

POTENCIAL DE LIXIVIAÇÃO DE IMAZAPIC E ISOXAFLUTOLE EM COLUNAS DE SOLO¹

Leaching Potential of Imazapic and Isoxaflutole in Soil Columns

INOUE, M.H.^{2,5}, OLIVEIRA JR., R.S.^{3,5}, CONSTANTIN, J.^{3,5} e ALONSO, D.G.^{4,5}

RESUMO - Diante da intensa utilização de herbicidas, este trabalho objetivou avaliar o potencial de lixiviação de imazapic e isoxaflutole em colunas de solo, com amostras de Latossolo Vermelho distrófico (LVd - textura franco-arenosa) e Latossolo Vermelho distroférico (LRd - textura argilosa), provenientes do município de Iguaraçu (PR). Para isso, inicialmente foram realizados ensaios visando determinar a lâmina de água necessária para promover a movimentação dos herbicidas nas colunas. Na segunda fase do trabalho, utilizando apenas amostras de LVd, os ensaios consistiram da aplicação de imazapic (0, 65 e 130 g ha⁻¹) e isoxaflutole (0, 35 e 70 g ha⁻¹) no topo das colunas e aplicação de uma lâmina de 40 mm de água. Três dias após a aplicação, cada coluna foi dividida em seções de 0-5, 5-10, 10-15, 15-20 e 20-25 cm e foram instalados bioensaios com *Brachiaria decumbens* e *Cucumis sativus*, para avaliar a lixiviação dos herbicidas. Os resultados da primeira fase indicaram que lâminas ≥ 40 mm promoveram lixiviação dos herbicidas nas amostras de LVd; no caso do LRd, esta lâmina foi de ≥ 60 mm, para o isoxaflutole. Os resultados da segunda fase (40 mm de água no LVd) mostraram que, dependendo da dose e do bioindicador utilizado, houve lixiviação de imazapic até a camada de 10-15 ou 15-20 cm. Constatou-se também que, mesmo com elevada dose, a movimentação do isoxaflutole nas colunas restringiu-se à camada de 5-10 cm.

Palavras-chave: bioindicador, herbicidas, impacto ambiental, textura.

ABSTRACT - In view of the intense use of herbicides, this work aimed to evaluate the leaching potential of imazapic and isoxaflutole in soil columns, using samples of two Haplorthox soils (LVd - sandy loam texture and LRd - clay texture), originated from Iguaraçu (PR). Thus, assays were carried out aiming to determine the amount of water necessary to promote herbicide movement in the columns. On the second phase of the work, using only LVd samples, the assays consisted of applications of imazapic (0, 65 and 130 g ha⁻¹) and isoxaflutole (0, 35 and 70 g ha⁻¹) on the top of the columns, followed by application of 40 mm of water. Three days after herbicide application, each column was divided into sections of 0-5, 5-10, 10-15, 15-20 and 20-25 cm and bioassays with *Brachiaria decumbens* and *Cucumis sativus* were installed to evaluate herbicide leaching. Results from the first phase indicate that irrigation depths ≥ 40 mm promoted herbicide leaching in the LVd samples and of ≥ 60 mm in the LRd samples, for isoxaflutole. The results of the second phase (40 mm of water in the LVd samples) indicate that, depending on the dose and bioindicator applied, imazapic leaching occurred up to the depth of 10-15 cm or of 15-20 cm. Even at the highest rates applied, isoxaflutole downwards movement in columns was restricted to a soil depth of 5-10 cm.

Keywords: bioindicator, herbicides, environmental impact, soil texture.

¹ Recebido para publicação em 25.1.2007 e na forma revisada em 23.8.2007.

² Eng^a-Agr^a, D.S., Dep. de Agronomia, Universidade do Estado do Mato Grosso (UNEMAT). Parte da tese de doutorado apresentada pela primeira autora para obtenção do grau de Doutora em Agronomia, área de concentração em Proteção de Plantas, <miriamhinoue@hotmail.com>; ³ Professor Associado, Núcleo de Estudos Avançados em Ciência das Plantas Daninhas (NAPD/UEM), Dep. de Agronomia, Universidade Estadual de Maringá. Av. Colombo, 5790. 87020-9000. Maringá-PR, <rsojunior@uem.br>;

⁴ Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração em Proteção de Plantas, NAPD/UEM.

⁵ Bolsista do CNPq.



INTRODUÇÃO

Imazapic e isoxaflutole são herbicidas utilizados no controle de plantas daninhas na cultura da cana-de-açúcar no Brasil (Rodrigues & Almeida, 2005). Imazapic é uma molécula do grupo químico das imidazolinonas, que apresenta solubilidade em água de 2.200 mg L⁻¹ e meia-vida no solo de cerca de 120 dias (Vencill, 2002). O isoxaflutole apresenta solubilidade em água de 6 mg L⁻¹ e é sensível à luz e à hidrólise (Lin et al., 2002). Esses herbicidas normalmente são aplicados em pré-emergência, sendo o comportamento desses produtos sobre o solo influenciado por processos de retenção, transformação e transporte (Oliveira, 2001).

A movimentação de um herbicida no perfil do solo ocorre em todas as direções e é dependente da direção do fluxo de água (Javaroni et al., 1999). Devido à ocorrência de grandes volumes de água de percolação nos solos após chuvas pesadas ou irrigações, a direção mais comum na qual o herbicida pode ser lixiviado é a descendente. Esse processo interfere no comportamento do herbicida no solo, podendo torná-lo mais ou menos eficiente, e influencia diretamente o seu desempenho no controle de plantas daninhas (Oliveira, 2001).

Sabe-se que as características que mais influenciam o movimento dos herbicidas são o conteúdo e o tipo de argila e matéria orgânica, a composição e a distribuição do tamanho das partículas do solo, o pH, a densidade aparente e o tamanho e distribuição dos poros. O entendimento do efeito dessas características no comportamento de herbicidas pode levar à adequação de doses a características específicas do solo.

Especificamente para os herbicidas envolvidos neste estudo, a sorção e o movimento dessas moléculas podem ser controlados por diferentes características do solo. No caso do isoxaflutole, a atividade residual é menor em solos de textura arenosa do que em solos argilosos (Marchiori Jr. et al., 2005). Para herbicidas fracamente sorvidos, do grupo químico das imidazolinonas, o valor do pH do solo, o tipo de argila, o teor de matéria orgânica e o conteúdo de óxidos influenciam de maneira significativa a sorção e, conseqüentemente, o seu potencial de lixiviação (Wehtje et al., 1987; Carlisle & Trevors, 1988; Inoue et al., 2002).

O potencial de lixiviação de um herbicida pode ser avaliado por diferentes técnicas, como: lisímetro (Ogner, 1987; Winton e Weber & 1996), cromatografia de camada delgada de solo (Helling, 1971; Sanchez-Martin et al., 1994), entre outros. No entanto, essas técnicas de avaliação envolvem a utilização de equipamentos cujos custo e manutenção são normalmente muito elevados. Uma técnica alternativa é a utilização de colunas de solo (Caetano et al., 1995; Pires et al., 1997; Souza et al., 2000; Inoue et al., 2002) em conjunto com a semeadura de espécies vegetais que apresentam alta sensibilidade ao herbicida de interesse, denominada bioindicadores.

A compreensão da dinâmica dos herbicidas no solo poderá levar a recomendações mais precisas quanto às doses a serem aplicadas e à necessidade da adequação quanto às características do solo que controlam sua movimentação e persistência no solo. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar, em colunas de solo, o potencial de lixiviação de imazapic e isoxaflutole em dois solos com textura contrastante, com a utilização de bioindicadores como técnica de detecção.

MATERIAL E MÉTODOS

Efeito e determinação de lâminas de água na lixiviação

Inicialmente, foram realizados três ensaios com os objetivos de avaliar os efeitos de intensidades de chuva na lixiviação e determinar a lâmina de água necessária para que cada um dos herbicidas, aplicado ao topo da coluna, percolasse nesta. Os solos estudados são provenientes de uma litosseqüência localizada em Iguaraçu (PR) e foram classificados como Latossolo Vermelho distrófico (LVd – textura franco-arenosa) e Latossolo Vermelho distroférrico (LRd – textura argilosa), conforme Embrapa (1999). As caracterizações químicas e físicas das amostras de solo utilizadas nas colunas encontram-se na Tabela 1.

As amostras de solo foram peneiradas (2 mm) e acondicionadas em colunas de PVC (25 cm de altura e 10 cm de diâmetro) previamente seccionadas longitudinalmente. Para manter as duas metades unidas, estas foram amarradas com arame liso e recobertas interna

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

Solo	pH		Al ³⁺	H ⁺ +Al ³⁺	Ca ⁺² +Mg ²⁺	Ca ²⁺	K ⁺	P
	CaCl ₂	H ₂ O						
LVd ^{1/}	4,5	5,4	0,3	2,73	1,20	0,94	0,12	7,90
LRd ^{2/}	5,0	5,6	0	4,61	6,41	4,81	1,16	33,9
Solo	C		CTC		V	areia	silte	argila
	(g dm ⁻³)		(cmol _c dm ⁻³)		(%)		(g kg ⁻¹)	
LVd ^{1/}	5,19		4,050		32,6	880	20	100
LRd ^{2/}	15,96		12,18		62,2	350	90	560

^{1/} LVd = Latossolo Vermelho distrófico (textura franco-arenosa).

^{2/} LRd = Latossolo Vermelho distroférico (textura argilosa).

Fonte: Laboratório de Solos da UEM.

e externamente com parafina. Cada coluna recebeu, de forma manual e cuidadosamente, três quilos de solo. Após o acondicionamento, as colunas foram umedecidas por capilaridade por um período de 24 horas, quando o solo se apresentava saturado até o topo da coluna. A seguir, as colunas foram mantidas na bancada da casa de vegetação por 24 horas, para que o excesso de água fosse drenado.

Foram utilizados um herbicida (imazapic ou isoxaflutole) e um solo (LVd ou LRd) em cada um dos três experimentos. Adotou-se o esquema fatorial 5 x 5, e os fatores estudados em cada experimento foram lâminas de irrigação (0, 20, 40, 60 e 80 mm) e profundidades na coluna (0-5, 5-10, 10-15, 15-20 e 20-25 cm). Foi empregado o delineamento inteiramente casualizado, com três repetições. Para imazapic, o ensaio não foi realizado em solo de textura argilosa (Latosolo Vermelho distroférico), visto que essa combinação apresentou níveis insatisfatórios de controle de *Brachiaria decumbens* em trabalhos anteriores (Inoue et al., 2006).

Os herbicidas imazapic (LVd 65 g ha⁻¹) e isoxaflutole (LVd 35 g ha⁻¹; LRd 70 g ha⁻¹) foram aplicados ao topo das colunas, utilizando-se de um pulverizador com pressão constante, à base de CO₂, munido de quatro bicos tipo leque XR1 10.02, espaçados entre si de 0,50 m, aplicando-se um volume de calda equivalente a 200 L ha⁻¹. No momento da aplicação, a temperatura do ar era de 28 °C e a umidade relativa estava em 70%. Também houve o cuidado de manter uma altura de 50 cm entre o topo das colunas e a barra de aplicação. A

seguir, foi aplicada uma lâmina de água suficiente para simular as precipitações de 20, 40, 60 e 80 mm, além da testemunha (0 mm).

Três dias após a aplicação, as colunas tiveram as duas metades separadas longitudinalmente. Vinte e quatro horas após a abertura das colunas, estas foram divididas em cinco seções de igual tamanho (0-5, 5-10, 10-15, 15-20 e 20-25 cm). As amostras coletadas em cada profundidade das colunas foram homogeneizadas e colocadas em vasos de polietileno, com capacidade para 250 cm³. Em seguida, fez-se o plantio de cinco sementes por vaso da espécie bioindicadora (*Brachiaria decumbens*), a uma profundidade de 1,5 cm. As irrigações para manutenção da umidade do solo nos vasos foram feitas segundo a necessidade das plantas, ou seja, entre uma e três vezes ao dia.

Decorridos 21 dias após a semeadura (DAS), foi realizada a colheita das plantas. O número de plantas vivas foi anotado e, em seguida, a parte aérea foi colhida, acondicionada em saco de papel e levada à estufa de ventilação forçada a 72 °C, por 72 horas, sendo determinada a biomassa seca.

Os dados foram interpretados por meio de análise de variância. As médias foram comparadas pelo teste de agrupamento de Scott-Knott a 5% (Saeg, 1997).

Efeito de doses na lixiviação dos herbicidas em colunas de solo

Nesta etapa foram realizados quatro experimentos, com o intuito de avaliar o efeito de



doses no potencial de lixiviação de imazapic e isoxaflutole, por meio de duas espécies bioindicadoras, nas amostras do solo de textura franco-arenosa (LVd).

Em cada experimento, foram utilizados um herbicida (imazapic ou isoxaflutole) e um bioindicador (*B. decumbens* ou *Cucumis sativus*), num esquema fatorial 2 x 5; os fatores foram doses (imazapic 65 e 130 g ha⁻¹; isoxaflutole 35 e 70 g ha⁻¹) e profundidades na coluna (0-5, 5-10, 10-15, 15-20 e 20-25 cm). As doses referem-se à dose recomendada para solo de textura arenosa e à dose indicada para solo de textura argilosa. Foi adotado o delineamento inteiramente casualizado, com três repetições.

Os procedimentos para preparação das colunas, acondicionamento dos solos, saturação e drenagem nas colunas, bem como as aplicações dos herbicidas, foram descritos anteriormente (efeito e determinação de lâminas de água na lixiviação). A lâmina de 40 mm de água, a ser adicionada logo após a aplicação dos herbicidas, foi estabelecida de acordo com os dados dos ensaios anteriores. Para isso, foi analisado, com base na biomassa bioindicadora, qual das lâminas de água aplicadas foi suficiente para promover a movimentação do herbicida na coluna, mas sem que as moléculas do produto chegassem à outra extremidade longitudinal da coluna.

A metodologia para semeadura, avaliações e análise dos dados foi idêntica à utilizada para efeito e determinação de lâminas de água na lixiviação.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Efeito e determinação de lâminas de água na lixiviação

Em todos os experimentos, tanto os fatores isolados quanto a interação entre lâminas e profundidades foram significativos em relação ao acúmulo de biomassa de *B. decumbens*.

O estudo da dinâmica de imazapic foi realizado apenas nas amostras de Latossolo Vermelho distrófico. Os resultados deste experimento indicam maior movimentação descendente para as simulações de chuva a partir de 40 mm. Nas lâminas de 0 e 20 mm de água, houve redução significativa de crescimento da planta bioindicadora apenas na camada superficial de solo (0-5 cm), o que indica ausência ou níveis muito baixos de imazapic nas camadas mais profundas da coluna (5-25 cm) (Tabela 2).

Evidencia-se que houve lixiviação de imazapic até a camada de 10-15 cm para a lâmina de 40 mm e até a camada de 15-20 cm para a lâmina de 60 mm. Na simulação de 80 mm de chuva, não houve diferenças entre as biomassas obtidas para as diferentes profundidades, o que pode indicar que a lixiviação foi suficientemente intensa para que houvesse arraste das moléculas do herbicida para profundidades superiores às avaliadas (20-25 cm). A intensa lixiviação observada neste solo deve-se possivelmente à baixa capacidade de sorção do Latossolo Vermelho distrófico, em razão de seu baixo teor de carbono orgânico (5,2 g dm⁻³) e de argila (10%). Aliado a esses fatores, segundo

Tabela 2 - Acúmulo de biomassa seca (mg secção de coluna⁻¹) da parte aérea das plantas de *B. decumbens* cultivadas em amostras de Latossolo Vermelho distrófico (textura franco-arenosa), provenientes das colunas submetidas à aplicação de imazapic (65 g ha⁻¹)

Profundidade na coluna (cm)	Lâmina aplicada (mm)				
	0	20	40	60	80
0-5	98,4 Bb	62,3 Bc	123,6 Bb	147,7 Aa	112,2 Ab
5-10	150,9 Aa	164,1 Aa	99,0 Bb	125,9 Bb	112,9 Aa
10-15	162,7 Aa	162,1 Aa	133,7 Ba	73,5 Cb	102,1 Ab
15-20	173,8 Aa	164,0 Aa	152,8 Aa	117,8 Bb	117,2 Ab
20-25	173,1 Aa	168,3 Aa	162,2 Aa	175,4 Aa	125,6 Ab

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

CV = 13,44%.

Mangels (1991), por se tratar de um herbicida ionizável, o imazapic pode apresentar-se em duas formas quanto à sua carga líquida: abaixo de pH 3,9, a forma predominante é a molecular, cuja carga líquida é zero; e, quando o pH do solo se aproxima da neutralidade, passa a predominar a forma aniônica, diminuindo a força de atração entre as moléculas do herbicida e as cargas predominantes no solo. Desse comportamento resulta menor sorção do herbicida e, conseqüentemente, maior potencial de lixiviação no solo.

Portanto, em condições de pH acima do pKa da molécula (3,9), o movimento do herbicida, através do perfil do solo, é favorecido, em razão da baixíssima sorção. Por esse motivo, os herbicidas ácidos são normalmente menos sorvidos aos colóides do solo do que os herbicidas neutros ou básicos. Há vários relatos de que herbicidas do grupo químico das imidazolinonas são pouco sorvidos em solo com pH acima do pKa do produto. Utilizando amostras de um Latossolo Vermelho acriférrico, Rocha et al. (2000) verificaram que, quanto maior o valor do pH do solo, menor a sorção do imazaquin. Loux et al. (1989) e Regitano et al. (1997) investigaram a contribuição de alguns atributos do solo - como o pH, o carbono orgânico, a argila e a CTC - na sorção do imazaquin e observaram que o pH e o teor de carbono orgânico foram os principais atributos relacionados à retenção do herbicida. Ao estudar a persistência e lixiviação do imazapyr em dois solos com diferentes características físicas e químicas, Vizantinopoulos & Lolos (1994) constataram elevada mobilidade dessa molécula nos solos

e concluíram que esse processo é influenciado pelo pH, teor de argila e conteúdo de matéria orgânica.

Outro fato importante em relação à lixiviação de imazapic, neste solo, foi a textura arenosa, que facilitou a percolação da água no perfil e permitiu maior movimentação descendente do imazapic, por fluxo de massa. Souza et al. (1999) observaram que o imazapyr, molécula do mesmo grupo do químico do imazapic, apresentou lixiviação diferenciada entre os diferentes solos, sendo maior em solo de textura franco-arenosa, em relação ao solo argiloso. Assim, em se tratando de herbicidas derivados de ácidos fracos, como o imazapic, parece que, sob condições de chuvas ou irrigações intensas, uma lixiviação significativa pode ocorrer, o que pode afetar tanto a atividade do herbicida, com relação ao controle de plantas daninhas, como também sua persistência no solo e no ambiente, além de seu potencial de impacto em mananciais aquáticos subterrâneos. Hernandez et al. (2001) concluíram que, com o aumento no índice pluviométrico após a aplicação, de 30 para 90 mm, ocorre o arraste do imazapic (122,5 e 147,0 g ha⁻¹) para maiores profundidades em um solo com 55% de argila, pH 5,9 e 15 g dm⁻³ de matéria orgânica, reduzindo a eficiência do produto no controle das plantas daninhas presentes na camada superficial do solo.

Nas Tabelas 3 e 4 são apresentados os valores médios de biomassa de *B. decumbens*, cultivadas, respectivamente, em amostras de Latossolo Vermelho distrófico e Latossolo Vermelho distroférico, após a aplicação de

Tabela 3 - Acúmulo de biomassa seca (mg por secção de coluna) da parte aérea das plantas de *B. decumbens* cultivadas em amostras de Latossolo Vermelho distrófico (textura franco-arenosa), provenientes das colunas submetidas à aplicação de isoxaflutole (35 g ha⁻¹)

Profundidade na coluna (cm)	Lâmina aplicada (mm)				
	0	20	40	60	80
0-5	23,7 Ba	26,0 Ba	14,5 Ca	36,0 Ca	20,6 Ca
5-10	137,4 Aa	134,1 Aa	70,3 Bb	82,5 Bb	36,8 Cc
10-15	139,0 Aa	141,6 Aa	142,2 Aa	121,4 Aa	70,7 Bb
15-20	143,7 Aa	146,5 Aa	137,7 Aa	125,3 Aa	61,8 Bb
20-25	168,4 Aa	172,3 Aa	146,3 Aa	152,6 Aa	103,8 Ab

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

CV = 19,20%.



Tabela 4 - Acúmulo de biomassa seca (mg secção de coluna⁻¹) da parte aérea das plantas de *B. decumbens* cultivadas em amostras de Latossolo Vermelho distroférico (textura argilosa), provenientes das colunas submetidas à aplicação de isoxaflutole (70 g ha⁻¹)

Profundidade na coluna (cm)	Lâmina aplicada (mm)				
	0	20	40	60	80
0-5	138,9 Bb	184,4 Ba	186,3 Ba	223,9 Ca	83,5 Db
5-10	460,9 Aa	502,4 Aa	452,9 Aa	354,3 Bb	224,4 Cc
10-15	504,4 Aa	470,5 Aa	472,4 Aa	485,7 Aa	371,5 Bb
15-20	546,8 Aa	488,7 Aa	490,7 Aa	546,9 Aa	360,9 Bb
20-25	511,9 Aa	476,6 Aa	454,5 Aa	484,5 Aa	446,6 Aa

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

CV = 10,52%.

isoxaflutole. Observou-se comportamento diferenciado da movimentação desse herbicida entre os dois solos, podendo esse fato estar relacionado à variação de carbono orgânico e, em menor grau, pH entre os solos. De acordo com Mitra et al. (1999), a sorção do isoxaflutole diminui com o decréscimo do teor de matéria orgânica do solo. Esses autores afirmam ainda que a sorção desse herbicida é inversamente relacionada ao aumento do pH do solo, aumentando o potencial de lixiviação em solos mais próximos da neutralidade. Nas amostras de Latossolo Vermelho distrófico, os valores de carbono orgânico e pH (5,2 g dm⁻³ e 4,5, respectivamente) são inferiores aos do Latossolo Vermelho distroférico (16,0 g dm⁻³ e 5,6, respectivamente).

No solo de textura franco-arenosa (Latosolo Vermelho distrófico), a movimentação do isoxaflutole após a aplicação das lâminas de 0 e 20 mm ficou limitada à camada de 0-5 cm. Somente a partir da lâmina de 40 mm é que foi possível detectar a lixiviação do produto, sendo até a camada de 5-10 cm para as lâminas de 40 e 60 mm ou até 15-20 cm para a lâmina de 80 mm (Tabela 3).

Quando foram aplicadas lâminas de chuva de 0 ou 20 mm, foi observado comportamento semelhante em ambos os solos. Entretanto, a partir de 40 mm (Latosolo Vermelho distrófico) ou de 60 mm (Latosolo Vermelho distroférico) de precipitação houve movimentação detectável para 5-10 cm. Na precipitação de 80 mm, a lixiviação do herbicida foi mensurável até a camada de 15-20 cm de profundidade (Tabela 4). Esses resultados reiteram o fato de que houve menor lixiviação do isoxaflutole nas

amostras do solo argiloso, mesmo com a utilização do dobro da dose aplicada no franco-arenoso.

A textura também pode ter contribuído na lixiviação do isoxaflutole. Marchiori Jr. et al. (2005) verificaram maior estabilidade e persistência do efeito residual do isoxaflutole em solo argiloso (Latosolo Vermelho distroférico), quando comparado com solo franco-arenoso (Latosolo Vermelho distrófico), aplicando-se a mesma dose, atribuindo esse fato às diferenças nos teores de carbono orgânico e argila entre os dois solos (10,30 x 3,07 mg dm⁻³ e 72 x 27%, respectivamente para o Latossolo Vermelho distroférico e distrófico). Novo et al. (2005) constataram que a perda da atividade residual de isoxaflutole, em solo argiloso, foi bastante lenta, utilizando batata como plantateste. Nas doses de 75 e 150 g ha⁻¹, o período residual foi de, respectivamente, 84 e 112 dias; na dose de 300 g ha⁻¹, o período residual foi superior a 140 dias.

Por outro lado, o solo franco-arenoso possui características como os sítios sortivos, por exemplo, que conferem menor sorção e, conseqüentemente, maior lixiviação nas amostras. No entanto, trabalhos realizados por Mitra et al. (1999) demonstraram que, em solos com teor de matéria orgânica maior ou igual a 2%, a sorção, a persistência e a mobilidade do isoxaflutole no solo correlacionam-se com o teor de matéria orgânica, e não com a textura. Contudo, em solos tropicais, tipicamente pobres em carbono orgânico, espera-se que a textura seja um dos fatores que mais influenciem o comportamento de herbicidas no solo.

Em solo argiloso, tendo a aveia-preta como cobertura morta, Rodrigues et al. (2000) verificaram que 30% do total de isoxaflutole aplicado (68 g ha^{-1}) foi detectado no solo até 10 cm de profundidade, após 48 mm de precipitação, enquanto os outros 70% poderiam ter ficado retidos na palha ou ter lixiviado para as camadas mais profundas do solo.

Com base nos dados obtidos, as características físicas e químicas dos solos influenciaram a lixiviação dos herbicidas imazapic e isoxaflutole. Ao comparar os solos, a maior movimentação ocorreu naquele de textura franco-arenosa (LVd). Em relação aos herbicidas, o imazapic apresentou maior lixiviação do que o isoxaflutole, fato que pode ser explicado pelas características físico-químicas de cada molécula. Nas amostras de LVd, lâminas de irrigação $\geq 40 \text{ mm}$ foram suficientes para promover a lixiviação desses herbicidas para camadas mais profundas que a superficial (0-5 cm). Para o solo argiloso, esta lâmina foi de 60 mm para isoxaflutole.

Efeito de doses na lixiviação dos herbicidas em colunas de solo

Nas Tabelas 5 e 6 são apresentados os valores médios de biomassa de *B. decumbens* e *C. sativus* nas amostras de Latossolo Vermelho distrófico, após a aplicação de imazapic (65 e 130 g ha^{-1}) e precipitação de 40 mm. No caso de *B. decumbens*, houve movimentação aparente de imazapic até a camada de 10-15 cm para a dose de 65 g ha^{-1} e até a camada de 15-20 cm para a dose de 130 g ha^{-1} (Tabela 5). Esse comportamento indica que a lixiviação foi proporcional à dose aplicada. Com a utilização

de *C. sativus*, a movimentação das moléculas de imazapic foi detectada até a camada de 10-15 cm, em ambas as doses (Tabela 6). Esses resultados ratificam o que já foi observado na determinação de lâmina de água a ser utilizada, quanto ao potencial de lixiviação.

A significativa lixiviação do imazapic com a aplicação de apenas 40 mm de água acontece possivelmente em razão de suas características químicas, as quais conferem às imidazolinonas elevado potencial de lixiviação. Por se tratar de um herbicida iônico, o imazapic comporta-se como ácido fraco em solução, e suas moléculas encontram-se pouco sorvidas em solos com pH acima do pKa (3,9) (Oliveira Jr. et al., 1999; Oliveira, 2001; Inoue et al., 2002). Aliado a esse fato, a retenção das moléculas diminui em solos com baixos teores de argila e matéria orgânica (Vencill, 2002), favorecendo a lixiviação. As biomassas produzidas nas amostras de Latossolo Vermelho distrófico que receberam a aplicação de isoxaflutole (35 e 70 g ha^{-1}) e precipitação de 40 mm encontram-se nas Tabelas 7 e 8. Os resultados indicam que, independentemente da dose ou do bioindicador utilizado, a lixiviação do herbicida foi detectável até a camada de 5-10 cm. Constatou-se, portanto, que, mesmo com elevada dose, a movimentação do herbicida nas colunas restringiu-se à camada de 5-10 cm.

Portanto, independentemente da dose e/ou do bioindicador utilizado, verifica-se que o imazapic apresentou maior movimentação do que o isoxaflutole. Em relação ao bioindicador, *B. decumbens* mostrou maior sensibilidade para detectar a movimentação de imazapic do que *C. sativus*. No entanto, para o isoxaflutole,

Tabela 5 - Acúmulo de biomassa seca ($\text{mg secção de coluna}^{-1}$) da parte aérea das plantas de *B. decumbens* cultivadas em amostras de Latossolo Vermelho distrófico (textura franco-arenosa), provenientes das colunas submetidas à aplicação de imazapic (65 e 130 g ha^{-1})

Dose (g ha^{-1})	Profundidade na coluna (cm)				
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25
65	31,20 Ad	147,50 Ac	200,30 Ab	357,77 Aa	348,93 Aa
130	19,00 Ad	51,70 Bc	134,17 Bb	153,67 Bb	336,37 Aa

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

CV = 9,01%.



Tabela 6 - Acúmulo de biomassa seca (mg secção de coluna⁻¹) da parte aérea das plantas de *C. sativus* cultivadas em amostras de Latossolo Vermelho distrófico (textura franco-arenosa), provenientes das colunas submetidas à aplicação de imazapic (65 e 130 g ha⁻¹)

Dose (g ha ⁻¹)	Profundidade na coluna (cm)				
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25
65	158,73 Ac	219,53 Ab	228,53 Ab	437,20 Aa	431,57 Aa
130	134,87 Ac	194,30 Ab	216,60 Ab	397,67 Aa	438,27 Aa

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

CV = 9,03%.

Tabela 7 - Acúmulo de biomassa seca (mg secção de coluna⁻¹) da parte aérea das plantas de *B. decumbens* cultivadas em amostras de Latossolo Vermelho distrófico (textura franco-arenosa), provenientes das colunas submetidas à aplicação de isoxaflutole (35 e 70 g ha⁻¹)

Dose (g ha ⁻¹)	Profundidade na coluna (cm)				
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25
65	0,00 Ac	139,07 Ab	324,37 Aa	338,77 Aa	317,13 Aa
130	0,00 Ac	116,07 Ab	321,40 Aa	308,33 Aa	317,73 Aa

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

CV = 14,97%.

Tabela 8 - Acúmulo de biomassa seca da parte aérea (mg secção de coluna⁻¹) das plantas de *C. sativus* cultivadas em amostras de Latossolo Vermelho distrófico (textura franco-arenosa), provenientes das colunas submetidas à aplicação de isoxaflutole (35 e 70 g ha⁻¹)

Dose (g ha ⁻¹)	Profundidade na coluna (cm)				
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25
35	0,00 Ac	257,93 Ab	364,77 Aa	402,50 Aa	391,27 Aa
70	0,00 Ac	181,40 Ab	370,17 Aa	353,93 Aa	370,23 Aa

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

CV = 10,16%.

não foram detectadas diferenças significativas no potencial de lixiviação, independentemente da dose e/ou do bioindicador utilizado.

LITERATURA CITADA

CAETANO, L. C. S. et al. Adsorção e lixiviação do herbicida napropamida em dois Latossolos. **Ci. Prática**, v. 19, p. 129-134, 1995.

CARLISLE, S. M.; TREVORS, J. T. Glyphosate in the environment. **Water Air Soil Poll.**, v. 39, n. 3, p.409-420, 1988.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa Produção da Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412 p.

HELLING, C. S. Pesticide mobility in soils. III. Influence of soil properties. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, v. 35, p. 743-748, 1971.

HERNANDEZ, D. D.; ALVES, P. L. C. A.; MARTINS, J. V. F. Influência do resíduo de colheita de cana-de-açúcar sem queima sobre a eficiência dos herbicidas imazapic + pendimethalin. **Planta Daninha**, v. 19, p. 419-426, 2001.



- INOUE, M. H. et al. Calagem e o potencial de lixiviação de imazaquin em colunas de solo. **Planta Daninha**, v. 20, p. 125-132, 2002.
- INOUE, M. H. et al. Atividade residual de diuron, imazapic e isoxaflutole em dois solos de textura contrastante. In: CONGRESSO BRASILEIRO DA CIÊNCIA DAS PLANTAS DANINHAS, 25., 2006, Brasília. **Resumos...** Brasília: Sociedade Brasileira da Ciência das Plantas Daninhas, 2006. p. 130.
- JAVARONI, R. C.; LANDGRAF, M. D.; REZENDE, M. O. O. Comportamento dos herbicidas atrazina e alachlor em solo preparado para o cultivo de cana-de-açúcar. **Química Nova**, v. 22, p. 58-64, 1999.
- LIN, C. H. et al. Determination of isoxaflutole (Balance) and its metabolites in water using solid phase extraction followed by high-performance liquid chromatography with ultraviolet or mass spectrometry. **J. Agric. Food Chem.**, v. 50, p. 5816-5824, 2002.
- LOUX, M. M.; LIEBL, R. A.; SLIFE, F. W. Adsorption of imazaquin and imazethapyr on soils, sediments, and selected adsorbents. **Weed Sci.**, v. 37, p. 712-718, 1989.
- MANGELS, G. Behavior of the imidazolinone herbicides in soil - a review of the literature. In: SHANER, D. L.; O'CONNOR, S. L. (Eds.). **The imidazolinone herbicides**. Boca Raton: CRC, 1991. p.191-209.
- MARCHIORI JR., O. et al. Efeito residual de isoxaflutole após diferentes períodos de seca. **Planta Daninha**, v. 23, p. 491-499, 2005.
- MITRA, S.; BHOWMILK, P. C.; XING, B. Sorption of isoxaflutole by five different soils varying in physical and chemical properties. **Pestic. Sci.**, v. 55, p. 935-942, 1999.
- NOVO, M. C. S. S. et al. Persistência de isoxaflutole em solo argiloso cultivado com batata. **R. Bras. Herb.**, v. 4, p. 39-50, 2005.
- OGNER, G. Glyphosate application in Forest-ecological aspects. II. The quality of water leached from forest soil lysimeters. **Scand. J. For. Res.**, v. 10, p. 469-480, 1987.
- 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. et al. Spatial variability of imazethapyr sorption in soil. **Weed Sci.**, v. 47, p. 243-248, 1999.
- PIRES, N. M. et al. Adsorção e lixiviação de trifluralin e imazaquin em diferentes solos. **R. Ceres**, v. 44, p. 300-304, 1997.
- REGITANO, J. B. et al. Retention of imazaquin in soil. **Environ. Toxicol. Chem.**, v. 16, p. 397-404, 1997.
- ROCHA, W. S. D. et al. Influência do pH na sorção de imazaquin em um Latossolo Vermelho Acriférico. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 24, p. 649-655, 2000.
- RODRIGUES, B. N.; ALMEIDA, F. L. S. **Guia de herbicidas**. 5.ed. Londrina: IAPAR, 2005. 592 p.
- RODRIGUES, B. N.; LIMA, J.; YADA, I. F. U. Retenção pela palhada, de herbicidas aplicados em pré-emergência na cultura do milho, em plantio direto. **R. Bras. Herbic.**, v. 1, p. 123-128, 2000.
- SAEG - **Sistema para Análises Estatísticas**: versão 7.0. Viçosa, MG: Fundação Arthur Bernardes, 1997.
- SANCHEZ-MARTIN, M. J.; CRISANTO, T.; ARIENZO, M. Evaluation of the mobility of C¹⁴-labelled pesticides in soils by thin layer chromatography using a linear analyser. **J. Environ. Sci. Health, Part B**, v. 3, p. 473-484, 1994.
- 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, p. 5-16, 2000.
- SOUZA, A. P. et al. Lixiviação de glyphosate e imazapyr em solos com diferentes texturas e composição química. II. Método analítico. **Planta Daninha**, v. 17, p. 245-262, 1999.
- VENCILL, W. L. (Ed.) **Herbicide handbook**. 8.ed. Lawrence: Weed Science Society of America, 2002. 493 p.
- VIZANTINOPOULOS, S.; LOLOS, P. Persistence and leaching of the herbicide imazapyr in soil. **B. Environ. Contam. Toxicol.**, v. 52, p. 404-410, 1994.
- WEHTJE, G.; DICKENS, R.; WILCUT, J. W. Sorption and mobility of sulfometuron and imazapyr in five Alabama soils. **Weed Sci.**, v. 35, p. 858, 1987.
- 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.

