

# POTENCIAL DE LIXIVIAÇÃO DE HERBICIDAS UTILIZADOS NA CULTURA DO ALGODÃO EM COLUNAS DE SOLO<sup>1</sup>

*Leaching Potential of Herbicides Used in Cotton Crop under Soil Column Conditions*

INOUE, M.H.<sup>2</sup>, SANTANA, D.C.<sup>3</sup>, OLIVEIRA JR., R.S.<sup>4</sup>, CLEMENTE, R.A.<sup>2</sup>, DALLACORT, R.<sup>2</sup>, POSSAMAI, A.C.S.<sup>2</sup>, SANTANA, C.T.C.<sup>3</sup> e PEREIRA, K.M.<sup>2</sup>

**RESUMO** - O intenso uso de herbicidas implica a necessidade de determinar o potencial dessas substâncias em contaminar fontes aquáticas subsuperficiais. Diante dessa preocupação, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito de diferentes lâminas de água sobre o potencial de lixiviação de quatro herbicidas utilizados em pré-emergência na cultura do algodão, em dois solos provenientes de Campo Novo do Parecis-MT (RQ - textura arenosa) e Tangará da Serra-MT (LV - textura argilosa). No desenvolvimento deste trabalho utilizou-se a técnica de bioensaio em colunas de solo, nas quais foram simuladas irrigações de 0, 20, 40, 60, 80 e 100 mm, após a aplicação de alachlor (RQ 2,40; LV 3,36 kg ha<sup>-1</sup>), oxyfluorfen (RQ 0,48; LV 0,72 kg ha<sup>-1</sup>), prometryne (RQ 0,75; LV 1,50 kg ha<sup>-1</sup>) e S-metolachlor (RQ 1,20; LV 1,44 kg ha<sup>-1</sup>). Nas amostras de solo com textura arenosa (RQ), evidenciou-se que lâminas de 80 e 100 mm de água proporcionaram lixiviação até a profundidade de 10-15 cm do alachlor e até 15-20 cm do S-metolachlor. Independentemente da lâmina de água aplicada, nas amostras de RQ oxyfluorfen não ultrapassou a camada de 5-10 cm, e o prometryne movimentou-se até a camada de 10-15 cm somente na lâmina de 100 mm de água. Nas amostras de solo com textura argilosa (LV), o oxyfluorfen não se movimentou além da camada superficial, mesmo sob as maiores lâminas de irrigação, e o prometryne atingiu 5-10 cm de profundidade sob lâminas de 80 e 100 mm. Os herbicidas alachlor e S-metolachlor atingiram 10-15 cm de profundidade sob lâminas de 80 e 100 mm no LV. Evidenciou-se uma maior movimentação efetiva das moléculas de herbicidas nas amostras de solo com textura arenosa (RQ), em relação às amostras de solo com textura argilosa (LV).

**Palavras-chave:** águas subterrâneas, bioindicador, contaminação, impacto ambiental, textura.

**ABSTRACT** - *Herbicide use intensification implies in the need to determine the potential of these substances to reach groundwater. Thus, this study aimed to evaluate the influence of different irrigation depths on the leaching potential of four herbicides commonly used in preemergence cotton weed control, in samples of two soils from Campo Novo do Parecis-MT (RQ-sandy texture) and Tangará da Serra-MT (LV-clay texture). Thus, a bioassay technique in soil columns was adopted, in which water depths of 0, 20, 40, 60, 80 and 100 mm were simulated after application of alachlor (RQ 2.40; LV 3.36 kg ha<sup>-1</sup>), oxyfluorfen (RQ 0.48; LV 0.72 kg ha<sup>-1</sup>), prometryne (RQ 0.75; LV 1.50 kg ha<sup>-1</sup>) and S-metolachlor (RQ 1.20; LV 1.44 kg ha<sup>-1</sup>). For soil samples with sandy texture (RQ), water depths of 80 and 100 mm led to leaching down to layers of 10-15 cm for alachlor and 15-20 cm for S-metolachlor. Regardless of the irrigation depth applied in the RQ samples, oxyfluorfen did not exceed the depth of 5-10 cm and prometryne could be detected at the depth of 10-15 cm only at water depth of 100 mm. In columns filled with clay soil (LV), oxyfluorfen did not move beneath the surface layer, even under the highest water depths and prometryne reached the depth of 5-10 cm under 80 and 100 mm. The herbicides alachlor and S-metolachlor reached 10-15 cm depth under water depths of 80 and 100 mm in the LV. A more intense downward movement of the herbicide molecules was found in sandy soil samples (RQ) than in clay texture soil samples (LV).*

**Keywords:** groundwater, bio-indicator, contamination, environmental impact, texture.

<sup>1</sup> Recebido para publicação em 15.12.2009 e na forma revisada em 12.11.2010.

<sup>2</sup> Dep. de Agronomia, Universidade do Estado de Mato Grosso – UFMT, Tangará da Serra-MT, Brasil. Rodovia MT 358, Km 07, Caixa Postal 287, 78300-000 Tangará da Serra-MT, <miriamhinoue@hotmail.com>; <sup>3</sup> Pós-Graduação em Agricultura, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UESP, Botucatu-SP; <sup>4</sup> Dep. de Agronomia, Universidade Estadual de Maringá, Maringá-PR.



## INTRODUÇÃO

O algodoeiro é uma planta pouco competitiva que sofre elevada interferência das plantas daninhas, as quais concorrem por água, luz, nutrientes, espaço físico e  $\text{CO}_2$ . Essa cultura apresenta baixa habilidade competitiva, principalmente no crescimento inicial, que é lento, com metabolismo fotossintético  $\text{C}_3$  e raízes superficiais, fatores esses que contribuem para que a planta se torne mais vulnerável à competição e aos danos causados por cultivos mecânicos (Benedict, 1984). O nível de interferência imposto pelas plantas daninhas é um dos fatores que podem afetar essa cultura, fazendo com que ela não consiga expressar todo o seu potencial produtivo, sendo indispensável o manejo delas, principalmente, no início de seu desenvolvimento.

O cultivo do algodoeiro concentra-se, atualmente, em Mato Grosso e no oeste da Bahia. Os solos dessas regiões apresentam ampla variação de propriedades físicas e químicas. Particularmente em relação ao Mato Grosso, muitas das áreas de cultivo localizam-se em regiões que circundam as nascentes do Pantanal, o que aumenta a necessidade de estudar o comportamento de herbicidas no solo.

O controle das plantas daninhas por meio de herbicidas é utilizado em grandes áreas de plantio, por ser um método rápido e eficiente. No entanto, o uso intensivo desses produtos aumenta as preocupações com a contaminação do solo e da água, bem como com seus efeitos sobre os seres humanos e animais (Inoue et al., 2003). Além disso, os herbicidas são os agrotóxicos detectados com maior frequência fora das áreas de aplicação, aumentando o risco de contaminação ambiental (Oliveira Jr. et al., 2001).

Sabe-se que a movimentação de um herbicida no perfil do solo ocorre em todas as direções e é dependente da direção do fluxo de água. O movimento descendente dessas moléculas no perfil do solo é chamado de lixiviação. Esse evento é influenciado pelo teor e tipo de matéria orgânica, composição, tamanho e distribuição das partículas do solo, pH e densidade do solo, tamanho e distribuição dos poros, sendo a principal forma de transporte no solo das moléculas não voláteis e solúveis em água (Prata et al., 2003).

A lixiviação é fundamental para a incorporação superficial da maioria dos herbicidas, fazendo com que eles atinjam sementes ou plântulas em germinação, podendo, portanto, torná-lo mais ou menos eficiente no controle de plantas daninhas (Oliveira, 2001). No entanto, pesquisas revelam que a lixiviação pode também reduzir a persistência dos herbicidas, por promover o transporte desses compostos para uma região mais profunda do perfil do solo, menos explorada pelas raízes das plantas daninhas e culturas. Nesse caso, a eficácia e o potencial de injúria para as culturas em sucessão são reduzidos (Ferri & Vidal, 2003). A lixiviação excessiva contribui também, em muitos casos, para que o herbicida atinja e contamine o lençol freático. Desse modo, entender o potencial de lixiviação dos herbicidas pode contribuir para a criação de formulações que amenizem as perdas por lixiviação desses compostos no solo (Wauchope et al., 1990; Gish et al., 1994).

O potencial de lixiviação de um herbicida pode ser avaliado por técnicas de lisímetro (Winton & Weber, 1996), cromatografia de camada delgada de solo (Helling, 1971; Sanchez-Martin et al., 1994), entre outros métodos de avaliação que envolvem o uso de equipamentos caros e de elevado custo de manutenção. Como alternativa, podem ser utilizadas amostras deformadas em colunas de solo (Souza et al., 2000; Inoue et al., 2002; Bachega et al., 2009), com a semeadura de espécies vegetais sensíveis ao herbicida de interesse – denominadas bioindicadoras.

Nesse sentido, objetivou-se no presente trabalho avaliar o potencial de lixiviação dos herbicidas alachlor, oxyfluorfen, prometryne e S-metolachlor, sob diferentes simulações de precipitações pluviais, em dois solos com texturas contrastantes provenientes de áreas cultivadas com algodão.

## MATERIAL E MÉTODOS

Foram conduzidos oito ensaios em casa de vegetação, visando avaliar o potencial de lixiviação dos herbicidas alachlor, oxyfluorfen, prometryne e S-metolachlor. Para isso, foram utilizadas amostras deformadas de solo, provenientes de Campo Novo do Parecis-MT (textura arenosa) e Tangará da Serra-MT (textura

argilosa), áreas cultivadas anteriormente com algodão há dois anos. O solo de textura arenosa foi classificado como Neossolo Quartzarênico (RQ), e o solo de textura argilosa, como Latossolo Vermelho (LV). As características químicas e físicas das amostras de solo estudadas são apresentadas na Tabela 1.

As amostras foram peneiradas e devidamente acondicionadas em colunas de PVC com 30 cm de altura e 10 cm de diâmetro, anteriormente recobertas com parafina na superfície interna, visando evitar a retenção da água nas bordas internas da coluna. A borda inferior das colunas foi fechada com sombrite, para reter o solo. Após o acondicionamento do solo nas colunas, estas foram umidificadas por capilaridade durante 24 horas para saturação das amostras. Em seguida, as colunas foram mantidas sobre a bancada da casa de vegetação também por 24 horas, permitindo que o excesso de água fosse drenado.

Os herbicidas foram aplicados na fase superior das colunas, utilizando um pulverizador costal pressurizado a  $\text{CO}_2$ , munido de bicos tipo leque XR110.02, mantido à pressão de trabalho de  $2 \text{ kgf cm}^{-2}$ , proporcionando vazão de  $200 \text{ L ha}^{-1}$ , mantendo-se 50 cm entre a borda superior da coluna e a barra de aplicação. Foram ajustadas as doses dos herbicidas para cada tipo de solo. No RQ e LV, foram aplicadas, respectivamente, as seguintes doses: alachlor ( $2,4$  e  $3,36 \text{ kg ha}^{-1}$ ), oxyfluorfen ( $0,48$  e  $0,72 \text{ kg ha}^{-1}$ ), prometryne ( $0,75$  e  $1,5 \text{ kg ha}^{-1}$ ) e S-metolachlor ( $1,2$  e  $1,44 \text{ kg ha}^{-1}$ ), de acordo com as recomendações de Rodrigues & Almeida (2005).

Em seguida, foram simuladas precipitações de 0, 20, 40, 60, 80 e 100 mm, com

auxílio de um equipamento simulador de chuvas. As colunas foram seccionadas longitudinalmente com uma serra elétrica, obtendo-se duas metades, que foram separadas três dias após a aplicação dos herbicidas, permanecendo assim por mais 24 horas. Após esse período, foi realizada a semeadura das espécies bioindicadoras (*Brachiaria decumbens* ou *Cucumis sativus*) longitudinalmente, sendo 25 sementes em cada metade de coluna. Utilizou-se apenas o bioindicador mais sensível para cada herbicida; a seleção da espécie bioindicadora adequada para cada herbicida foi realizada em ensaios preliminares (dados não publicados). Vinte e um dias após a semeadura, realizaram-se avaliações de fitointoxicação, nas diferentes seções da coluna (0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25 e 25-30 cm de profundidade). Como critério de avaliação de fitointoxicação, adotou-se a escala de notas de 0 a 100%, em que 0 corresponde a nenhuma injúria e 100% à morte das plantas.

Cada ensaio foi composto pela combinação entre um herbicida (alachlor, oxyfluorfen, prometryne ou S-metolachlor) e um solo (RQ ou LV). Foi adotado o delineamento em blocos casualizados, em esquema fatorial  $6 \times 6$ , com quatro repetições. Os fatores referem-se às seis faixas de profundidades na coluna (0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25 e 25-30 cm) e às seis intensidades de irrigação (0, 20, 40, 60, 80 e 100 mm). Os dados foram submetidos à análise de variância, e as médias, comparadas pelo teste de agrupamento de Scott Knott a 5% de probabilidade.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Tabelas 2 e 3 são apresentados os dados de fitointoxicação de *C. sativus* após a

**Tabela 1** - Características químicas e físicas das amostras de solos utilizadas nos experimentos

Solo	pH		$\text{Al}^{3+}$	$\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$	$\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{K}^+$	P
	( $\text{CaCl}_2$ )	( $\text{H}_2\text{O}$ )						
RQ <sup>1/</sup>	7,10	7,80	0,00	1,13	2,75	2,19	0,02	46,8
LV <sup>2/</sup>	5,80	6,70	0,00	3,13	6,00	4,31	0,37	2,30
Solo	M.O.		CTC		V	Areia	Silte	Argila
	(g $\text{dm}^{-3}$ )		(cmol <sub>c</sub> $\text{dm}^{-3}$ )		(%)	(g $\text{kg}^{-1}$ )		
RQ <sup>1/</sup>	15,00		3,90		71,00	908,00	32,00	60,00
LV <sup>2/</sup>	43,00		9,50		67,10	415,00	147,00	438,00

<sup>1/</sup> RQ: Neossolo Quartzarênico (textura arenosa). <sup>2/</sup> LV: Latossolo Vermelho (textura argilosa).



aplicação de alachlor em amostras de Neossolo Quartzarênico e Latossolo Vermelho, respectivamente. No solo com textura arenosa (RQ), não houve evidência de arraste vertical das moléculas de alachlor abaixo da camada superficial (0-5 cm) para as lâminas de 0 e 20 mm de água (Tabela 2). As plantas apresentaram pouca intoxicação na camada de 5-10 cm para a lâmina de 40 mm, sendo maiores na mesma camada para a lâmina de 60 mm (Tabela 2). As evidências indicam ainda que as moléculas de alachlor atingiram a camada de 10-15 cm de profundidade nas lâminas de 80 e 100 mm (Tabela 2). Esse resultado indica a mobilidade deste herbicida em solo com textura arenosa, conforme constatado por Bowman (1990), o qual observou que o alachlor apresentou mobilidade quando aplicado em lisímetro composto de areia. Esse autor verificou que o alachlor não ultrapassou 10 cm de profundidade em condições de clima seco durante 21 semanas, mas, quando submetido a uma lâmina de 50 mm, o pesticida atingiu uma profundidade de 30 cm e não foi detectado a partir da 12ª semana. O alachlor pertence ao grupo químico das cloroacetamidas e é um herbicida não iônico, persistindo de 6 a 10 semanas no solo. Apresenta alto índice de sorção à matéria orgânica ( $K_{oc}$ ) de 103 mL g<sup>-1</sup> de solo e apresenta potencial de lixiviação pelo índice de estimativa GUS (Oliveira Jr., 2007).

Nas amostras de solo com textura argilosa, não foi evidenciada mobilidade das moléculas de alachlor abaixo da camada de 0-5 cm com a utilização das lâminas de 0, 20 e 40 mm (Tabela 3). Nas colunas que receberam lâminas de 60 mm, foram detectados níveis do produto até a profundidade de 5-10 cm. Evidenciou-se ainda, em menor proporção, lixiviação até

a camada de 10-15 cm com aplicação das lâminas de 80 e 100 mm (Tabela 3).

Nesse contexto, estudos realizados por Fawcett et al. (1994) mostraram que até 90% de perdas das cloroacetamidas ocorrem na fase aquosa e as concentrações desses herbicidas sorvidos aos sedimentos são maiores do que aquelas dissolvidas na solução do solo. Sabe-se ainda que o pH não interfere na dissociação do produto; a degradação da molécula resulta principalmente da atividade microbiana (Rodrigues & Almeida, 2005) e a maior sorção do alachlor ocorre em solos com teores mais elevados de argila e matéria orgânica (Ferri et al., 2006). Por outro lado, há evidências de que o aumento da temperatura exerce efeito indireto sobre a sorção das cloroacetamidas, como alachlor e metolachlor, pelo aumento da solubilidade de suas moléculas, podendo aumentar a lixiviação e diminuir a sorção dos herbicidas ao solo (Oliveira Jr. et al., 2001). Resumidamente, o herbicida alachlor apresenta grande potencial de lixiviação quando submetido a precipitações maiores que 60 mm logo após sua aplicação ao solo, podendo ser detectado até 10-15 cm de profundidade, independentemente do solo utilizado.

Nos ensaios que utilizaram amostras de RQ, somente foi observada pequena mobilidade das moléculas de oxyfluorfen para a camada de 5-10 cm com aplicação de lâminas  $\geq$  80 mm de água, evidenciando que pode ocorrer pequena movimentação das moléculas do herbicida sob precipitações intensas (Tabela 4). Por outro lado, não se detectou lixiviação das moléculas de oxyfluorfen abaixo da camada superficial (0-5 cm), nos ensaios realizados com amostras de LV (Tabela 5).

**Tabela 2** - Fitointoxicação de pepino (*C. sativus*) após aplicação do herbicida alachlor (2,40 kg ha<sup>-1</sup>) nas amostras de Neossolo Quartzarênico (textura arenosa)

Profundidade na coluna (cm)	Lâmina aplicada (mm)					
	0	20	40	60	80	100
0 – 5	91,3 Ab	90,0 Ab	87,5 Ac	91,3 Ab	96,3 Aa	90,5 Ac
5 – 10	0 Bd	0 Bd	15,0 Bc	93,8 Aa	90,0 Ba	91,5 Ab
10 – 15	0 Bb	0 Bb	0 Cb	0 Bb	91,5 Ba	87,5 Aa
15 – 20	0 Ba	0 Ba	0 Ca	0 Ba	0 Ca	0 Ba
20 – 25	0 Ba	0 Ba	0 Ca	0 Ba	0 Ca	0 Ba
25 – 30	0 Ba	0 Ba	0 Ca	0 Ba	0 Ca	0 Ba

Médias seguidas de mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de agrupamento de Scott-Knott a 5% de probabilidade. CV = 12,90%.

**Tabela 3** - Fitointoxicação de pepino (*C. sativus*) após aplicação do herbicida alachlor (3,36 kg ha<sup>-1</sup>) nas amostras de Latossolo Vermelho (textura argilosa)

Profundidade na coluna (cm)	Lâmina aplicada (mm)					
	0	20	40	60	80	100
0 – 5	95,8 Aa	95,0 Aa	92,5 Aa	90,0 Aa	92,5 Aa	88,8 Aa
5 – 10	0 Bc	0 Bc	0 Bc	57,0 Bb	93,8 Aa	90,0 Aa
10 – 15	0 Bb	0 Bb	0 Bb	0 Cb	8,8 Ba	8,8 Ba
15 – 20	0 Ba	0 Ba	0 Ba	0 Ca	0 Ca	0 Ca
20 – 25	0 Ba	0 Ba	0 Ba	0 Ca	0 Ca	0 Ca
25 – 30	0 Ba	0 Ba	0 Ba	0 Ca	0 Ca	0 Ca

Médias seguidas de mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de agrupamento de Scott-Knott a 5% de probabilidade. CV = 18,64%.

**Tabela 4** - Fitointoxicação de *B. decumbens* após aplicação do herbicida oxyfluorfen (0,48 kg ha<sup>-1</sup>) nas amostras de Neossolo Quartzarênico (textura arenosa)

Profundidade na coluna (cm)	Lâmina aplicada (mm)					
	0	20	40	60	80	100
0 – 5	90,0 Aa	95,0 Aa	88,8 Aa	91,3 Aa	88,8 Aa	92,5 Aa
5 – 10	0 Bc	0 Bc	0 Bc	0 Bc	20,0 Bb	43,8 Ba
10 – 15	0 Ba	0 Ba	0 Ba	0 Ba	0 Ca	0 Ca
15 – 20	0 Ba	0 Ba	0 Ba	0 Ba	0 Ca	0 Ca
20 – 25	0 Ba	0 Ba	0 Ba	0 Ba	0 Ca	0 Ca
25 – 30	0 Ba	0 Ba	0 Ba	0 Ba	0 Ca	0 Ca

Médias seguidas de mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de agrupamento de Scott-Knott a 5% de probabilidade. CV = 21,92%.

**Tabela 5** - Fitointoxicação de *B. decumbens* após aplicação do herbicida oxyfluorfen (0,72 kg ha<sup>-1</sup>) nas amostras de Latossolo Vermelho (textura argilosa)

Profundidade na coluna (cm)	Lâmina aplicada (mm)					
	0	20	40	60	80	100
0 – 5	90,0 Aa	90,0 Aa	90,0 Aa	88,8 Aa	87,5 Aa	86,3 Aa
5 – 10	0 Ba	0 Ba	0 Ba	0 Ba	0 Ba	0 Ba
10 – 15	0 Ba	0 Ba	0 Ba	0 Ba	0 Ba	0 Ba
15 – 20	0 Ba	0 Ba	0 Ba	0 Ba	0 Ba	0 Ba
20 – 25	0 Ba	0 Ba	0 Ba	0 Ba	0 Ba	0 Ba
25 – 30	0 Ba	0 Ba	0 Ba	0 Ba	0 Ba	0 Ba

Médias seguidas de mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de agrupamento de Scott-Knott a 5% de probabilidade. CV = 17,43%.

Esses resultados estão de acordo com a literatura, segundo a qual o herbicida oxyfluorfen é praticamente imóvel no solo (Rodrigues & Almeida, 2005), apresentando índice de adsorção ( $K_{oc}$ ) de 100.000 mL g<sup>-1</sup> de solo e persistência

média de 30 dias. Esses autores afirmam ainda que a adsorção de oxyfluorfen é proporcional ao teor de matéria orgânica. Em trabalho realizado por Peñaherrera-Colina et al. (2005), em que se testou a persistência e a mobilidade de





oxyfluorfen em solo, foram obtidos resultados não significativos devido à pouca mobilidade do herbicida no solo em relação à massa seca total da planta bioindicadora colhida no 10<sup>a</sup> dia a 20 cm de profundidade e no 40<sup>a</sup> dia após a aplicação nas profundidades de 5-10 e 10-15 cm. Do mesmo modo, Yen et al. (2003) concluíram que a possibilidade de contaminação de águas subterrâneas por oxyfluorfen é muito baixa, podendo ocorrer apenas quando o solo apresenta níveis muito baixos de matéria orgânica. Assim, a baixa concentração das moléculas de oxyfluorfen abaixo da camada superficial (0-5 cm) nas amostras de RQ após a ocorrência de intensas precipitações pode ser atribuída ao baixo teor de matéria orgânica deste (15 g dm<sup>-3</sup>), quando comparada com as amostras de LV (43 g dm<sup>-3</sup>) (Tabela 1).

O herbicida prometryne nas amostras de solo RQ não apresentou mobilidade abaixo da camada de 0-5 cm para lâminas de até 40 mm de água (Tabela 6). No entanto, verificou-se que lâminas de 60 e 80 mm proporcionaram sintomas de intoxicação nas plantas bioindicadoras até a profundidade de 5-10 cm. Com a lâmina de 100 mm, o herbicida foi lixiviado até a camada de 10-15 cm (Tabela 6). Nesse sentido, a estimativa do potencial de lixiviação calculada pelo índice GUS classifica a lixiviação da molécula como intermediária (Inoue et al., 2003).

Os resultados com solo de textura argilosa (LV), apresentados na Tabela 7, indicam que houve movimentação das moléculas de prometryne até a profundidade de 5-10 cm somente nas colunas que receberam lâminas de 80 e 100 mm de água. Portanto, ao comparar os solos, o maior potencial de lixiviação observado nas amostras de RQ pode ser atribuído ao menor teor de argila (60 g kg<sup>-1</sup>) e carbono orgânico (25,86 g dm<sup>-3</sup>) presente neste solo, em relação ao LV (438 g kg<sup>-1</sup> de argila e 74,13 g dm<sup>-3</sup> de carbono orgânico).

O prometryne é um herbicida de dissociação básica, para o qual a retenção das moléculas é influenciada principalmente pelo teor de carbono e argila do solo, e que apresenta índice de sorção ( $K_{oc}$ ) entre 400 e 500 mL g<sup>-1</sup> de solo (Oliveira Jr., 2007). Esse fator torna o prometryne sensível às propriedades do solo, como observado em trabalho realizado por Cao et al. (2008), que estudaram a mobilidade do

prometryne em dois solos diferentes e verificaram que ele teve moderada a baixa mobilidade, a qual foi afetada pela propriedade de cada solo especificamente. Ainda, estudos de Prata et al. (2001) evidenciaram que herbicidas do grupo das triazinas, como o prometryne, apresentam de baixa a média solubilidade em água e reduzida velocidade de degradação, fatores que podem aumentar a persistência da molécula no solo e a probabilidade de contaminação de lençóis freáticos.

Independentemente da lâmina de água aplicada, as moléculas de S-metolachlor foram carregadas para profundidades superiores a 0-5 cm nas amostras de RQ. Com as lâminas de 20 a 60 mm de água, notaram-se sintomas de intoxicação nas plantas de *B. decumbens* até a camada de 10-15 cm de profundidade (Tabela 8). Contudo, verificou-se ainda que lâminas iguais ou maiores que 80 mm proporcionaram movimentação do herbicida até a profundidade de 15-20 cm (Tabela 8). De modo geral, quanto maior a lâmina de precipitação, maior foi o arraste vertical das moléculas de S-metolachlor, o que implica elevação do potencial de contaminação de águas subterrâneas. Em estudos com o herbicida S-metolachlor, Burgard et al. (1993) e Procópio et al. (2001) concluíram que a profundidade de lixiviação das moléculas desse herbicida depende da ocorrência e da intensidade de chuvas ou irrigação que ocorrem após a aplicação, além dos teores de argila e de matéria orgânica no solo. No trabalho realizado por Bowman (1988), verificou-se que o S-metolachlor aplicado sob uma lâmina de água de 50,8 mm permitiu o transporte do herbicida até 40 cm de profundidade, sugerindo, nesse mesmo estudo, que S-metolachlor, aplicado em solos agrícolas nas doses recomendadas, seria minimamente lixiviado sob condições meteorológicas normais, a menos que uma chuva forte ocorresse logo após a aplicação. Nesse caso, o índice GUS classifica o S-metolachlor como de alto potencial de lixiviação, uma vez que a sorção é intermediária ( $K_{oc} = 200$  mL g<sup>-1</sup> de solo) e apresenta alta solubilidade em água (480 mg L<sup>-1</sup> a 25 °C) (Oliveira Jr., 2007).

Os resultados da análise de fitointoxicação do bioindicador no solo com textura argilosa (LV) não evidenciaram a presença do herbicida

além da camada de 5-10 cm para as lâminas de até 60 mm de água. Para as lâminas de 80 e 100 mm, as moléculas foram detectadas até a profundidade de 10-15 cm, porém com sintomas relativamente bem menores, quando comparadas às amostras de solo com textura

arenosa (Tabelas 8 e 9). Segundo Oliveira Jr. (2007), os herbicidas não iônicos, como o S-metolachlor, têm a degradação e dissociação relacionada ao teor de matéria orgânica e argila do solo. Solos orgânicos têm menor lixiviação de S-metolachlor e, além disso, esta

**Tabela 6** - Fitointoxicação de pepino (*C. sativus*) após aplicação do herbicida prometryne (0,75 kg ha<sup>-1</sup>) nas amostras de Neossolo Quartzarênico (textura arenosa)

Profundidade na coluna (cm)	Lâmina aplicada (mm)					
	0	20	40	60	80	100
0 – 5	83,8 Aa	85,0 Aa	82,0 Aa	75,0 Ab	77,0 Ac	62,3 Ad
5 – 10	0 Bb	0 Bb	0 Bb	50,8 Ba	46,3 Ba	63,3 Aa
10 – 15	0 Bb	0 Bb	0 Bb	0 Cb	0 Cb	22,5 Ba
15 – 20	0 Ba	0 Ba	0 Ba	0 Ca	0 Ca	0 Ca
20 – 25	0 Ba	0 Ba	0 Ba	0 Ca	0 Ca	0 Ca
25 – 30	0 Ba	0 Ba	0 Ba	0 Ca	0 Ca	0 Ca

Médias seguidas de mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de agrupamento de Scott-Knott a 5% de probabilidade. CV = 26,48%.

**Tabela 7** - Fitointoxicação de pepino (*C. sativus*) após aplicação do herbicida prometryne (1,50 kg ha<sup>-1</sup>) nas amostras de Latossolo Vermelho (textura argilosa)

Profundidade na coluna (cm)	Lâmina aplicada (mm)					
	0	20	40	60	80	100
0 – 5	82,5 Aa	85,0 Aa	83,8 Aa	82,0 Aa	79,3 Aa	83,8 Aa
5 – 10	0 Bc	0 Bc	0 Bc	0 Bc	5,0 Bb	12,5 Ba
10 – 15	0 Ba	0 Ba	0 Ba	0 Ba	0 Ca	0 Ca
15 – 20	0 Ba	0 Ba	0 Ba	0 Ba	0 Ca	0 Ca
20 – 25	0 Ba	0 Ba	0 Ba	0 Ba	0 Ca	0 Ca
25 – 30	0 Ba	0 Ba	0 Ba	0 Ba	0 Ca	0 Ca

Médias seguidas de mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de agrupamento de Scott-Knott a 5% de probabilidade. CV = 18,18%.

**Tabela 8** - Fitointoxicação de *B. decumbens* após aplicação do herbicida S-metolachlor (1,20 kg ha<sup>-1</sup>) nas amostras de Neossolo Quartzarênico (textura arenosa)

Profundidade na coluna (cm)	Lâmina aplicada (mm)					
	0	20	40	60	80	100
0 – 5	92,5 Ab	96,3 Aa	100,0 Aa	91,3 Ab	82,5 Ac	83,8 Ac
5 – 10	0 Bf	33,8 Be	92,5 Ba	85,0 Bb	50,0 Bd	63,8 Bc
10 – 15	0 Bb	5,0 Cb	0 Cb	0 Cb	15,0 Ca	20,0 Ca
15 – 20	0 Ba	0 Ca	0 Ca	0 Ca	0 Da	0 Da
20 – 25	0 Ba	0 Ca	0 Ca	0 Ca	0 Da	0 Da
25 – 30	0 Ba	0 Ca	0 Ca	0 Ca	0 Da	0 Da

Médias seguidas de mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de agrupamento de Scott-Knott a 5% de probabilidade. CV = 13,59%.



**Tabela 9** - Fitointoxicação de *B. decumbens* após aplicação do herbicida S-metolachlor (1,44 kg ha<sup>-1</sup>) nas amostras de Latossolo Vermelho (textura argilosa)

Profundidade na coluna (cm)	Lâmina aplicada (mm)					
	0	20	40	60	80	100
0 – 5	92,5 Ab	96,3 Aa	100,0 Aa	91,3 Ab	82,5 Ac	83,8 Ac
5 – 10	0 Bf	33,8 Be	92,5 Ba	85,0 Bb	50,0 Bd	63,8 Bc
10 – 15	0 Bb	5,0 Cb	0 Cb	0 Cb	15,0 Ca	20,0 Ca
15 – 20	0 Ba	0 Ca	0 Ca	0 Ca	0 Da	0 Da
20 – 25	0 Ba	0 Ca	0 Ca	0 Ca	0 Da	0 Da
25 – 30	0 Ba	0 Ca	0 Ca	0 Ca	0 Da	0 Da

Médias seguidas de mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de agrupamento de Scott-Knott a 5% de probabilidade. CV = 15,62%.

é inibida em solos com alto teor de argila e/ou silte (Exttoxnet, 2000). Como pode ser observado por Singh (2003), esterco de vaca e ureia aumentaram a sorção de S-metolachlor no solo, e essas alterações reduziram as perdas por lixiviação do herbicida, mostrando que os solos orgânicos são eficazes em restringir o movimento de S-metolachlor. Assim, sob precipitações semelhantes, em solos de textura mais leve, as moléculas desse herbicida são carregadas para profundidades maiores do que em solos de textura argilosa. Nesse contexto, S-metolachlor possui potencial de contaminação de águas subterrâneas, visto que, entre os pesticidas detectados por Pittman & Berndt (2003) em águas subterrâneas provenientes de áreas agrícolas do sul do estado da Geórgia (EUA), ele foi detectado em 67% das amostras analisadas.

Conclui-se que lâminas de água superiores a 60 mm proporcionaram maior movimentação efetiva das moléculas de herbicidas nas amostras de solo com textura arenosa (RQ), em relação às de textura argilosa (LV). Na comparação das médias, entre os herbicidas testados, S-metolachlor foi o que mostrou maior potencial de lixiviação, especialmente em solo de textura arenosa.

## LITERATURA CITADA

BACHEGA, T. F. et al. Lixiviação de sulfentrazone e amicarbazone em colunas de solo com adição de óleo mineral. *Planta Daninha*, v. 27, n. 2, p. 363-370, 2009.

BENEDICT, C. R. Physiology. In: KOEHL, R. J.; LEWIS, C. F. *Cotton*. Madison: American Society of Agronomy, 1984. p. 151-201 (Series Agronomy, 24).

BOWMAN, B. T. Mobility and persistence of alachlor, atrazine and metolachlor in plainfield sand, and atrazine and isazofos in honeywood silt loam, using field lysimeters. *Environ. Toxic. Chem.*, v. 9, p. 453-461, 1990.

BOWMAN, B. T. Mobility and persistence of metolachlor and aldicarb in field lysimeters. *J. Environ. Qual.*, v. 17, n. 4, p. 689-694, 1988.

BURGARD, D. J. et al. Metolachlor distribution in a sandy soil under irrigated potato production. *Weed Sci.*, v. 41, n. 4, p. 648-655, 1993.

CAO, J. et al. Effects of SOM, surfactant and pH on the sorption-desorption and mobility of prometryne in soils. *Chemosphere*, v. 70, p. 2127-2134, 2008.

EXTOXNET: Extension Toxicology Network. **Metolachlor (Dual) herbicide profile 2/85**. Sacramento: Department of Pesticide Regulation, 2000.

FAWCETT, R. S. et al. The impact of conservation tillage on pesticide runoff into surface water: a review and analysis. *J. Soil Water Conser.*, v. 49, n. 1, p. 126-135, 1994.

FERRI, M. V. W. et al. **Sorção do herbicida alachlor em solos com diferentes conteúdos de argila e carbono orgânico**. 2006. Disponível em: <[http://www.ufsm.br/ppgcs/congressos/LINKS%20DO%20CBCS%202003 / CBCS2003%20EM%20PDF/30.pdf](http://www.ufsm.br/ppgcs/congressos/LINKS%20DO%20CBCS%202003/CBCS2003%20EM%20PDF/30.pdf)>. Acesso em: 13 jun. 2009.

FERRI, M. V. W.; VIDAL, R. A. Persistência do herbicida acetochlor em função de sistemas de preparo e cobertura com palha. *Ci. Rural*, v. 33, n. 3, p. 399-404, 2003.

GISH, T. G.; SHIRMOHAMMADI, A.; WIENHOLD, B. J. Field-scale mobility and persistence of commercial and starch-encapsulated atrazine and alachlor. *J. Environ. Qual.*, v. 23, p. 355-359, 1994.





- HELLING, C. S. Pesticide mobility in soils. III. Influence of soil properties. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, v. 35, p. 743-748, 1971.
- INOUE, M. H. et al. Calagem e o potencial de lixiviação de imazaquin em colunas de solo. **Planta Daninha**, v. 20, n. 1, p. 125-132, 2002.
- INOUE, M. H. et al. Critérios para avaliação do potencial de lixiviação dos herbicidas comercializados no Estado do Paraná. **Planta Daninha**, v. 21, n. 2, p. 313-323, 2003.
- OLIVEIRA, M. F. Comportamento de herbicidas no ambiente. In: OLIVEIRA JR., R. S.; CONSTANTIN, J. **Plantas daninhas e seu manejo**. Guaíba: Agropecuária, 2001. p. 315-362.
- OLIVEIRA JR., R. S.; KOSKINEN, W. C.; FERREIRA, F. A. Sorption and leaching potential of herbicides on Brazilian soils. **Weed Res.**, v. 41, p. 97-111, 2001.
- OLIVEIRA JR., R. S. **Comportamento dos herbicidas residuais no solo: relação entre parâmetros físico-químicos e atributos do solo**. Maringá: EDUEM, 2007.
- PEÑAHERRERA-COLINA, L. A. et al. Persistência biológica de ametryn, diuron e oxyfluorfen no solo. **Ci. Agrotec.**, v. 29, n. 5, p. 980-987, 2005.
- PITTMAN, J. R.; BERNDT, M. P. Occurrence of herbicide degradation compounds in streams and ground water in agricultural areas of southern Georgia, 2002. In: HATCHER, K. J. GEORGIA WATER RESOURCES CONFERENCE, 2003, Athens. **Anais...** Athens: Institute of Ecology, The University of Georgia, 2003. v. 2. p. 856-859, 2003.
- PRATA, F. et al. Degradação e sorção de ametrina em dois solos com aplicação de vinhaça. **Pesq. Agropec. Bras.**, v. 36, n. 7, p. 975-981, 2001.
- PRATA, F. et al. Glyphosate sorption and desorption in soils with different phosphorous levels. **Sci. Agric.**, v. 60, n. 1, p. 175-180, 2003.
- PROCÓPIO, S. O. et al. Efeito da irrigação inicial na profundidade de lixiviação do herbicida S-metolachlor em diferentes tipos de solos. **Planta Daninha**, v. 19, n. 3, p. 409-417, 2001.
- RODRIGUES, B. N.; ALMEIDA, F. S. **Guia de herbicidas**. 5.ed. Londrina: Autores, 2005.
- SANCHEZ-MARTIN, M. J.; CRISANTO, T.; ARIENZO, M. Evaluation of the mobility of C<sup>14</sup>-labelled pesticides in soils by thin layer chromatography using a linear analyser. **J. Environ. Sci. Health, Part B**, v. 3, p. 473-484, 1994.
- SINGH, N. Organic manure and urea effect on metolachlor transport through packed soil columns. **J. Environ. Qual.**, v. 32, p. 1743-1749, 2003.
- SOUZA, A. P. et al. Lixiviação de glyphosate e imazapyr em solos com diferentes texturas e composição química. I. Método do bioensaio. **Planta Daninha**, v. 18, n. 1, p. 5-16, 2000.
- WAUCHOPE, R. D.; WILLIAMS, R. G.; MARTI, L. R. Runoff of sulfometurom-methyl and cyanazine from small plots: effects of formulation and grass cover. **J. Environ. Qual.**, v. 19, n. 1, p. 119-125, 1990.
- WINTON, K.; WEBER, J. B. A review of field lysimeter studies to describe the environmental fate of pesticides. **Weed Technol.**, v. 10, p. 202-209, 1996.
- YEN, J. H.; SHEU, W. S.; WANG, Y. S. Dissipation of the herbicide oxyfluorfen in subtropical soils and its potential to contaminate groundwater. **Ecotoxicol. Environ. Safety**, v. 54, n. 1, p. 151-156, 2003.

