

INFERÊNCIAS SOBRE ATIVIDADE RIZOSFÉRICA DE ESPÉCIES COM POTENCIAL PARA FITORREMEDIAÇÃO DO HERBICIDA TEBUTHIURON⁽¹⁾

Fábio Ribeiro Pires⁽²⁾, Caetano Marciano de Souza⁽³⁾, Paulo Roberto Cecon⁽⁴⁾, José Barbosa dos Santos⁽⁵⁾, Marcos Rogério Tótola⁽⁶⁾, Sergio de Oliveira Procópio⁽²⁾, Antonio Alberto da Silva⁽³⁾, Carlos Shigeaky Weky Silva⁽⁷⁾

RESUMO

A ação da microbiota rizosférica, acelerando a degradação de compostos no solo, é conhecida como fitoestimulação e constitui-se em um dos principais mecanismos de fitorremediação de herbicidas no solo. Plantas tolerantes ao tebuthiuron, que sejam capazes de estimular sua microbiota rizosférica, podem ser de grande interesse na fitorremediação desse herbicida. O objetivo deste trabalho foi avaliar a atividade rizosférica de quatro espécies vegetais com potencial para fitorremediação de tebuthiuron e inferir a contribuição radicular no processo de descontaminação desse herbicida. Foi analisado o solo rizosférico de feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*), milheto (*Pennisetum glaucum*), mucuna-anã (*Estizolobium deeringianum*) e mucuna-preta (*Estizolobium aterrimum*) e de uma testemunha (sem planta), com e sem a presença do tebuthiuron, na dose de 0,73 $\mu\text{g g}^{-1}$. A taxa de evolução de CO_2 foi quantificada aos 1, 2, 3 e 10 dias da aplicação dos tratamentos (DAT). Os tratamentos com herbicida foram submetidos à contaminação com 40 $\mu\text{g g}^{-1}$ de tebuthiuron. Após a aplicação, mediu-se a taxa de evolução de CO_2 aos 1 e 50 DAT, empregando-se respirômetro de fluxo contínuo. A espécie feijão-de-porco apresentou sempre a maior taxa de evolução de CO_2 em relação às demais espécies e à testemunha, seguido de mucuna-preta na dose comercial. Sob concentrações maiores que a dose comercial, os valores médios de taxa de evolução de CO_2 foram maiores no

⁽¹⁾ Parte da Tese de Doutorado do Primeiro autor. Recebido para publicação em janeiro de 2004 e aprovado em maio de 2005.

⁽²⁾ Professor do Departamento de Agronomia, Universidade de Rio Verde – FESURV. Faz. Fontes do Saber, Departamento de Agronomia. Caixa Postal 104, CEP 75901-970 Rio Verde (GO). E-mail: frpires@fesurv.br

⁽³⁾ Professor do Departamento de Fitotecnia, Universidade Federal de Viçosa – UFV. Av. PH Rolfs s/n, CEP 36571-000 Viçosa (MG). E-mail: cmsouza@ufv.br; aasilva@ufv.br

⁽⁴⁾ Professor do Departamento de Informática, UFV. E-mail: cecon@dpi.ufv.br

⁽⁵⁾ Doutorando do Departamento de Fitotecnia, UFV. E-mail: jbarbosasantos@yahoo.com.br

⁽⁶⁾ Professor do Departamento de Microbiologia da UFV. E-mail: totola@ufv.br

⁽⁷⁾ Mestrando do Departamento de Fitotecnia, UFV. E-mail: carlosshigeaky@yahoo.com.br

solo rizosférico de feijão-de-porco, seguido por mucuna-preta e mucuna-anã. Feijão-de-porco foi a espécie com melhor desempenho nas avaliações realizadas; excetuando-se esta espécie, a contribuição rizosférica na fitorremediação de tebuthiuron em níveis acima da dose comercial não foi relevante.

Temas de indexação: respiração do solo, adubos verdes, biorremediação, despoluição.

SUMMARY: RHIZOSPHERIC ACTIVITY OF POTENTIALLY PHYTOREMEDIATIVE SPECIES FOR TEBUTHIURON-CONTAMINATED SOIL

*The rhizospheric microbial action, accelerating the degradation of compounds in the soil, is known as phytostimulation. It represents one of the main phytoremediation mechanisms in herbicide-contaminated soil. Tebuthiuron-tolerant plants, which are able to stimulate their rhizospheric microorganisms, could be highly interesting for the phytoremediation of this herbicide. This study aimed at evaluating the rhizospheric activity of four plant species with phytoremediation potential for tebuthiuron and to infer on the contribution of the roots to the process of decontamination of this herbicide. The rhizospheric soil of jackbean (*Canavalia ensiformis*), pearl millet (*Pennisetum glaucum*), Georgia velvet bean (*Stizolobium deeringianum*), and black velvet bean (*Stizolobium aterrimum*), plus a control treatment (without plant) were analyzed without and with tebuthiuron at 0.73 ig g⁻¹. The CO₂ evolution rate was quantified 1, 2, 3 and 10 days after the treatment application. The herbicide treatments were submitted to contamination with 40 ig g⁻¹ tebuthiuron. After the application, the CO₂ evolution rate was measured 1 and 50 days after the treatment applications, using a continuous flow respirometer. Compared to the other species and the control treatment, *C. ensiformis* presented the highest CO₂ evolution rate throughout the experimental phase, followed by *S. aterrimum* at the commercial herbicide dose. Under higher herbicide concentrations, mean CO₂ evolution rate values were higher in rhizospheric soil of *C. ensiformis*, followed by that from *S. aterrimum* and *S. deeringianum*. *C. ensiformis* presented the best performance, and except for this plant species, the rhizospheric contribution to the tebuthiuron phytoremediation at levels above the commercial dose was not relevant.*

Index terms: soil respiration, green manures, bioremediation, reclamation.

INTRODUÇÃO

Atualmente, existe crescente interesse em técnicas biológicas para a despoluição de solos e águas contaminadas (Accioly & Siqueira, 2000), particularmente no uso de plantas (Shimp et al., 1993), chamada de fitorremediação. Esta técnica consiste no uso de plantas e sua comunidade microbiana associada para degradar, seqüestrar ou imobilizar poluentes presentes no solo (Siliciano & Germida, 1999). Tal técnica apresenta grande atrativo, graças à possibilidade de promover a descontaminação do local *in situ*, bem como ao baixo custo, quando comparada à remoção do solo para seu tratamento (Susarla et al., 2002).

Sabe-se que as plantas podem remediar contaminantes orgânicos por: absorção radicular direta do contaminante e subsequente acúmulo de metabólitos não-fitotóxicos ou degradação do composto nos tecidos das plantas (fitodegradação); absorção foliar direta de contaminantes voláteis do

ar circundante (fitovolatilização); e liberação de exsudatos e enzimas que incrementam as transformações bioquímicas e, ou, a mineralização em virtude da atividade microbiana e de fungos micorrízicos na rizosfera (fitoestimulação) (Cunningham et al., 1996; Wilson, et al., 2000).

O principal mecanismo atuante na fitorremediação de agrotóxicos orgânicos não clorados e herbicidas é a fitoestimulação ou rizodegradação e, em menor escala, a fitodegradação. A fitorremediação por meio desse mecanismo tem despertado interesse, em razão das elevadas taxas de remediação obtidas com a utilização de plantas que, comprovadamente, aumentam a degradação microbiana de compostos orgânicos danosos no solo (Anderson et al., 1993), e das diferenças significativas observadas, quando são comparados solos vegetados e não vegetados (Siliciano & Germida, 1999; Arthur et al., 2000).

A degradação de atrazine, metolachlor e trifluralin foi significativamente maior em solos rizosféricos de *Kochia scoparia* que em solos não vegetados

(Anderson et al., 1994). Resultados semelhantes foram obtidos por Perkovich et al. (1996), os quais observaram que a mineralização de ^{14}C -atrazine em uma mistura de atrazine e metolachlor foi maior em solos rizosféricos de *K. scoparia* que em solos sem a presença de plantas.

Em experimento realizado com o objetivo de avaliar o efeito de solos rizosféricos de 15 espécies de plantas sobre a mineralização de ^{14}C -atrazine e ^{14}C -metolachlor, Anderson & Coats (1995) constataram que *K. scoparia* apresentou a maior mineralização de ^{14}C -atrazine (62,1 % do aplicado) dentre as espécies testadas, seguida por *Carduus nutans* (33,1 %) e *Nepeta cataria* (24,1 %). Para a mineralização do metolachlor, nenhuma das amostras de solo rizosférico exibiu resposta positiva.

Em estudo para seleção de espécies capazes de descontaminar solos de quatro locais contaminados com agroquímicos, em Iowa, EUA, Kruger et al. (1997) observaram que ocorreu rápida mineralização em três dos oito solos testados, com maior quantidade ocorrendo em solo rizosférico (35 % da atrazine aplicada após nove semanas). As plantas causaram impacto positivo na dissipação de atrazine no solo, sendo significativamente menor a quantidade de atrazine extraível de solos vegetados com *K. scoparia* do que de solos sem vegetação.

Apesar da dificuldade de identificar espécies que reúnem, além da capacidade fitorremediadora, características desejáveis do ponto de vista agrônomo, como fácil propagação e também fácil controle ou erradicação da área, um dado importante e animador, evidenciado por Arthur et al. (2000), que comprova a possibilidade de utilização da fitorremediação, é o fato de que, nos solos rizosféricos de *K. scoparia*, a meia-vida da atrazine foi de 50 dias e, nos solos não vegetados, de 193 dias. Esses resultados demonstram claramente o potencial da utilização de plantas como fitorremediadoras de agrotóxicos.

Normalmente, o efeito rizosférico da interface solo-raiz - que se deve à exsudação de nutrientes da planta, tais como aminoácidos e polissacarídeos - resulta na proliferação da comunidade microbiana nessa região (Hsu & Barth, 1979; Arthur et al., 2000). O número de microrganismos nos solos rizosféricos é normalmente de 5 a 10 vezes maior que naqueles não-rizosféricos, mas pode chegar a mais de 100 (Anderson et al., 1993). Por essa razão, a rizosfera pode ser um ótimo sítio de degradação de compostos orgânicos indesejáveis, graças à comunidade microbiana associada (fungos, bactérias e actinomicetos), que pode, em alguns casos, utilizar os contaminantes como fonte de carbono primário e nutrientes. Embora os agrotóxicos possam ter efeito negativo na população microbiana, estudos mostram que bactérias podem resistir, e até mesmo proliferar, na presença de agrotóxicos em elevadas

concentrações, maiores que as taxas aplicadas no campo (Martesson, 1992). Para esse tipo de estudo, a taxa de evolução de CO_2 do solo tem sido utilizada como índice da atividade, assim como o tamanho da biomassa microbiana do solo e, ainda, o metabolismo do carbono lábil do solo (Souza et al., 1999).

Para a fitorremediação de herbicidas, torna-se fundamental a identificação de espécies de plantas que estimulem a atividade e o crescimento microbiano na rizosfera, resultando no aumento das taxas de degradação do composto do solo, principalmente se este apresenta persistência elevada, como o tebuthiuron (Bovey et al., 1982).

Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar a atividade rizosférica de quatro espécies vegetais com potencial para fitorremediação de tebuthiuron e inferir a contribuição radicular no processo de descontaminação desse herbicida.

MATERIAL E MÉTODOS

A respiração microbiana foi usada para inferir a atividade microbiana rizosférica de diferentes espécies com potencial para fitorremediação.

O experimento foi composto por um fatorial $5 \times 2 \times 4$ (quatro espécies + uma testemunha não-rizosférica; duas doses do herbicida tebuthiuron, e quatro épocas de avaliação), no delineamento inteiramente ao acaso, com quatro repetições. Foram semeadas e cultivadas em vasos (sem a presença de herbicida) quatro espécies pré-selecionadas, de acordo com a tolerância e do potencial apresentado para fitorremediação de tebuthiuron.

Utilizou-se um Argissolo Vermelho-Amarelo, coletado na profundidade de 0-20 cm, no município de Viçosa (MG), cujos atributos químicos (Embrapa, 1997), nessa camada, foram: pH (H_2O) = 5,6; P = 10,6 mg dm^{-3} ; K = 60 mg dm^{-3} ; Al^{3+} = 0,0 cmol_c dm^{-3} ; Ca^{2+} = 2,6 cmol_c dm^{-3} ; Mg^{2+} = 0,6 cmol_c dm^{-3} ; H + Al = 2,64 cmol_c dm^{-3} ; CTC total = 5,99 cmol_c dm^{-3} ; V = 56 %; m = 0,0 %; MO = 2,39 dag kg^{-1} . A análise granulométrica determinou 47 dag kg^{-1} de argila; 8 dag kg^{-1} de silte; 14 dag kg^{-1} de areia fina; e 31 dag kg^{-1} de areia grossa, cuja classificação textural foi argilo-arenosa.

As espécies avaliadas foram: feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*), milheto (*Pennisetum glaucum*), mucuna-anã (*Estizolobium deeringianum*) e mucuna-preta (*Estizolobium aterrimum*). Quarenta e cinco dias após a semeadura, procedeu-se à coleta de solo rizosférico das quatro espécies e de uma testemunha (vaso sem planta). Após a secção e eliminação da parte aérea das plantas, retirou-se o sistema radicular dos vasos cuidadosamente, agitando-o brevemente para eliminar o solo não-rizosférico. Considerou-se como rizosférico o solo

fortemente aderido à raiz (1 mm), o qual foi coletado das raízes por meio de agitação e remoção manual. Imediatamente após a coleta, o solo foi armazenado em câmara fria, a 4 °C. Decorridos 15 dias, amostras de 80 g de solo foram acondicionadas em frascos de vidro de 0,5 L de capacidade, com tampa hermética. As amostras receberam os tratamentos (solo rizosférico proveniente de cada espécie foi avaliado com e sem a presença de herbicida), corrigindo-se a umidade para 60 % da capacidade de retenção de água. Os tratamentos com o herbicida receberam a aplicação de tebuthiuron na dose de 0,73 µg g⁻¹, equivalente à dose média recomendada (1,0 kg ha⁻¹). Os frascos foram conectados ao respirômetro e mantidos em temperatura ambiente de 24 °C durante o período das leituras.

A taxa de evolução de CO₂ foi quantificada aos 1, 2, 3 e 10 dias da aplicação dos tratamentos (DAT). As análises foram realizadas pelo respirômetro de fluxo contínuo CA 2A-UI2 (Sable System, USA), no Laboratório de Biotecnologia e Biodiversidade para o Meio Ambiente da Universidade Federal de Viçosa.

Após as medições, os tratamentos com herbicida receberam a aplicação de 40 µg g⁻¹ de tebuthiuron, simulando uma contaminação 55 vezes superior à dose comercial (Anderson & Coats, 1995). Após a aplicação, mediu-se a taxa de evolução de CO₂ aos 1 e 50 dias da aplicação dos tratamentos (DAT), empregando-se o mesmo equipamento descrito anteriormente. Durante o período de 50 dias, as amostras foram mantidas em condição ambiente, a 60 % da capacidade máxima de retenção de água, com temperaturas entre 22 e 24 °C e umidade relativa entre 60 e 70 %.

Os dados foram submetidos à análise de variância e regressão. As médias do fator qualitativo foram comparadas por meio do teste de Tukey, a 5 % de probabilidade de erro. Para o fator quantitativo, os modelos foram escolhidos com base no coeficiente de determinação e no fenômeno biológico. Independentemente de a interação ser ou não significativa, optou-se pelo seu desdobramento.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Analisando a figura 1, verificou-se o efeito significativo das épocas após a aplicação de tebuthiuron sobre a taxa de evolução de CO₂ do solo rizosférico proveniente de feijão-de-porco, mucuna-anã, milho e mucuna-preta e da testemunha não-rizosférica (Quadro 1). Para todos os tratamentos, a taxa de evolução de CO₂ diminuiu de forma exponencial com o tempo de avaliação; a intensidade da queda foi semelhante para as espécies testadas.

Contrariamente, no trabalho desenvolvido por Perkovich et al. (1996), a mineralização de atrazine

no solo rizosférico de *K. scoparia* teve início após seis dias, e o solo não vegetado, após 12 dias de incubação, assemelhando-se aos dados de Souza (1994), segundo o qual, quando um herbicida é aplicado no solo, há um período de enriquecimento do meio com uma fonte de carbono. Na fase inicial, dependendo dos diferentes herbicidas, há uma pequena taxa de degradação. Esta fase parece corresponder a um período de adaptação dos microrganismos, que produzem as enzimas essenciais para degradar o novo substrato. Em seguida, a população microbiana aumenta, acelerando o processo de decomposição dos substratos.

Essas informações indicam que as elevadas taxas encontradas nos tratamentos nas primeiras

Quadro 1. Equações de regressão e coeficiente de determinação para os valores médios de taxa de evolução de CO₂ em solo rizosférico de quatro espécies mais uma testemunha não-rizosférica, em quatro épocas de avaliação (E)

Espécie	Equação ajustada	R ²
Testemunha	$\hat{Y} = 15,8056 \exp^{(-0,3411 \cdot E)}$	0,96
Feijão-de-porco	$\hat{Y} = 27,7953 \exp^{(-0,2766 \cdot E)}$	0,98
Mucuna anã	$\hat{Y} = 14,3908 \exp^{(-0,2484 \cdot E)}$	0,92
Milheto	$\hat{Y} = 13,4825 \exp^{(-0,2232 \cdot E)}$	0,96
Mucuna preta	$\hat{Y} = 17,7190 \exp^{(-0,2755 \cdot E)}$	0,97

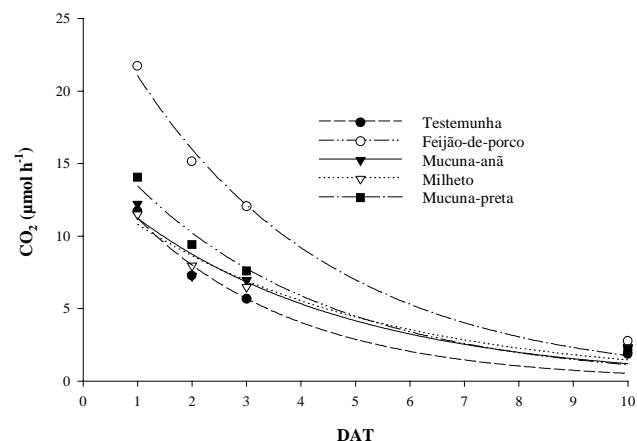


Figura 1. Valores médios de taxa de evolução de CO₂ em solo rizosférico de feijão-de-porco, mucuna-anã, milho e mucuna-preta, em relação à testemunha de solo não-rizosférico, aos 1, 2, 3 e 10 dias da aplicação (DAT) de 0,73 µg g⁻¹ de tebuthiuron.

avaliações podem ser devidas à decomposição da matéria orgânica do solo e não à degradação do tebutiuron. No entanto, como o solo utilizado e as condições de umidade foram as mesmas, depreende-se que a comunidade microbiana associada às raízes de feijão-de-porco foi a maior ou a mais ativa dentre os tratamentos. Por outro lado, as raízes do feijão-de-porco, talvez, possam liberar mais compostos, o que aumentaria a matéria orgânica na rizosfera e, conseqüentemente, também a liberação de C-CO₂, não exercendo, dessa forma, efeito fitorremediador.

Observa-se que, até três DAT, o solo rizosférico de feijão-de-porco apresentou sempre a maior taxa de evolução de CO₂ em relação às demais espécies e à testemunha, seguido da mucuna-preta (Quadro 2). Aos 10 DAT, as diferentes espécies não mais diferiram quanto à taxa de CO₂ evoluído, porém se manteve a tendência de maior evolução de CO₂ no solo rizosférico de feijão-de-porco. Este resultado revela maior atividade rizosférica nesta espécie, corroborando sua indicação para a fitorremediação de tebutiuron.

Analisando ainda o quadro 2, verificou-se que milheto e mucuna-anã não diferiram da testemunha não-rizosférica aos 1, 2 e 10 DAT, apresentando diferença apenas no terceiro dia de avaliação. É possível que isso se deva à ausência de espécies microbianas, associadas às espécies do solo não-rizosférico, capazes de degradar essa molécula (Prata et al., 2000). Esse resultado indica que a contribuição rizosférica destas duas espécies na detoxificação do tebutiuron talvez não seja o mecanismo principal, sugerindo que outros, como a fitodegradação, devem estar associados à tolerância que essas espécies exibiram ao tebutiuron em ensaios anteriores. Resultados semelhantes foram obtidos por Alvey & Crowley (1996), que não encontraram diferenças entre a mineralização de atrazine em solos plantados com milho (usado como planta fitorremediadora) e a verificada naqueles sem planta, indicada pela evolução de ¹⁴CO₂, apesar do aumento evidenciado na

população de bactérias mineralizadoras de atrazine, ao final do período de incubação, nos solos que receberam plantas.

Verificou-se que o solo rizosférico de feijão-de-porco apresentou maior taxa de evolução de CO₂, tanto na dose zero (sem herbicida) quanto na presença do tebutiuron (dose 0,73 µg g⁻¹) (Quadro 3). A mucuna-preta foi superior à mucuna-anã, ao milheto e à testemunha, que não diferiram entre si. Comparando a respiração nos tratamentos de acordo com as doses, apenas feijão-de-porco e mucuna-anã diferiram na presença e na ausência do herbicida; o primeiro teve maior evolução de CO₂ no solo com herbicida, e o segundo, no solo sem herbicida. Há possibilidade de que a microbiota associada às raízes do feijão-de-porco possa, além de tolerar o tebutiuron, utilizá-lo como substrato para seu metabolismo, como ocorre com a espécie *K. scoparia*, fitorremediadora de atrazine (Anderson & Coats, 1995; Perkovich et al., 1995). No solo rizosférico de mucuna-anã, ocorreu queda na evolução de CO₂, que pode ser explicada pelo provável efeito tóxico do tebutiuron sobre a microbiota, reduzindo a respiração basal.

Quando os tratamentos foram submetidos à elevada contaminação com a aplicação de tebutiuron, em uma concentração 55 vezes superior à dose comercial, feijão-de-porco, mucuna-preta e mucuna-anã tiveram os maiores valores de taxa de evolução de CO₂, sendo superiores à da testemunha, o que não ocorreu com o milheto (Quadro 4). Na ausência do herbicida (dose zero), as amostras de solo rizosférico de feijão-de-porco apresentaram novamente menor respiração.

Analisando a respiração no solo de acordo com as doses (Quadro 4), dentro de cada espécie, notou-se que a testemunha não-rizosférica e a mucuna-preta foram significativamente superiores na presença do herbicida, quando comparadas às do solo sem herbicida. Os demais tratamentos, em valores

Quadro 2. Valores médios de taxa de evolução de CO₂ em solo rizosférico de quatro espécies e uma testemunha não-rizosférica, em quatro épocas de avaliação

Espécie	DAT (dias)			
	1	2	3	10
Testemunha	11,72 ⁽¹⁾ C	7,24 C	5,66 D	1,84 A
Feijão-de-porco	21,70 A	15,12 A	12,04 A	2,75 A
Mucuna-anã	12,22 C	7,24 C	6,95 BC	2,27 A
Milheto	11,47 C	7,96 C	6,48 CD	2,33 A
Mucuna-preta	14,06 B	9,42 B	7,59 B	2,17 A

⁽¹⁾ µmol h⁻¹. * Médias seguidas por uma mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5 %.

Quadro 3. Valores médios de taxa de evolução de CO₂ em solo rizosférico de quatro espécies e uma testemunha não-rizosférica, com e sem aplicação de tebutiuron

Espécie	Dose (µg g ⁻¹)	
	0,0	0,73
Testemunha	6,82 ⁽¹⁾ aC	6,41 aC
Feijão-de-porco	12,66 bA	13,15 aA
Mucuna-anã	7,43 aC	6,91 bC
Milheto	7,24 aC	6,88 aC
Mucuna-preta	8,41 aB	8,21 aB

⁽¹⁾ µmol h⁻¹. * Médias seguidas de uma mesma letra maiúscula, na coluna, e minúscula, na linha, não diferem pelo teste de Tukey a 5 %.

Quadro 4. Valores médios de taxa de evolução de CO₂ em solo rizosférico de quatro espécies e uma testemunha não-rizosférica, com e sem aplicação de tebuthiuron, 55 dias após a aplicação dos tratamentos

Espécie	Dose (µg g ⁻¹)	
	0	40,0
Testemunha	1,72 ⁽¹⁾ bC	2,23 aC
Feijão-de-porco	2,64 aA	2,82 aA
Mucuna-anã	2,37 aAB	2,38 aB
Milheto	2,09 aB	2,15 aC
Mucuna-preta	2,23 bB	2,60 aAB

⁽¹⁾ µmol h⁻¹. *Médias seguidas de uma mesma letra maiúscula, na coluna, e minúscula, na linha, não diferem pelo teste de Tukey a 5 %.

absolutos, demonstraram a mesma tendência. Isso pode representar, como observado com a aplicação da dose comercial, uma adaptação da microbiota nativa do solo ao tebuthiuron, utilizando-o como substrato (Souza, 1994).

Comparando a respiração no período de 1 a 50 dias após a reaplicação no solo, verificou-se que em todas as espécies a taxa de evolução de CO₂ teve redução significativa, da primeira para a última avaliação (Quadro 5). Isso pode ter ocorrido em razão do esgotamento das fontes nutricionais e da morte das células microbianas, estando de acordo com as observações de Anhalt et al. (2000) e Arthur et al. (2000).

Além disso, esse decréscimo evidencia que a ausência prolongada de uma planta viva sobre o solo tenha resultado em influência negativa na atividade microbiana, o que concorda com os resultados encontrados por Perkovich et al. (1996). Por outro lado, a progressiva redução que se observa na respiração do solo com o tempo de aplicação pode indicar que o tebuthiuron não degradado possa estar sorvido aos colóides ou argilominerais e, principalmente, orgânicos do solo (Meyer & Bovey, 1988), reduzindo a sua concentração na solução do solo em níveis que não induziriam os microrganismos a produzir as enzimas necessárias à sua degradação (Madsen, 1991).

Comparando a média dos tratamentos com e sem tebuthiuron, observou-se significativa redução da taxa de evolução de CO₂ da primeira medição para aquela realizada 50 dias após a reaplicação (Quadro 6). No entanto, não houve diferença significativa entre as duas doses testadas. Essa não-diferenciação entre a média dos tratamentos com e sem herbicida indica que, com exceção do feijão-de-porco, a tolerância das espécies testadas parece não estar relacionada com a degradação microbiana do tebuthiuron. Corroborando esta informação, o principal processo de degradação da molécula de tebuthiuron no solo é químico e, secundariamente, microbiano, de acordo com Rodrigues & Almeida (1998).

Quadro 5. Valores médios de taxa de evolução de CO₂ em solo rizosférico de quatro espécies e uma testemunha não-rizosférica, tratado com tebuthiuron na dose de 40 µg g⁻¹, em duas épocas após a aplicação dos tratamentos (DAT)

Espécie	DAT (dias)	
	1	50
Testemunha	2,28 ⁽¹⁾ aC	1,67 bB
Feijão-de-porco	3,33 aA	2,13 bA
Mucuna-anã	2,84 aAB	1,91 bAB
Milheto	2,41 aC	1,83 bB
Mucuna-preta	3,03 aAB	1,80 bB

⁽¹⁾ µmol h⁻¹. *Médias seguidas de uma mesma letra maiúscula, na coluna, e minúscula, na linha, não diferem pelo teste de Tukey a 5 %.

Quadro 6. Valores médios de taxa de evolução de CO₂ em solo rizosférico de quatro espécies e uma testemunha não-rizosférica, com e sem aplicação de tebuthiuron na dose de 40 µg g⁻¹, em duas épocas após a aplicação dos tratamentos (DAT)

Dose (µg g ⁻¹)	DAT (dias)	
	1	50
0	2,58 ⁽¹⁾ aB	1,85 bA
40	2,98 aA	1,89 bA

⁽¹⁾ µmol h⁻¹. *Médias seguidas de uma mesma letra maiúscula, na coluna, e minúscula, na linha, não diferem pelo teste de Tukey a 5 %.

Todavia, em alguns trabalhos, foram identificados microrganismos responsáveis pela degradação de herbicidas do mesmo grupo químico do tebuthiuron (Hill et al., 1955). Murray et al. (1969) observaram que *Aspergilli niger* foi mais efetivo, dentre três fungos avaliados, na degradação de cinco herbicidas derivados da uréia (monuron, diuron, norea, fenuron e fluometuron), cujos resultados foram comprovados por meio de bioensaio realizado com aveia. Tweedy et al. (1970) constataram que *Talaromyces wortmanii* foi capaz de degradar 37 % do herbicida metobromuron 18 dias após a incubação, e *Fusarium oxysporum*, 11 %. Esses resultados indicam a possibilidade de que ocorra também a degradação microbiológica do herbicida tebuthiuron.

CONCLUSÃO

A maior evolução de CO₂ no solo rizosférico tratado com tebuthiuron ocorreu no cultivado com

feijão-de-porco, sendo, portanto, esta espécie mais promissora para a fitorremediação de tebuthiuron.

AGRADECIMENTO

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa durante o curso de Doutorado.

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., eds. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1. p.299-352.
- ALVEY, S. & CROWLEY, D.E. Survival and activity of an atrazine-mineralizing bacterial consortium in rhizosphere soil. *Environ. Sci. Technol.*, 27:1596-1603, 1996.
- 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, B*, 30:473-484, 1995.
- ANDERSON, T.A.; GUTHRIE, E.A. & WALTON, B.T. Bioremediation in the rhizosphere: plant roots and associated microbes clean contaminated soil. *Environ. Sci. Technol.*, 27:2630-2636, 1993.
- ANDERSON, T.A.; KRUGER, E.L. & COATS, J.R. Enhanced degradation of a mixture of three herbicides in the rhizosphere of a herbicide-tolerant plant. *Chemosphere*, 28:1551-1557, 1994.
- ANHALT, J.C.; ARTHUR, E.L.; ANDERSON, T.A. & COATS, J.R. Degradation of atrazine, metolachlor, and pendimethalin in pesticide-contaminated soils: effects of aged residues on soil respiration and plant survival. *J. Environ. Sci. Health, B*, 35:417-438, 2000.
- ARTHUR, E.L.; PERKOVICH, B.S.; ANDERSON, T.A. & COATS, J.R. Degradation of an atrazine and metolachlor herbicide mixture in pesticide-contaminated soils from two agrochemical dealerships in Iowa. *Water, Air, Soil Poll.*, 119:75-90, 2000.
- BOVEY, R.W.; MEYER, R.E. & HEIN Jr., H. Soil persistence of tebuthiuron in the Clypan resource area of Texas. *Weed Sci.*, 30:140-144, 1982.
- CUNNINGHAM, S.D.; ANDERSON, T.A. & SCHWAB, A.P. Phytoremediation of soils contaminated with organic pollutants. *Adv. Agron.*, 56:55-114, 1996.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUARIA - EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. 2 ed. Rio de Janeiro, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212p.
- HILL, G.D.; MCGAHEN, J.W.; BAKER, H.M.; FINNERTY, D.W. & BINGEMAN, C.W. The fate of substitute urea herbicides in agricultural soils. *Agron. J.*, 47:93-104, 1955.
- HSU, T.S. & BARTHA, R. Accelerated mineralization of two organophosphate insecticides in the rhizosphere. *Appl. Environ. Microbiol.*, 37:36-41, 1979.
- KRUGER, E.L.; ANHALT, J.C.; SORENSON, D.; NELSON, B.; CHOUHY, A.L.; ANDERSON, T.A. & COATS, J.R. Atrazine degradation in pesticide-contaminated soils: phytoremediation potential. In: *Phytoremediation of soil and water contaminants*. Washington, American Chemical Society, 1997. p.54-64.
- MADSEN, E.L. Determining *in situ* biodegradation: facts and challenges. *Environ. Sci. Technol.*, 25:1663-1673, 1991.
- MARTENSSON, A.M. Effects of agrochemicals and heavy metals on fast-growing rhizobia and their symbiosis with small-seeded legumes. *Soil Biol. Biochem.*, 24:435-445, 1992.
- MEYER, R.E. & BOVEY, R.W. Tebuthiuron formulation and placement effects on response of woody plants and soil residue. *Weed Sci.*, 36:373-378, 1988.
- MURRAY, D.S.; RIECK, W.L. & LILND, J.Q. Microbial degradation of five substituted urea herbicides. *Weed Sci.*, 17:52-55, 1969.
- PERKOVICH, B.S.; ANDERSON, T.A.; KRUGER, E.L. & COATS, J.R. Enhanced mineralization of [¹⁴C] atrazine in *Kochia scoparia* rhizospheric soil from a pesticide-contaminated site. *Pestic. Sci.*, 46:391-396, 1996.
- PRATA, F.; LAVORENTI, A.; REGINATO, J.B. & TORNISIELO, V.L. Degradação e adsorção de diuron em solos tratados com vinhaça. *R. Bras. Ci. Solo*, 24:217-223, 2000.
- RODRIGUES, B.N. & ALMEIDA, F.S. Guia de herbicidas. 4.ed. Londrina, 1998. 648p.
- SHIMP, J.F.; TRACY, J.C.; DAVIS, L.C.; LEE, E.; HUANG, W.; ERICKSON, L.E. & SHNOOR, J.L. Beneficial effects of plants in the remediation of soil and groundwater contaminated with organic materials. *C. R. Environ. Sci. Technol.*, 23:41-77, 1993.
- SILICIANO, S.D. & GERMIDA, J.J. Enhanced phyoremediation of chlorobenzoates in rhizosphere soil. *Soil Biol. Biochem.*, 31:299-305, 1999.
- SOUZA, A.P. Atividade de oxyfluorfen, 2,4-D e glifosate, em solos de diferentes texturas na presença e na ausência de composto orgânico. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1994. 71p. (Tese de Mestrado)
- SOUZA, A.P.; FERREIRA, F.A.; SILVA, A.A.; CARDOSO, A.A. & RUIZ, H.A. Respiração microbiana do solo sob doses de glyphosate e de imazapyr. *Planta Daninha*, 17:387-398, 1999.
- SUSARLA, S.; MEDINA, V.F. & McCUTCHEON, S.C. Phytoremediation: an ecological solution to organic chemical contamination. *Ecol. Engin.*, 18:647-658, 2002.

TWEEDY, B.G.; LOE PPKI, C. & ROSS, J.A. Metabolism of 3-(p-Bromophenyl)-1-methoxy-1-methylurea (Metabromuron) by selected soil microorganisms. J. Agric. Food Chem., 18:851-853, 1970.

WILSON, P.C.; WHITWELL, T. & KLAINÉ, S.J. Metalaxyl and simazine toxicity to and uptake by *Typha latifolia*. Arch. Environ. Contam. Toxicol., 39:282-288, 2000.