

SIMULAÇÃO DO MOVIMENTO DE HERBICIDAS UTILIZADOS NO MONOCULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR EM LATOSSOLOS DA ÁREA DE RECARGA DO AQUIFERO BOTUCATU (GUARANI) EM RIBEIRÃO PRETO, SP.

Maria Conceição Peres Young Pessoa¹; Marco Antonio Ferreira Gomes²; Manoel Dornelas de Souza³; Antonio Luiz Cerdeira⁴; Gilberto Nicolella⁵; Anuska Monticelli⁶

RESUMO- Este trabalho apresentou uma análise da dinâmica espaço-temporal da movimentação dos herbicidas atrazina, diuron e tebuthiuron, em Latossolo Vermelho-Escuro argiloso (LEa) e Latossolo Roxo (LR) encontrados na área de recarga do Aquífero Botucatu (Guarani) com cultivo de cana-de-açúcar. O simulador CMLS-94 foi utilizado, inserindo em sua base de dados informações climáticas, dos solos, dos herbicidas e da cultura de cana-de-açúcar tipo soca. O cenário base de simulação contou com um período de quatro anos, apresentando data de corte da cultura no mês de setembro, com aplicação única dos herbicidas um mês após o corte do primeiro ano, nas suas respectivas doses máximas recomendadas, visando analisar-se o pior caso. Os resultados indicaram as seguintes profundidades atingidas pelos herbicidas, em ordem decrescente: a) tebuthiuron em LEa (4,25m), b) tebuthiuron em LR (1,96m), c) atrazina em LEa (1,67 m), d) atrazina em LR (1,18m), e) diuron em LEa (0,71m) e f) diuron em LR (0,40m). As concentrações dos produtos encontradas em tais profundidades não comprometem a qualidade da água do aquífero em discussão, uma vez que a maior concentração remanescente foi de tebuthiuron em LR ($1,2 \cdot 10^{-1}$ kg/ha).

PALAVRAS-CHAVES: simulação; cana-de-açúcar; herbicida; qualidade da água; Latossolo Vermelho-Escuro argiloso, Latossolo Roxo.

“SUGAR CANE HERBICIDES MOVEMENT IN TWO OXISOLS IN THE RECHARGE AREA OF THE BOTUCATU AQUIFER, RIBEIRÃO PRETO, SP.”

ABSTRACT- This paper shows an analysis of the space-time dynamic of the movement of the herbicides atrazine, diuron, and tebuthiuron, clay Dark Red Latosol (DRLc)oxisol and on Dusky Latosol (DL) oxisol found on the Botucatu Aquifer recharge area where sugar cane was cropped. Weather, soil, herbicides, and sugar cane local data were used in CMLS-94 simulator. The basic simulation scenario had a period of four years. The sugar cane harvest and regrowth date was in September and the herbicide applications were done one month later, only in the first year. It was used the maximum rates recommended to each herbicide in order to analyze the worst case. The following depths was reached by the herbicides after the end of the simulation period: a) tebuthiuron in DRLc (4.25m), b) tebuthiuron in DL (1.96m), c) atrazine in DRLc (1.67 m), d) atrazine in DL (1.18m), e) diuron in DRLc (0.71m) and f) diuron in DL (0.40m). The respective concentration of each herbicides (in kg/ha) reached at those depths did not cause risks to the aquifer quality, since the main concentration that remains on soil was reached by tebuthiuron in DL (1.2×10^{-1} kg/ha).

KEY-WORDS: simulation, sugar cane, herbicide, water quality, Dark Red Latosol oxisol; Dusky Latosol oxisol.

¹ Matemática Aplicada; Dr^a em Automação; Pesquisador Embrapa Meio Ambiente (CNPMA)

² Geólogo; Dr. Em Pedologia; Pesquisador Embrapa Meio Ambiente (CNPMA)

³ Eng. Agrônomo; Dr.em Física de Solo; Pesquisador Embrapa Meio Ambiente (CNPMA)

⁴ Eng. Agrônomo; Ph.D.em Fisiologia Vegetal; Pesquisador Embrapa Meio Ambiente (CNPMA)

⁵ Físico; MSc. em Estatística; Pesquisador Embrapa Meio Ambiente (CNPMA)

⁶ Estagiária Embrapa Meio Ambiente (CNPMA), projeto 11.0.94.221

1. INTRODUÇÃO

O estudo da dinâmica de agrotóxicos em solo e água, têm sido apontado como o ponto de partida para a proposição de medidas de intervenção (sejam preventivas ou mitigadoras) nos impactos ambientais negativos provenientes de atividades agrícolas, principalmente aqueles relacionados à contaminação por herbicidas e pesticidas. Particularidades regionais, como temperatura, pluviosidade, solo, além das características próprias dos produtos aplicados, podem favorecer a movimentação mais acentuada desses agrotóxicos no perfil do solo (lixiviação), propiciando que profundidades maiores sejam alcançadas pelos produtos em um período de tempo relativamente curto.

Em especial para as condições brasileiras, os solos geralmente apresentam baixo pH, baixa capacidade de troca catiônica e compactação das subcamadas implicando no aumento da necessidade de uso de fertilizantes e insumos. Também citam-se o uso de herbicidas em áreas de monocultivo intensivo, como as de cana-de-açúcar do Estado de São Paulo, cujo impacto no meio ambiente local é agravado, quando o movimentos desses produtos são direcionados para os mananciais utilizados para consumo humano. Esse é o caso da área da microbacia do Córrego do Espraiado, localizada em Ribeirão Preto, SP. Essa microbacia, por encerrar áreas de recarga e descarga do Aquífero Botucatu (Guarani), o mais importante de toda a região Centro-Sul do país, oferece um risco iminente à qualidade da água subterrânea da região pelas seguintes razões: a) o Aquífero Botucatu abastece toda a população da região; b) conta com área de recarga sob intensa atividade agrícola, com o monocultivo de cana-de-açúcar, onde são aplicados produtos com alta mobilidade; c) possui solos com alta permeabilidade.

Nas áreas de recarga do Aquífero Botucatu no Estado de São Paulo, a exemplo do que ocorre na microbacia do Córrego do Espraiado, predominam solos dos tipos Latossolo Roxo, Latossolo Vermelho-Escuro textura argilosa, Latossolo Vermelho Escuro textura média, Latossolo Vermelho-Amarelo textura média e Areia Quartzosa (MIKLÓS & GOMES, 1996).

Os latossolos são predominantes na área. Suas principais características (MIKLÓS & GOMES, 1996) são descritas a seguir:

a) LATOSSOLO ROXO: Esta classe compreende os solos minerais não hidromórficos vermelho-escuros de tonalidades arroxeadas, resultantes do intemperismo de rochas básicas, basaltos e diabásios, apresentando horizonte B latossólico e elevados teores de óxidos de ferro totais ($Fe_2O_3 \gg 18\%$) e de titânio, estes superiores a 3%. Face aos elevados teores de magnetita e magemita, revelam quando secos e pulverizados, forte atração pelo imã. Esta propriedade é utilizada no campo para diferencia-los do Latossolo Vermelho-Escuro, principalmente porque, do ponto de vista morfológico, são muito semelhantes. A textura, com raras exceções é argilosa ou muito argilosa. São solos profundos, bastante porosos, bem permeáveis, friáveis e de fácil preparo, sendo que as áreas intensamente mecanizadas, a formação de camada adensada a 20-30 cm da superfície se torna frequente, dificultando o enraizamento das plantas e penetração das águas de chuva e irrigação. (OLIVEIRA *et al.*, 1992; MIKLÓS & GOMES., 1996).

b) LATOSSOLO VERMELHO-ESCURO: Esta classe compreende solos minerais não hidromórficos, com horizonte B latossólico de coloração Vermelho-Escura, Vermelho e Bruno-Avermelhado-Escuro e teores de ferro totais superiores a 8% e inferiores a 18%, quando argilosos e usualmente inferior a 8% quando textura média. A textura varia de média até muito argilosa. São solos que apresentam boas condições físicas. Os de textura média, no caso (inferior a 30% de argila), podem apresentar alguma limitação no que se refere a capacidade de retenção de água. A baixa fertilidade, sua limitação mais importante pode ser facilmente corrigida através do manejo adequado do solo (OLIVEIRA *et al.*, 1992; MIKLÓS & GOMES, 1996).

Dentre os latossolos Vermelho-Escuro predominantes na área, o Latossolo Vermelho-Escuro argiloso é dominante na área.

Os herbicidas mais utilizados na cultura de cana, para o combate das ervas daninhas, na região de Ribeirão Preto são: atrazina, diuron, tebuthiuron, simazina e ametrina. Esses químicos são classificados como herbicidas de pré-emergência, pois são empregados antes ou durante a germinação das plantas daninhas, normalmente antes da brotação da cultura. Esses produtos fazem parte do grupo de herbicidas inibidores de fotossíntese, que geralmente, são persistentes no

solo, variando de poucas semanas até dois anos ou mais dependendo do herbicida, da dose aplicada, do tipo de solo, e das condições climáticas. Na área de recarga do aquífero são usados: atrazina, diuron e tebuthiuron.

O processo de adsorção de atrazina está diretamente relacionado aos teores de colóides de argila e matéria orgânica presentes no solo. Esse processo é reversível, dependendo de outros fatores para que ocorra: umidade, temperatura e pH do solo (ALMEIDA & RODRIGUES, 1995).

A atrazina apresenta solubilidade moderada em água (33 ug/ml), embora exiba baixa capacidade de adsorção às partículas do solo, além de prolongada meia vida no solo (60-100 dias), fatores esses, a princípio, que podem favorecer a contaminação da água subterrânea (ALMEIDA & RODRIGUES, 1995). Esses valores de meia vida do produto, corroboram com os valores informados para os solos encontrados na área de estudo, a saber, maior que 180 dias (Dra. Regina Monteiro -CENA-USP, comunicação pessoal). ALMEIDA & RODRIGUES (1995) citam que a persistência do produto é de 5 a 7 meses, nas condições climáticas tropicais e subtropicais, exceto em áreas áridas ou semi-áridas. Entretanto, se usada a altas doses, como esterilizante do solo, a persistência ultrapassa os 12 meses. Essas informações corroboram com os dados do CENA-USP (Dra. Regina Monteiro, comunicação pessoal), que indicam persistência alta para o produto (6 meses) em Latossolos Vermelho-Escuro e Roxo. Ressalta-se, porém que BLANCO & OLIVEIRA (1989) informam que a persistência de atrazina em solos argilosos (Latossolo Roxo) cultivado com cana-de-açúcar, é de 60 dias (2meses) e, portanto, fora da faixa apresentada por ALMEIDA & RODRIGUES (1995).

Não se tem verificado fitotoxicidade nas culturas de soja, feijão, algodão e outras culturas anuais com a atrazina, principalmente devido à sua alta degradabilidade (ALMEIDA & RODRIGUES, 1995). Essa característica, atribuída essencialmente à sua natureza química e à fácil atuação de microrganismos, faz com que a atrazina não atinja grandes profundidades (ALMEIDA & RODRIGUES, 1995). Apesar disso, a atrazina têm sido encontrada em amostras de água da Lousiana e do Iowa e em amostras de água subterrânea da Pensilvânia, de Iowa, de Nebraska, de Wisconsin e de Maryland (US-EPA, 1988; HOWARD, 1989), onde

27% das amostras coletadas apresentavam concentrações de atrazina acima do nível máximo permitido em água para consumo humano naquele país (3ppb). Provavelmente, a baixa atividade biológica e a baixa incidência de luz solar nessas regiões tenham contribuído para maior persistência da atrazina no ambiente, já que ela é facilmente decomposta, tanto por microrganismos quanto pela luz solar. O monitoramento da qualidade da água de poços, realizado durante um período de cinco anos, detectaram atrazina em 1,7% do sistema de água público e em 0,7% dos poços domésticos rurais, onde nesses últimos os níveis detectados algumas vezes excederam o nível máximo de concentração permitido (3ppb) (US-EPA, 1990)

O diuron é adsorvido pelos colóides de argila ou matéria orgânica e por essa razão é pouco lixiviado nos solos argilosos, a exemplo do Latossolo Roxo (ALMEIDA & RODRIGUES, 1995). O diuron é sensível à fotodecomposição e, moderadamente à volatilização, principalmente quando exposto na superfície do terreno por vários dias, sob condições de alta temperatura e baixa umidade (ALMEIDA & RODRIGUES, 1995). A persistência média do produto no solo é de 4 a 8 meses, dependendo do tipo de solo e condições climáticas; as doses altas persistem no solo por mais de uma safra e as doses esterilizantes podem manifestar sintomas de fitotoxicidade por alguns anos (ALMEIDA & RODRIGUES, 1995). Esses valores corroboram com as informações de MUSUMECI et al. (1995) para solos areno-argilosos (onde se incluem a maioria dos Latossolos Vermelho-Escuro) e para solos argilosos (onde se inclui o Latossolo Roxo (LR)), a saber 18 e 20 semanas respectivamente, que estudaram a degradação desse produto em solo e em plantas de cana-de-açúcar. BLANCO & OLIVEIRA (1989), entretanto, apresentaram uma persistência de 60 dias após a aplicação desse produto em solos argilosos (LR) com cultura de cana-de-açúcar. Os coeficientes de adsorção (Kd) e de distribuição (Koc) de diuron foram apresentados por LUCHINI et al. (1988) e por DORNELAS DE SOUZA et al. (1997), esses apresentando os valores para os solos da região em estudo.

O tebuthiuron é um produto adsorvido pelos colóides do solo, especialmente os solos orgânicos. É um herbicida muito solúvel em água, tendo movimentação acentuada em solo úmido, o que favorece sua lixiviação até profundidades maiores no perfil vertical do solo (ALMEIDA & RODRIGUES, 1995). Sua de-

gradação é predominantemente química, embora evidenciadas também degradação microbiana, e não proporciona grandes perdas por fotodecomposição e/ou volatilização. Em termos de persistência no solo, apresenta meia vida de 12 a 15 meses em regiões de queda pluviométrica anual de 1000 a 1500 mm e consideravelmente superior nas mais secas e com teor de matéria orgânica elevada (ALMEIDA & RODRIGUES, 1995). Esses valores corroboram com os apresentados por BLANCO *et al.* (1982), que apresentaram uma meia vida de mais de 365.

Nesse sentido, torna-se fundamental o uso de ferramentas que proporcionem um conhecimento mais amplo do comportamento desses herbicidas no solo, de forma a antecipar situações de alto risco de contaminação.

Uma das técnicas que possibilitam tal visão é a simulação de sistemas. A partir de dados de entrada locais é feito um acompanhamento da dinâmica espaço-temporal do sistema frente a situações presentes no local, ou ainda não evidenciadas, possibilitando uma análise de tendências futuras de seus efeitos no ambiente e assim, a sugestão de tomadas de decisões menos impactantes, além de possibilitar a prioridade de monitoramento dos produtos no local.

O movimento de agrotóxicos no perfil do solo vêm sendo acompanhado por vários simuladores. Entre os mais conhecidos citam-se: CMLS-94 - "Chemical Movement in Layered Soils" (NOFZIGER & HORNSBY, 1994), PRZM- "Pesticide Root Zone Model" (CARSEL *et al.*, 1985) e o GLEAMS- "Groundwater Loading Effects of Agriculture Management System" (LEONARD *et al.*, 1987). Entretanto, frequentemente desconhece-se o comportamento desses simuladores para ambientes tropicais. Dessa forma, essas ferramentas devem ser cuidadosamente utilizadas, uma vez que foram desenvolvidos para outro ambiente.

Assim sendo, este trabalho tem por objetivo apresentar os primeiros resultados obtidos por simulações realizadas no CMLS-94 (HORNSBY & NOFZIGER, 1994), para os herbicidas atrazina, diuron e tebuthiuron lançados nos Latossolos (Roxo e Vermelho-Escuro) com cultivo de cana-de-açúcar na área do Córrego Espreado. A partir desses resultados, foi realizada uma análise de tendências de alto risco de con-

taminação do Aquífero Botucatu e dos lençóis sub-superficiais.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A) ÁREA DE ESTUDO

A microbacia do Córrego do Espreado (4.141 ha) está situada na região norte do Estado de São Paulo na divisa dos Municípios de Ribeirão Preto, Cravinhos e Serrana, sob as coordenadas geográficas 21°05' e 21°20' de latitude sul e 47°40' e 47°50' de latitude oeste. Segundo a classificação de KOPPEN, o clima da região é AW, ou seja, tropical de inverno seco de savana. A temperatura média anual oscila entre 21 e 22 °C com precipitações variando entre 1300 e 1500 mm/ano. A evapotranspiração potencial atinge 1000 mm/ano, com base no método de Thorntwaite. Na parte hidrológica destaca-se a presença do aquífero Guarani (antigo Botucatu), cuja área de recarga ocorre nas áreas de afloramento das formações Botucatu e Pirambóia (GOMES, 1995).

A cultura de cana-de-açúcar tipo soqueira é predominante na área de estudo, abrangendo três quartas partes da área cultivada. Contudo, também estão presentes poucas áreas com pequenas quantidades das culturas de milho, feijão, amendoim, além de pastagem, eucaliptos e pinus. A cana-de-açúcar tipo soqueira apresenta um desenvolvimento inicial rápido tornando-se mais susceptível à ocorrência de ervas daninhas, quando comparada a cana planta (Cargil). Assim, deve-se dispensar uma maior atenção ao controle de ervas daninhas nesse tipo de cultura.

Para efeito desse trabalho, foram analisados os herbicidas atrazina, diuron e tebuthiuron, cujas propriedades e características nos Latossolos Vermelho-Escuro argiloso (LEa) e Roxo (LR) foram obtidas para as condições brasileiras.

B) O SIMULADOR CMLS-94

O CMLS-94 "Chemical Movement in Layered Soils" (NOFZIGER & HORNSBY, 1987) foi elaborado para estudos de movimentos de compostos químicos orgânicos em solo uniforme (homogêneo). O simulador estima a quantidade e a profundidade relativa de cada químico presente no solo, nas mesmas unidades de medidas informadas como dados de entrada, em qualquer instante de tempo, dentro do período estipulado para a simulação.

O programa trabalha com até 20 horizontes de solo, possibilitando o acompanhamento do químico em todas as profundidades, além de facultar ao usuário a entrada dos coeficientes de partição para cada horizonte de solo, assim como especificar o tempo de meia vida para a degradação de químicos de interesse para cada horizonte do solo. O CMLS-94 também apresenta bases de dados de solos e de agrotóxicos, com valores obtidos para os Estados Unidos.

Os dados necessários para a utilização do simulador são:

- a) temperaturas máxima e mínima;
- b) pluviosidade;
- c) coeficientes de distribuição da substância por unidade de carbono orgânico (K_{oc}) e meia-vida dos herbicidas ($t_{1/2}$);
- d) percentagem de carbono orgânico, densidade aparente ($Mg\ m^{-3}$), percentagens volumétricas de água para capacidade de campo, ponto de murcha e saturação, valores esses obtidos para os solos Latossolo Roxo e Latossolo Vermelho Escuro argiloso nas profundidades determinadas pelo usuário;
- e) dados dos coeficientes culturais (K_c) da cana-de-açúcar tipo soca;
- f) recomendações de doses (kg/ha) dos herbicidas pré-emergentes atrazina, diuron e tebutiuron, assim como a época (mês) e pro-

fundidade (cm) de lançamento dos produtos;

C) A SIMULAÇÃO

Os dados climáticos, relativos a um período de quatro anos, foram reorganizados em um arquivo tipo *.W, contendo para cada dia juliano: temperaturas máxima e mínima (em °C) e pluviosidade (em mm) fornecidas para o Município de Ribeirão Preto, pela seção de Climatologia do Instituto Agrônomo de Campinas- SP.

Neste trabalho foram incluídas informações relativas a dois solos que não constavam na base de dados de solos do simulador, a saber, Latossolo Roxo e Latossolo Vermelho-Escuro argiloso. A cultura de cana-de-açúcar tipo soca já havia sido inserida na base de dados em outro trabalho da Embrapa Meio Ambiente, realizado na área com solo tipo Areia Quartzosa do mesmo local de estudo (PESSOA *et al.*, 1998). Os procedimentos para inclusão das informações dos latossolos na base de dados são descritos a seguir: Para cada solo foram fornecidas informações para 8 horizontes com as seguintes profundidades:

- a) 0-10cm; b) 10-20cm; c) 20-30cm; d) 30-40cm; e) 40-50cm; f) 50-60cm; g) 60-70cm; h) 70-80cm.

Para cada uma dessas profundidades forneceram-se as seguintes informações (Tabelas I e II):

TABELA I : Valores de Carbono Orgânico (%), densidade (kg/dm^3) e o conteúdo volumétrico de água para Capacidade de Campo, para Saturação e para o ponto de murcha permanente, para diferentes profundidades do Latossolo Vermelho-Escuro argiloso (LEa).

Profundidades (cm)	CO (%)	ds (kg/dm^3)	CC (%)	PM (%)	S (%)
0-10	1.17	1.17	25.33	13.65	54.55
10-20	1.01	1.40	28.85	12.45	45.91
20-30	0.85	1.48	27.94	13.18	42.74
30-40	0.66	1.33	28.37	13.65	48.56
40-50	0.54	1.25	26.21	13.69	51.73
50-60	0.52	1.23	24.66	14.39	52.26
60-70	0.49	1.18	24.65	14.54	54.37
70-80	0.51	1.15	23.37	14.70	55.25

onde:

- CO: conteúdo de carbono orgânico,
 ds: densidade;
 CC: capacidade de campo;
 PM: ponto de murcha permanente;
 S: ponto de saturação do solo \cong porosidade total;

TABELA II : Valores de Carbono Orgânico (%), densidade (kg/dm³) e o conteúdo volumétrico de água para Capacidade de Campo, para Saturação e para o ponto de murcha permanente, para diferentes profundidades do Latossolo Roxo(LR).

Profundidades (cm)	CO (%)	ds (kg/ dm ³)	CC (%)	PM (%)	S (%)
0-10	1.81	1.19	24.75	17.42	52.92
10-20	1.70	1.26	28.71	17.67	50.04
20-30	1.63	1.25	24.45	17.90	50.58
30-40	1.16	1.34	27.84	18.54	46.79
40-50	0.98	1.29	28.39	18.90	48.77
50-60	0.75	1.23	28.81	19.22	51.12
60-70	0.78	1.22	27.62	19.22	51.48
70-80	0.70	1.13	24.34	19.18	55.27

onde:

CO: conteúdo de carbono orgânico,

ds: densidade;

CC: capacidade de campo;

PM: ponto de murcha permanente;

S: ponto de saturação do solo \equiv porosidade total;

a) percentagem de carbono orgânico, densidade do solo (kg dm⁻³); e

b) conteúdo volumétrico de água (em termos de %) para Capacidade de Campo, para o Ponto de Murcha e para a Saturação.

A cultura de cana-de-açúcar tipo soca foi incorporada à base de dados de culturas do CMLS-94 conforme descrito por PESSOA *et al.* (1998), uma vez que na versão original do simulador esta cultura não se

encontrava disponível. Para tal, foram utilizados os coeficientes culturais (Kc) para sete idades da cultura (em dias) representativas dos seus principais estádios de crescimento, conforme solicitado pelo simulador. O (Kc) representa a relação entre a evapotranspiração da cultura e a evapotranspiração de referência (Et₀) e/ou com a evaporação do tanque classe "A". A cultura de cana-de-açúcar tipo anual (soqueira) apresenta os coeficientes culturais (Kc), segundo PARANHOS (1987) (opção PLANALSUCAR) (Tabela III) .

TABELA III: Valores do Coeficiente Cultural (Kc) para a cultura de cana-de-açúcar (soqueira).

Idade da Cultura (dias)	Estádio de Crescimento	Valores de (Kc) Eta/Etb
1	Plantio até 0,25 de fechamento	0,50
60	0,25 a 0,5 do fechamento	0,65
90	0,5 a 0,75 do fechamento	0,75
120	0,75 até fechamento	0,90
270	máximo desenvolvimento	1,10
300	início da maturação	0,70
360	maturação	0,60

Fonte: PARANHOS, 1987.

Os herbicidas atrazina, diuron, e tebuthiuron, utilizados na cultura de cana-de-açúcar, encontravam-se disponíveis na base de dados de agroquímicos do CMLS-94. Os herbicidas citados acima apresentam suas meia-vidas ($t_{1/2}$) e coeficientes de distribuição (K_{OC}) em uma faixa bem ampla, em função de variações que esses produtos apresentam em diferentes solos e temperaturas. A base de dados do CMLS-94 informa um único valor de valores de K_{OC} e de $t_{1/2}$, médio para a faixa apresentada. Entretanto, esse trabalho utilizou valores encontrados no local ou na região de São Paulo (Tabela IV).

O pior caso foi considerado utilizando-se as doses máximas de ingrediente ativo recomendadas para cada produto. Assim, as doses de princípio ativo utilizadas foram: atrazina- 3,0 kg/ha; diuron- 2,5 kg/ha e tebuthiuron- 1,1 kg/ha.

Cada produto foi simulado separadamente nos dois latossolos, com o mesmo cenário base, para um período de quatro anos.

Ao término do período simulado foram comparadas as profundidades alcançadas (em metros) com

TABELA IV : Valores de K_{OC} (em l/kg) e de $t_{1/2}$ (em dias) para os solos da área de estudo.

PRODUTO	SOLO	K_{OC} (l/kg) ¹	$t_{1/2}$ (dias)
ATRAZINA	LEa	224,3	54 ³
	LR	187,1	180 ²
DIURON	LEa	518,5	126 ⁴
	LR	560,8	140 ⁴
TEBUTHIURON	LEa	76,2	365 ⁵
	LR	138,0	365 ⁵

¹ Fonte: DORNELAS DE SOUZA et al. 1997;

² Fonte: Dra. Regina Monteiro, CENA/USP comunicação pessoal;

³ Fonte: BARRIUSO et al., 1992;

⁴ Fonte: MUSUMECI et al. 1995;

⁵ Fonte: MELO FILHO et al. 1985.

Esses produtos são aplicados superficialmente sobre o solo da cultura e a época dessas aplicações são realizadas em meados de outubro/novembro, período de chuvas na região.

O cenário base de simulação apresentou data de corte em 20 de setembro e data de lançamento dos herbicidas um mês após o corte, conforme é realizado na prática na região em estudo.

a profundidade do lençol freático (40 m) e dos lençóis sub-superficiais (que variam de 0 a 20 m na área de afloramento) e registradas as quantidades remanescentes dos produtos (em kg/ha).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos pelas simulações realizadas são apresentados na Tabela V.

TABELA V: Valores de profundidades (m) e de concentrações dos herbicidas (kg/ha) encontradas ao final do período simulado em Latossolo Roxo(LR)e Latossolo Vermelho-Escuro argiloso (LEa)

SOLOS	ATRAZINA		DIURON		TEBUTHIURON	
	PRO	QTD	PRO	QTD	PRO	QTD
LEa	1,67	$9,2 \cdot 10^{-7}$	0,71	$4,0 \cdot 10^{-3}$	4,25	$1,2 \cdot 10^{-1}$
LR	1,18	$3,3 \cdot 10^{-2}$	0,40	$7,7 \cdot 10^{-3}$	1,96	$1,2 \cdot 10^{-1}$

Onde:

PRO= profundidade (m);

QTD= quantidade de produto (Concentração em kg/ha);

LEa= Latossolo Vermelho-Escuro argiloso;

LR= Latossolo Roxo;

Esses resultados indicam que para o período de quatro anos simulado, nenhum dos produtos atingiriam profundidades comprometedoras ao lençol freático (40 m), e conseqüentemente ao Aquífero Botucatu (Guarani).

O herbicida tebuthiuron registrou as maiores profundidades nos dois tipos de Latossolos examinados: a) Latossolo Roxo (LR) – 1,96 m; b) Latossolo Vermelho-Escuro argiloso (LEa) – 4,23m. Os valores obtidos, quando se usou a atrazina, foram 1,18 m em Latossolo Roxo e 1,67m em Latossolo Vermelho-Escuro argiloso (LEa), enquanto que para diuron foram 0,40 m em Latossolo Roxo e 0,71m em Latossolo Vermelho-Escuro argiloso (LEa).

Naturalmente, o Latossolo Roxo tem maior teor de argila e de matéria orgânica do que o Latossolo Vermelho Escuro argiloso. A matéria orgânica, por exemplo, é evidenciada pelos seguintes valores: 2,02% na camada de 0-10cm e 1,74% na camada de 10-20cm para o LEa e 3,12% na camada de 0-10cm e 2,93% na camada de 10-20cm para o LR. Esses fatores explicam a maior retenção dos herbicidas ocorrida no LR e a conseqüente diminuição de lixiviação para camadas mais profundas, evidenciados pelos valores de profundidade atingidos pelos herbicidas nos dois solos.

A meia-vida ($t_{1/2}$) da atrazina é altamente influenciada pelo pH do solo e pelo seu conteúdo de matéria orgânica (WALKER & BLACKLOW, 1994). Os valores de pH registrados nos dois solos foram baixos, sendo ligeiramente maiores no Latossolo Roxo (EMBRAPA-CNPMA, 1998), conforme o que se segue: a) Latossolo Roxo- 5,4 na profundidade 0-10cm; 5,9 na profundidade de 10-20cm; 6,2 na profundidade de 20-60cm e 6,0 na profundidade 60-80cm; b) Latossolo Vermelho-Escuro argiloso 5,7 na profundidade 0-10cm; 5,9 na profundidade 10-20cm; 6,1 na profundidade de 20-40cm; 5,9 na profundidade de 40-50cm; 5,3 na profundidade de 50-60cm; 5,1 na profundidade de 60-70cm e 5,2 na profundidade 70-80cm. Esses dados sugerem que o comportamento da atrazina não é muito diferente nos dois solos, dadas as condições de semelhança de muitos parâmetros, dentre eles os de pH.

As baixas concentrações de atrazina obtidas em LEa ($9,2 * 10^{-7}$ kg/ha), quando comparado ao valor encontrado em LR ($3,3 * 10^{-2}$ kg/ha), podem ser explicadas

em função dos valores de $t_{1/2}$ do produto registrados para LR (maior que 180 dias, segundo comunicação pessoal da Dra. Regina Monteiro-CENA/USP) e para LE (54 dias, segundo BARRIUSO *et al.*, 1992).

MUSUMECI *et al.* (1995) citam a ausência de resíduos de diuron e de seus metabólitos na calda de cana-de-açúcar, o que poderia ser um indicativo de sua permanência no solo. As baixas concentrações desse produto em solos areno argilosos (tal como os LE) e argilosos (como o LR), sugerem a ação de microrganismos na sua degradação, uma vez que o produto permanece na superfície, onde a concentração de matéria orgânica é maior. LUCHINI (1997) também cita perdas consideráveis ocorridas por volatilização desse produto em solos brasileiros.

Os resultados obtidos pelas simulações indicaram a necessidade de se priorizar o monitoramento de tebuthiuron, que corroboram com os valores de concentrações obtidos em poço artesiano localizado na área de estudo. O monitoramento desse poço, realizado durante dois anos consecutivos (EMBRAPA-CNPMA, 1997), acusou a presença do herbicida tebuthiuron na água, embora em baixas concentrações (média de 0,04 ppb). Esse valor corresponde a 40% do nível considerado crítico pela OMS-Organização Mundial da Saúde, para padrões de potabilidade.

Em razão das dificuldades encontradas para validação do CMLS94 nas condições de campo, estudos de validação do simulador CMLS-94, foram realizados pela EMBRAPA-CNPMA (1998) em colunas de Latossolo Roxo e Latossolo Vermelho-Escuro argiloso da área, para o herbicida tebuthiuron, indicado pelas simulações como o produto que ofereceu maior risco à água subterrânea. Esses estudos apresentaram valores da ordem de 80% e 95,5%, respectivamente, de conformidade entre os resultados de profundidades simulados e observados, e de 94,78% e 101,98%, respectivamente, para os resultados de concentrações observados e simulados, indicando a boa capacidade preditiva desse simulador.

4. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos pelas simulações em um período de quatro anos indicaram que nenhum dos herbicidas atingiriam profundidades comprometedoras do lençol freático (40m).

Entretanto, as informações obtidas apontaram uma movimentação maior do herbicida tebuthiuron no perfil dos solos analisados (4,25m em LEa e 1,96m em LR). A maior concentração final também foi registrada para esse herbicida em ambos solos analisados ($1,2 \cdot 10^{-1}$ kg/ha). Evidenciou-se também concentração elevada de atrazina em LR ($3,3 \cdot 10^{-2}$ kg/ha). Neste sentido, conclui-se que deva ser dada uma atenção maior ao herbicida tebuthiuron.

Ressalta-se que para todos os herbicidas analisados, os maiores valores de profundidade alcançados pelos herbicidas, foram obtidos para o Latossolo Vermelho-Escuro argiloso. Tal fato pode ser explicado pela presença de textura menos argilosa, alta condutividade hidráulica, e menor teor de matéria orgânica, com diminuição acentuada à partir de 15 cm de profundidade nesse tipo de solo. Assim, ocorre com o LEa um favorecimento maior à descida dos agrotóxicos.

Deve-se salientar também que os resultados obtidos neste trabalho não levaram em consideração desuniformidades ou heterogeneidades existentes na área e nem a presença de fendas no solo, que poderiam favorecer o fluxo preferencial dos herbicidas para níveis mais profundos e em menor espaço de tempo. Este problema não é considerado pela maioria dos simuladores disponíveis para o tipo de aplicação abordado por este trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARRIUSO, E.; FELLER, C.H.; CALVET, R.; CERRI, C. Geoderma, Amsterdam: **Elsevier**, 53, pp.155-167, 1992.
- BLANCO, H.G; NOVO, M.C.S.S.; OLIVEIRA, D.A. Atividade residual de herbicidas em solos argilosos na cultura de cana-de-açúcar (*saccharum* sp.): dados de três anos. In: **Congresso brasileiro de herbicidas e ervas daninhas**. 14., Campinas, 1982, **Resumos...** Campinas: SBHED, 1982, p.24-25.
- BLANCO, H.G; OLIVEIRA, D. A. Peristência de ametryne, atrazine, simazine e diuron no solo após aplicações anuais, em cultura de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília: Embrapa-SPI, 24(9): 1161-1168, set. 1989.
- CARSEL, R.F; MULKEY, L.A; LORBER, M.N; BASKIN, L.B. The pesticide root zone model (PRZM): a procedure to evaluating pesticide leaching threats to groundwater. **Ecological Modelling**, v.30, p.49-69, 1985.
- DORNELAS DE SOUZA, M. FERRACINI, V. L.; BOEIRA, R.C.; ZAVATTI, L.S.M.; GOMES, M.AF; MAIA, A.H.N.. Seleção de modelos matemáticos para adsorção de tebuthiuron em dois latossolos e uma areia quartzosa. Jaguariúna : Embrapa-CNPMA, **Circular técnica** , 1998 (prelo).
- EMBRAPA-CNPMA. **Impacto ambiental e aplicações sócio-econômicas da agricultura intensiva em água subterrânea: relatório de andamento de atividades**. Jaguariúna : EMBRAPA-CNPMA, 1997.12 p.
- EMBRAPA-CNPMA. **Impacto ambiental e aplicações sócio-econômicas da agricultura intensiva em água subterrânea: relatório final de atividades**. Jaguariúna : EMBRAPA-CNPMA, 1998. (Projeto 11.0.94.221, relatório final- prelo).
- GOMES, M.A.F. Impacto da agricultura intensiva de cana-de-açúcar sobre as propriedades do solo e da água subterrânea- Estudo de caso em Ribeirão Preto -SP. In: Encontro Nacional da International Association for Impact Assessment - IAIA, 4., 1995, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: Gráfica e Editora Cultura, 1995. p. 383-387.
- HOWARD, P.H. (ed.) **Handbook of environmental fate and exposure data for organic chemicals**. Lewis Publishers, Chelsea, Michigan, 1991
- LEONARD, R.A; KNISEL, W.G; STILL, D. A; GLEAMS: Groundwater Loading Effects of agricultural management systems. **Transactions of ASAE**, St. Joseph, v.30, n.5, p.1403-1418, 1987.
- LUCHINI, L.C. Adsorptive behaviour of herbicides in Brazilian soils. **Arq. Instituto Biológico**, São Paulo, v. 64, n.1, p.43-49, jan/jun 1997.

- LUCHINI, L.C.; WIENDL, F.M.; RUEGG, E.F. Comportamento sortivo de herbicidas em solo. In: 2. Congresso geral de energia nuclear, 1988, **Anais...** 1988, pp. 339-347.
- MELLO FILHO, A T. de; ROCHA, C. L.; SILVA, S. A da; HONDA, T. Estudo de lixiviação e degradação de tebuthiuron em solos dos estados de São Paulo e Alagoas. **Stab**, 2: 47-51, 1985.
- MIKLÓS, A A W; GOMES, M. A F. Levantamento semidetalhado dos solos da bacia hidrográfica do Córrego do Espraiado, Ribeirão Preto- SP. (**Relatório de Consultoria**). 48p. 1996.
- MUSUMECI, M.R; NAKAGAWA, L.E; LUCHINI, L.C; MATALLO, M.B; ANDREA, M.M. de. Degradação do diuron-14C em solo e em plantas de cana-de-açúcar (*saccharum spp*). **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.30, p.775-778, 1995.
- NOFZIGER, D.L; HORNSBY, A G. **CMLS-94- Chemical Movement in Layered Soils. Oklahoma; University of Florida**, 1994. 76p. (Department of Agronomy - University of Florida).
- PARANHOS, S.B. **Cana-de-açúcar - Cultivo e utilização**. Campinas : Fundação Cargil, 1987. 856p. (v1, v2).
- PESSOA, M.C.P.Y; LUCHIARI JR., A ; FERNANDES, E.N.; LIMA M. de. Principais modelos e simuladores usados em análise de impacto ambiental da agricultura. Jaguariúna: Embrapa-CNPMA, 87p., 1997 (**Documentos**, n.8).
- PESSOA, M.C.P.; GOMES, M.A F.; DORNELAS DE SOUZA, M.; CERDEIRA, A L.; NICOLELLA, G.; MONTICELLI, A. Simulação do movimento de herbicidas utilizados no monocultivo de cana-de-açúcar, em latossolos da área de recarga do aquífero Guarani (antigo Botucatu) em Ribeirão Preto, SP. **Revista Científica Rural**, Bagé: URCamp, 16p. 1998 (prelo).
- RODRIGUES, B.N; ALMEIDA, F.S. **Guia de herbicidas**. 3. Ed. Londrina : s.n., 1995. 675p.
- US-EPA. National pesticide survey: atrazine. **Office of water nd office of pesticides and toxic substances**, US EPA, Washington DC., 1990
- USDA-SCS. SCR/ARS/CES **Pesticide properties database: Version 2.0 (Summary)**. USDA-Soil conservation service, Syracuse, NY., 1990.
- VAZ, C.M.P; MACHADO, S.A S; MAZO, L.H; AVACA, L.A; CRESTANA, S. In: 10, Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do solo e da água. **Resumos...** 1995, pp.356-357.
- WALKER, S.R.; BLAKLOW, W.M. Adsorption and degradation of triazine herbicides in soils used for Lupin production in Western Australia: Laboratory Studies and simulation model. **Aust. J. Soil Res.**, n.32, p.1189-1205. 1994.