cultivo prévio das espécies fitorremediadoras, independentemente da dose do herbicida aplicada. Todavia, quando o solo foi tratado com 160 g ha<sup>-1</sup> do herbicida e permaneceu sem o cultivo das espécies fitorremediadoras houve intoxicação das plantas de feijão com reflexos negativos no número e massa das sementes. Esses resultados confirmam os obtidos por Procópio et al. (2008) os quais observaram efeito positivo da *E. coracana* na remediação de solo contaminado com picloram, entretanto, esses autores não conduziram a cultura até a produção de grãos.

**Tabela 6.** Efeito residual do picloram, no solo após o cultivo ou não de espécies fitorremediadoras, expresso em número de sementes de plantas de feijão cultivadas aos 90 dias após aplicação do herbicida e colhidas na maturação fisiológica com as respectivas equações de regressão e coeficientes de determinação

Espécies fitorremediadoras	Número de sementes			Equação de regressão	r <sup>2</sup>
	Doses (g ha <sup>-1</sup> )				
	0	80	160		
<i>Brachiaria decumbens</i>	25,33 A <sup>1</sup>	22,66 A	19,58 A	$\hat{Y} = 25,4028 - 0,0359 * D$	0,610
<i>Eleusine coracana</i>	24,50 A	22,08 A	17,66 A	$\hat{Y} = 24,8333 - 0,0427 * D$	0,337
<i>Brachiaria brizantha</i>	23,00 A	22,91 A	16,00 A	$\hat{Y} = 20,64$	-
<i>Zea mays</i>	25,83 A	21,50 A	18,25 A	$\hat{Y} = 25,6528 - 0,0474 * D$	0,419
Sem cultivo prévio <sup>2</sup>	25,83 A	20,91 A	3,16 B	$\hat{Y} = 27,9722 - 0,1417 * D$	0,791
C.V. (%)	20,64				

<sup>1</sup>Médias seguidas pelas mesmas letras, na coluna, não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

<sup>2</sup>Solo que permaneceu no vaso sem cultivo até o plantio do feijão.

\* Significativo a 5% pelo teste t.

Na maior dose aplicada (160 g ha<sup>-1</sup>) não foram observadas diferenças quanto a massa das sementes produzidas por plantas de feijão nos tratamentos com cultivo prévio das espécies fitorremediadoras, enquanto no tratamento sem cultivo prévio dessas espécies, a redução média foi de 84% (Tabela 7). Esse efeito benéfico das plantas remediadoras pode estar relacionado com a metabolização do herbicida pela planta e/ou com a fitoestimulação que consiste na ação da microbiota rizosférica, acelerando a degradação de compostos no solo, conforme Santos et al. (2007) que observaram maior capacidade de *S. atterimum* na descontaminação de solos com resíduo do trifloxysulfuron-sodium.

Algumas plantas possuem um sistema radicular mais vigoroso, explorando maior volume de solo e, além disso, podem apresentar maior associação com os microrganismos do solo, até mesmos com bactérias diazotróficas com capacidade de



fixação de nitrogênio (Reis Junior et al., 2004). Características essas que podem ser de grande importância para maior eficiência na descontaminação de solo contaminado com herbicidas.

A massa das sementes por planta de feijão não foi alterada quando estas plantas foram cultivadas em solo remediado por *B. decumbens*, *E. coracana* e *B. brizantha*, independentemente da dose avaliada. No entanto, esses valores foram menores com o cultivo prévio de *Z. mays*, indicando menor eficiência desta espécie na remediação do picloram (Tabela 7). A maior eficiência na remediação do solo pelas espécies *B. decumbens*, *E. coracana* e *B. brizantha* pode estar relacionado com a exploração de maior volume do solo por estas espécies, como relatado por Barducci et al. (2009), que plantas de *B. brizantha* apresentam sistema radicular profundo e vigoroso quando comparado com milho.

**Tabela 7.** Efeito residual do picloram, no solo após o cultivo ou não de espécies fitorremediadoras, expresso em massa de sementes de plantas de feijão cultivadas aos 90 dias após aplicação do herbicida e colhidas na maturação fisiológica com as respectivas equações de regressão e coeficientes de determinação

Espécies fitorremediadoras	Massa de sementes (g)			Equação de regressão	r <sup>2</sup>
	Doses (g ha <sup>-1</sup> )				
	0	80	160		
<i>Brachiaria decumbens</i>	6,63 A <sup>1</sup>	5,99 A	4,37 A	$\hat{Y} = 5,66$	-
<i>Eleusine coracana</i>	6,24 A	5,92 A	4,51 A	$\hat{Y} = 5,56$	-
<i>Brachiaria brizantha</i>	5,74 A	6,19 A	4,57 A	$\hat{Y} = 5,50$	-
<i>Zea mays</i>	6,28 A	6,20 A	3,90 A	$\hat{Y} = 6,6515 - 0,0148 * D$	0,463
Sem cultivo prévio <sup>2</sup>	6,81 A	5,28 A	0,75 B	$\hat{Y} = 7,3178 - 0,0379 * D$	0,805
C.V. (%)	20,59				

<sup>1</sup>Médias seguidas pelas mesmas letras, na coluna, não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

<sup>2</sup>Solo que permaneceu no vaso sem cultivo até o plantio do feijão.

\* Significativo a 5% pelo teste t.

As espécies avaliadas são tolerantes ao picloram, sendo que *Brachiaria decumbens*, *Eleusine coracana* e *Brachiaria brizantha* são as que apresentam melhor capacidade para remediação de solo contaminado com esse herbicida. Todavia, novos estudos devem ser realizados utilizando métodos químicos para quantificar essa capacidade remediadora. Além disso, são necessárias pesquisas para esclarecer o mecanismo de remediação do solo utilizado por essas espécies.

## 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. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p.299-352.
- ANDERSON, T.A.; COATS, J.R. Screening rhizosphere soil samples for the ability to mineralize elevated concentrations of atrazine and metolachlor. **J. Environ. Sci. Health**, v.30, p.473-484, 1995.
- ANDERSON, T.A. et al. Enhanced degradation of a mixture of three herbicides in the rhizosphere of a herbicide-tolerant plant. **Chemosphere**, v.28, p.1551-1557, 1994.
- ARTHUR, E.L. et al. Degradation of an atrazine and metolachlor herbicide mixture in pesticide-contaminated soils from two agrochemical dealerships in Iowa. **Water, Air, Soil Poll.**, v.119, p.75-90, 2000.
- BARDUCCI, R.S. et al. Produção de *Brachiaria brizantha* e *Panicum maximum* com milho e adubação nitrogenada. **Arch. Zootec.**, v.58, p.211-222, 2009.
- BELO, A.F. et al. Efeito da umidade do solo sobre a capacidade de *Canavalia ensiformis* e *Stizolobium aterrimum* em remediar solos contaminados com herbicidas. **Planta Daninha**, v.25, p.239-249, 2007a.
- BELO, A.F. et al. Fitorremediação de solo adubado com composto orgânico e contaminado com trifloxysulfuron-sodium. **Planta Daninha**, v.25, p.251-258, 2007b.
- BOVEY, R.W. et al. Soil persistence of tebuthiuron in the Claypan Resource Area of Texas. **Weed Sci.**, v.30, p.140-144, 1982.
- BURKEN, J.G.; SCHNOOR, J.L. Phytoremediation: plant uptake of atrazine and role of root exudates. **J. Environ. Engin.**, v.122, p.958-963, 1996.
- CARMO, M.L. et al. Influência do período de cultivo de *Panicum maximum* (Cultivar Tanzânia) na fitorremediação de solo contaminado com picloram. **Planta Daninha**, v.26, p.315-322, 2008b.
- CARMO, M.L. et al. Influência do período de cultivo do capim-pé-de-galinha gigante (*Eleusine coracana*) na fitorremediação de solo contaminado com picloram. **Planta Daninha**, v.26, p.601-609, 2008c.
- CARMO, M.L. et al. Seleção de plantas para fitorremediação de solos contaminados com picloram. **Planta Daninha**, v.26, p.301-313, 2008a.
- CELIS, R. et al. Clay-herbicide complexes to retard picloram leaching in soil. **Intern. J. Environ. Anal. Chem.**, v.82, p.503-517, 2002.

CELIS, R. et al. Sorption and leaching behavior of polar aromatic acids in agricultural soils by batch and column leaching tests. **European Journal of Soil Science**, v.56, p.287-297, 2005.

CHEUNG, M.W.; BIGGAR, J.W. Solubility and molecular structure of 4-amino-3,5,6-trichloropicolinic acid in relation to pH and temperature. **J. Agr. Food Chem.**, v.22, p.202-206, 1974.

D'ANTONINO, L. et al. Efeitos de culturas na persistência de herbicidas auxínicos no solo. **Planta Daninha**, v.27, p.371-378, 2009a.

D'ANTONINO, L. et al. Lixiviação do picloram em Argissolo vermelho-amarelo e Latossolo vermelho-amarelo com diferentes valores de pH. **Planta Daninha**, v.27, p.589-600, 2009b.

DEUBERT, K.H.; CORTE-REAL, I. Soil residues of picloram and triclopyr after selective foliar application on utility rights-of-way. **Journal of Arboriculture**, v.12, p.269-272, 1986.

GROVER, R. Adsorption of picloram by soil colloids and various other adsorbents. **Weed Science**, v.19, p. 17-418, 1971.

HAMAKER, J.W., GORING, C.A.I., YOUNGSON, C.R. Sorption and leaching of 4-amino-3,5,6-trichloropicolinic acid in soils. **Advan. Chem. Ser.** v.60, p.23-37, 1966.

INOUE, M.H. et al. Critérios para avaliação do potencial de lixiviação dos herbicidas comercializados no Estado do Paraná. **Planta Daninha**, v.21, p.313-323. 2003.

JIANG, F.Y; CHEN, X.; LUO, A.C. Iron plaque formation on wetland plants and its influence on phosphorus, calcium and metal uptake. **Aquat. Ecol.**, v.43, p.879-890, 2009.

KHAN, A.G. et al. Role of plants, mycorrhizae and phytochelators in heavy metal contaminated land remediation. **Chemosphere**, v.41, p.197-207, 2000.

PANG, L.P. et al. Simulation of picloram, atrazine and simazine leaching through two New Zealand soils and into groundwater using HYDRUS-2D. **J. Contam. Hydrol.**, v.44, p.19-46, 2000.

PERKOVICH, B.S. et al. Enhanced mineralization of [<sup>14</sup>C] atrazine in *K. scoparia* rhizosferic soil from a pesticidecontaminated site. **Pestic. Sci.**, v.46, p.391-396, 1996.

PINHO, A.P. et al. Retenção de atrazina, picloram e caulinita em zona ripária localizada em área de silvicultura. **Engenharia na Agricultura**, v.12, p.260-270, 2004.

PIRES, F.R. et al. Adubos verdes na fitorremediação de solos contaminados com o herbicida tebuthiuron. **Caatinga**, v.19, p.92-97, 2006.

- PIRES, F.R. et al. Avaliação da fitorremediação de tebuthiuron utilizando *Crotalaria juncea* como planta indicadora. **Rev. Ciênc. Agron.**, v.39, p.245-250, 2008.
- PIRES, F.R. et al. Fitorremediação de solos contaminados com tebuthiuron utilizando-se espécies cultivadas para adubação verde. **Planta Daninha**, v.23, p.711-717, 2005a.
- PIRES, F.R. et al. Inferências sobre atividade rizosférica de espécies com potencial para fitorremediação do herbicida tebuthiuron. **R. Bras. Ci. Solo**, v.29, p.627-634, 2005b.
- PIRES, F.R. et al. Seleção de plantas com potencial para fitorremediação de tebuthiuron. **Planta Daninha**, v.21, p.451-458, 2003.
- PROCÓPIO, S.O. et al. Efeito da densidade populacional de *Panicum maximum* (cultivar Tanzânia) na fitorremediação de solo contaminado com o herbicida picloram. **Semina: Ciências Agrárias**, v.30, p.295-304, 2009.
- PROCÓPIO, S.O. et al. Fitorremediação de solo contaminado com picloram por capim-pé-de-galinha-gigante (*Eleusine coracana*). **Rev. Bras. Ci. Solo**, v.32, p.2517-2524, 2008.
- PROCÓPIO, S.O. et al. Fitorremediação de solo contaminado com trifloxysulfuron-sodium por mucuna-preta (*Stizolobium aterrimum*). **Planta Daninha**, v.23, p.719-724, 2005b.
- PROCÓPIO, S.O. et al. Fitorremediação de solo contaminado com trifloxysulfuron-sodium por diferentes densidades populacionais de feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis* (L). DC.). **Ci. Agrotec.**, v.30, p.444-449, 2006.
- PROCÓPIO, S.O. et al. Potencial de espécies vegetais para a remediação do herbicida trifloxysulfuron-sodium. **Planta Daninha**, v.23, p.9-16, 2005a.
- PROCÓPIO, S.O. et al. Seleção de plantas com potencial para fitorremediação de solos contaminados com o herbicida trifloxysulfuron sodium. **Planta Daninha**, v.22, p.315-322, 2004.
- REIS JUNIOR, F.B. et al. Identificação de isolados de *Azospirillum amazonense* associados a *Brachiaria* spp., em diferentes épocas e condições de cultivo e produção de fitormônio pela bactéria. **R. Bras. Ci. Solo**, v.28, p.103-113, 2004.
- SANTOS, E.A. et al. Fitoestimulação por *Stizolobium aterrimum* como processo de remediação de solo contaminado com trifloxysulfuron-sodium. **Planta Daninha**, v.25, p.259-265, 2007.
- SANTOS, M.V. et al. Eficácia e persistência no solo de herbicidas utilizados em pastagem. **Planta Daninha**, v.24, p.391-398, 2006.
- SANTOS, J.B. et al. Fitorremediação do herbicida trifloxysulfuron-sodium. **Planta Daninha**, v.22, p.323-330, 2004a.

SANTOS, J.B. et al. Seletividade do herbicida trifloxysulfuron-sodium para fins de fitorremediação. **Revista Ceres**, v.51, p.129-142, 2004b.

SILVA, A.A. et al. Herbicidas: Classificação e mecanismo de ação. In: SILVA, A.A.; SILVA, J.F. Ed. **Tópicos em manejo de plantas daninhas**. Viçosa: Ed. UFV, 2007. p.63-81.

VIDAL, R.A.; MEROTTO JR, A. Resistência de plantas daninhas aos herbicidas. In: VIDAL, R.A.; MEROTTO JR., A. (Eds.). **Herbicidologia**. Porto Alegre: 2001. p.138-148.

WILSON, P.C. et al. Phytotoxicity, uptake, and distribution of <sup>14</sup>C-simazine in *Acorus gramineus* and *Pontederia cordata*. **Weed Sci.**, v.48, p.701-709, 2000.

WONG, P.K. Effects of 2,4-D, glyphosate and paraquat on growth, photosynthesis and chlorophyll-a synthesis of *Scenedesmus quadricauda* Berb 614. **Chemosphere**, v.41, p.177-182, 2000.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização de plantas visando acelerar o processo de descontaminação do ambiente (solos e recursos hídricos) por poluentes orgânicos, como os herbicidas, destaca-se como técnica promissora, tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental. Apesar dessa técnica ser utilizada com frequência quando a contaminação do ambiente ocorre por metais pesados, ela é pouco utilizada quando se trata de contaminação por herbicidas. Isso ocorre devido à falta de estudos nessa linha de pesquisa.

Neste trabalho, objetivou-se selecionar espécies vegetais tolerantes e com potencial de remediação de solo contaminado com os herbicidas sulfentrazone e picloram. Constatou-se a viabilidade da utilização de algumas espécies vegetais na descontaminação do solo contaminado com esses herbicidas. Constatou-se também que a tolerância dessas espécies aos referidos herbicidas não pode ser definida com base nos atributos fisiológicos, pois o acúmulo de matéria seca da parte aérea dessas plantas não foi influenciado pela ação dos herbicidas.

Todas as espécies cultivadas em solo contaminado com sulfentrazone apresentaram tolerância a esse herbicida, no entanto, *H. annuus* destacou-se como a mais eficiente na remediação desse solo. Verificou-se, também, que *B. brizantha*, *B. decumbens*, *E. coracana* e *Z. mays* apresentam potencialidade de remediação de solo contaminado com picloram, entretanto, *B. decumbens*, *E. coracana* e *B. brizantha* mostraram-se mais eficientes que *Z. mays*.

Face à grande utilização do picloram e sulfentrazone no Brasil, ao elevado potencial desses herbicidas de causar sérios problemas ambientais, a ausência de resultados na literatura nacional e internacional sobre essa linha de pesquisa, torna-se necessário dar continuidade a esse trabalho. Acredita-se que a seleção de novas espécies vegetais com capacidade de remediação de solos contaminados por esses herbicidas e a quantificação dessa capacidade devam ser consideradas prioridades em novos projetos de pesquisa.