

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**RECOMENDAÇÃO DE HERBICIDAS NA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR
BASEADA NO POTENCIAL DE SORÇÃO DO SOLO E SEU IMPACTO
ECONÔMICO**

LEANDRO MOREIRA MANZANO

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da UNESP - Câmpus de Botucatu,
para obtenção do título de Mestre em Agronomia
(Energia na Agricultura).

BOTUCATU - SP

Janeiro - 2013

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**RECOMENDAÇÃO DE HERBICIDAS NA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR
BASEADA NO POTENCIAL DE SORÇÃO DO SOLO E SEU IMPACTO
ECONÔMICO**

LEANDRO MOREIRA MANZANO

Orientador: Prof. Dr. José Matheus Yalenti Perosa

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da UNESP - Câmpus de Botucatu,
para obtenção do título de Mestre em Agronomia
(Energia na Agricultura).

BOTUCATU - SP

Janeiro - 2013

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

M286r Manzano, Leandro Moreira, 1984-
Recomendação de herbicidas na cultura da cana-de-açúcar baseada no potencial de sorção do solo e seu impacto econômico / Leandro Moreira Manzano.- Botucatu : [s.n.], 2013
vii, 53 f. : il., color., grafs., tabs.
Dissertação (mestrado)- Universidade Estadual Paulista Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu, 2013
Orientador: José Matheus Yalenti Perosa
Inclui bibliografia
1. Cana-de-açúcar. 2. Herbicidas. 3. Solos - Movimento de herbicidas. I. Perosa, José Matheus Yalenti. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônomicas. III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: "RECOMENDAÇÃO DE HERBICIDAS NA CULTURA DA CANA-
DE-AÇÚCAR BASEADA NO POTENCIAL DE SORÇÃO DO SOLO
E SEU IMPACTO ECONÔMICO"

ALUNO: LEANDRO MOREIRA MANZANO

ORIENTADOR: PROF. DR. JOSÉ MATHEUS YALENTI PEROSA

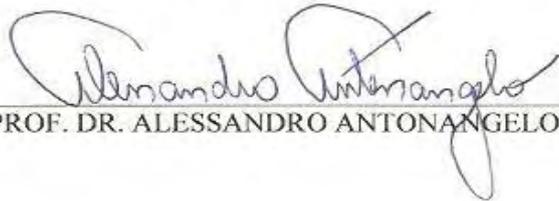
Aprovado pela Comissão Examinadora



PROF. DR. JOSÉ MATHEUS YALENTI PEROSA



PROF. DR. CAIO ANTONIO CARBONARI



PROF. DR. ALESSANDRO ANTONANGELO

Data da Realização: 29 de janeiro de 2013.

Aos meus pais, Paulo Ferreira Manzano e Terezinha Moreira Manzano, pelo amor, compreensão e confiança.

À minha esposa Maria Rosa de Moraes, pelo companheirismo, apoio e amizade.

Ao meu filho Matheus de Moraes Manzano, minha fonte de inspiração.

Aos meus irmãos Renan Moreira Manzano e Mariana Moreira Manzano, por todo o apoio e carinho.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus pela oportunidade da vida.

Ao meu orientador Prof. Dr. José Matheus Yalenti Perosa e co-orientador Prof. Dr. Edivaldo Domingues Velini, pela orientação, amizade, dedicação, apoio e ensinamentos durante todo o mestrado.

Aos meus pais, responsáveis por tudo o que sou hoje.

À minha esposa, Maria Rosa de Moraes, pelo total apoio em todas as minhas decisões.

Ao meu filho, minha mais nova razão de viver.

Aos meus irmãos, pela fundamental participação em meus projetos de vida.

Ao Prof. Dr. Caio Carbonari, pelo valioso apoio durante algumas etapas de desenvolvimento do projeto.

Aos funcionários do Departamento de Economia, Sociologia e Tecnologia.

Aos funcionários do laboratório do Núcleo de Pesquisa Avançadas em Matologia (NUPAM) pela valiosa colaboração.

Ao programa de Pós-graduação em Agronomia / Energia na Agricultura pela oportunidade.

À Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu, pela formação.

Ao CCI, pelo cuidado diário disponibilizado ao meu filho.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq), pela bolsa.

Aos amigos do programa de pós-graduação.

A todas as pessoas envolvidas neste trabalho.

Meus sinceros agradecimentos

SUMÁRIO

| | Página |
|---|---------------|
| SUMÁRIO TABELAS | IV |
| LISTA DE ABREVIATURAS | VI |
| UNIDADES DE MEDIDAS | VII |
| RESUMO | 1 |
| SUMMARY | 2 |
| 1. INTRODUÇÃO | 4 |
| 2. REVISÃO DE LITERATURA..... | 7 |
| 2.1. Setor sucroalcooleiro | 7 |
| 2.2. Mercado de defensivos agrícolas..... | 10 |
| 2.3. Métodos de controle de plantas daninhas | 11 |
| 2.4. Comportamento de herbicidas no solo | 13 |
| 2.5. Impacto ambiental do uso de herbicidas na cultura da cana-de-açúcar..... | 16 |
| 2.6. Impacto econômico do controle de plantas daninhas no canavial | 19 |
| 3. MATERIAL E MÉTODOS | 22 |
| 3.1. Origem e categorização das amostras de solo | 22 |
| 3.2. Categorização dos herbicidas em estudo | 24 |
| 3.3. Extração da solução do solo | 24 |
| 3.4. Análises cromatográficas..... | 26 |
| 3.5. Análise econômica..... | 27 |
| 3.5.1. Estruturação da base de cálculos | 27 |
| 3.5.2. Análise do impacto econômico..... | 28 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 29 |
| 4.1. Resultados da quantificação dos herbicidas em solos com diferentes composições físico/químicas | 29 |
| 4.2. Aprimoramento na recomendação de herbicidas..... | 35 |
| 4.3. Avaliação econômica da recomendação de herbicidas baseada no potencial de sorção do solo..... | 35 |
| 4.3.1. Comparação entre as classificações de solo (convencional e baseada em seu potencial de sorção)..... | 36 |
| 4.3.2. Adequação nas doses dos herbicidas em função da recomendação a partir do potencial de sorção do solo | 41 |
| 4.3.3. Impacto econômico da recomendação baseada no potencial de sorção do solo..... | 43 |
| 4.4. Impacto ambiental da recomendação baseada no potencial de sorção do solo | 45 |
| 5. CONCLUSÕES | 46 |
| 6. REFERÊNCIAS..... | 48 |

SUMÁRIO TABELAS

| | Página |
|--|---------------|
| Tabela 1. Média de produção (milhões toneladas) no período de 1999 a 2009 dos principais países produtores de cana-de-açúcar | 8 |
| Tabela 2. Estimativa de mercado de defensivos (Milhões R\$) e representatividade no mercado (%), respectivamente (dados acumulado de Janeiro a Outubro). | 11 |
| Tabela 3. Amostras de solo do banco de solos e suas características físico-químicas determinadas por análises laboratoriais | 23 |
| Tabela 4. Categorização dos herbicidas estudados | 24 |
| Tabela 5. Etapas para classificação baseada no potencial de sorção do solo e para teste de compatibilidade para o herbicida diuron | 37 |
| Tabela 6. Etapas para classificação baseada no potencial de sorção do solo e para teste de compatibilidade para o herbicida hexazinona | 38 |
| Tabela 7. Etapas para classificação baseada no potencial de sorção do solo e para teste de compatibilidade para o herbicida imazapic | 39 |
| Tabela 8. Compatibilidade entre as amostras classificadas convencionalmente com as classificadas pelo potencial de sorção do solo, para o herbicida diuron | 40 |
| Tabela 9. Compatibilidade entre as amostras classificadas convencionalmente com as classificadas pelo potencial de sorção do solo, para o herbicida hexazinona..... | 40 |
| Tabela 10. Compatibilidade entre as amostras classificadas convencionalmente com as classificadas pelo potencial de sorção do solo, para o herbicida imazapic | 41 |
| Tabela 11. Diferença entre a recomendação do fabricante do herbicida diuron e a baseada no potencial de sorção do solo..... | 42 |
| Tabela 12. Diferença entre a recomendação do fabricante do herbicida hexazinona e a baseada no potencial de sorção do solo..... | 42 |
| Tabela 13. Diferença entre a recomendação do fabricante do herbicida imazapic e a baseada no potencial de sorção do solo..... | 43 |

SUMÁRIO FIGURAS

| | Página |
|--|---------------|
| Figura 1. Panorama nacional do setor sucroalcooleiro, 2011..... | 8 |
| Figura 2. Distribuição geográfica da cultura da cana-de-açúcar no Brasil (UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR - UNICA, 2008a). | 9 |
| Figura 3. Comportamento e destino ambiental dos herbicidas. | 18 |
| Figura 4. Balança analítica Shimadzu (AY220), cartucho plástico com pastilha porosa, cartucho com solo acoplado ao compartimento de coleta e picete de 3 ml, respectivamente...25 | 25 |
| Figura 5. Centrífuga Hettich (Rotanta 460R), tubos de vidro amber (vial 9 mm), respectivamente | 25 |
| Figura 6. Cromatógrafo Líquido (Proeminence UFLC) acoplado ao espectrômetro de massas (3200 Q TRAP) LC-MS/MS. Botucatu/SP, 2012 | 26 |
| Figura 7. Massa do herbicida diuron em solução (% do total aplicado) em função do teor de matéria orgânica (g.dm^{-3}) | 30 |
| Figura 8. Massa do herbicida ametrina em solução (% do total aplicado) em função do teor de matéria orgânica (g.dm^{-3}) | 31 |
| Figura 9. Massa do herbicida hexazinona em solução (% do total aplicado) em função do teor de matéria orgânica (g.dm^{-3})..... | 32 |
| Figura 10. Massa do herbicida amicarbazone em solução (% do total aplicado) em função do teor de matéria orgânica (g.dm^{-3}). | 32 |
| Figura 11. Massa do herbicida sulfentrazone em solução (% do total aplicado) em função do teor de matéria orgânica (g.dm^{-3}). | 33 |
| Figura 12. Massa do herbicida imazapic em solução (% do total aplicado) em função do teor de argila do solo (g.kg^{-1})..... | 34 |

LISTA DE ABREVIATURAS

ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento

FAO – *Food and Agriculture Organization*

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

MAPA – Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento

NUPAM – Núcleo de Pesquisas Avançadas em Matologia

PECEGE – Programa de Educação Continuada em Economia e Gestão de Empresas

SINDAG – Sindicato Nacional da Indústria de Produtos para Defesa Agrícola

ÚNICA – União da Indústria de Cana-de-açúcar do Estado de São Paulo

CaCl₂ – Cloreto de cálcio

C_{org} – Carbono orgânico

COT – Custo Operacional Total

CTC – Capacidade de Troca Catiônica

K_d – Coeficiente de sorção nos colóides do solo

K_{oc} – Coeficiente de sorção padronizado para o carbono orgânico

K_{ow} – Coeficiente de partição octanol-água

MO – Matéria orgânica

p.c. – Produto comercial

pH – Potencial hidrogênionico

PIB – Produto Interno Bruto

SB – Soma de bases

V% – Percentagem por saturação de bases

VPB – Valor de Produção Bruta

pK_a / pK_b – Constante de equilíbrio de ionização de um ácido ou base fraca

UNIDADES DE MEDIDAS

°C – graus Celsius

dm³ – decímetro cúbico

mg – miligramas

g – grama

kg – quilograma

ha – hectare

mm – milímetro

L – litro

μ.L⁻¹ – microgramas por litro

rpm – rotações por minuto

RESUMO

O presente estudo teve por objetivo desenvolver um parâmetro técnico para recomendação de herbicidas na cultura da cana-de-açúcar com base no potencial de sorção do solo e avaliar seu impacto econômico, identificando ainda a correlação do comportamento dos herbicidas com diferentes variáveis encontradas no solo (matéria orgânica e textura). Foram utilizadas 46 amostras de solo do banco de solos do Departamento de Solos e Recursos Ambientais, localizado na FCA/UNESP em Botucatu-SP. Com 4 repetições de 7 gramas, acondicionadas em cartuchos plásticos, procedeu-se as análises de saturação do solo com solução contendo os herbicidas e posterior extração da solução por centrifugação e quantificação do herbicida em solução por espectrofotometria de massa. A avaliação econômica foi baseada na comparação entre a recomendação constante no rótulo dos produtos comerciais e a recomendação estimada a partir do potencial de sorção do solo, elaborada através da distribuição de frequência acumulada das amostras estudadas, classificando-se a fração inicial (0-30%) como solos pesados, a fração intermediária (30-70%) como solos médios e a fração final (70-100%) como solos leves de acordo com o potencial de sorção do solo, partindo-se da premissa de que solos mais leves apresentam menor potencial de sorção e solos mais pesados, maior potencial de sorção. Em seguida as duas recomendações foram comparadas permitindo estimar a variação de dose entre elas e então estimar o impacto econômico da recomendação em estudo. A quantificação de herbicida permitiu gerar modelos de regressão em função dos diferentes teores de matéria orgânica e argila. Os herbicidas ametrina, amicarbazone, diuron, hexazinona, e sulfentrazone apresentaram correlação com o teor de matéria orgânica, já o herbicida imazapic obteve correlação com o teor de argila, havendo em todos os casos uma relação inversamente proporcional entre a concentração da massa de herbicida em solução (%) e os teores de matéria orgânica e argila. A recomendação baseada no potencial de sorção do solo permitiu estimar uma economia na dose dos produtos nas classes de solo leve e médio e um incremento em solos argilosos. Esta subdosagem prescrita pelos fabricantes para solos argilosos implica em possíveis gastos com repasse para novo controle de plantas daninhas. Ambientalmente os resultados apontaram para possíveis impactos ambientais em função do uso excessivo de herbicidas nas classes de solo leve e médio, os quais apresentam maior potencial de lixiviação.

SUMMARY

HERBICIDE RECOMMENDATION AT SUGAR CANE CROP BASED ON SOIL SORPTION POTENTIAL AND ITS ECONOMIC IMPACT. Botucatu, 2013, 53 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia / Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: LEANDRO MOREIRA MANZANO

Adviser: JOSÉ MATHEUS YALENTI PEROSA

This study aimed to develop a technical parameter for recommendation of herbicides in sugar cane based on soil sorption potential and evaluating their economic impact, also identifying the correlation of the behavior of herbicides with different variables found in soil (organic matter and texture). A total of 46 soil samples from the soil bank of the Department of Soil and Environmental Resources, located in the FCA /UNESP, Botucatu-SP. With 4 replicates of 7 grams packaged in plastic cartridges, the analysis of saturation were proceeded with a solution containing the herbicide and subsequent extraction of the solution by centrifugation and quantification of the herbicide in solution for mass spectrometry. The economic evaluation was based on comparing the recommendation contained in the label of commercial products and recommending estimated from the sorption potential of the soil, established by cumulative frequency distribution of the samples studied, classifying the initial fraction (0-30%) as clay soils, intermediate fraction (30-70%) as medium soils and final fraction (70-100%) as sandy soils in accordance with the sorption potential soil, starting from the premise that sandy soils have lower sorption potential and clay soils, greater sorption potential. Then the two recommendations were compared allowing estimate the dose variation between them and then estimate the economic impact of the recommendation in the study. Quantification of herbicide allowed generating regression models for different levels of organic matter and clay. The herbicides ametryn, amicarbazone, diuron, hexazinone, sulfentrazone correlated with organic matter, and imazapic correlation with clay content, there being in all cases an inversely proportional relation between the mass concentration of herbicide in solution (%) and levels of organic matter and clay. The recommendation based on soil sorption potential allowed estimating savings dose products on sandy and medium soil classes and an increase in clay soils. This underdose prescribed by the manufacturers imply possible to pass new spending on weed control. Environmentally results pointed to possible environmental impacts due to the

excessive use of herbicides in sandy and medium soil classes, which present greater potential for leaching.

Keywords: Herbicide, sorption, economic impact.

1. INTRODUÇÃO

A cultura da cana-de-açúcar passou por inúmeras mudanças ao longo dos anos. Contudo, nas últimas décadas, as transformações foram profundas, proporcionando incrementos tanto em área plantada como em produtividade. Este desenvolvimento se apoiou em várias melhorias de ordem agrícola, tecnológica, produtiva, administrativa e comercial, bem como o reaproveitamento dos subprodutos de seus derivados.

O setor é responsável pela geração de milhares de empregos diretos e indiretos, sendo considerado um propulsor do desenvolvimento, fazendo parte da base de sustentação econômica do país, tendo como principal região produtora o Sudeste, com destaque para o estado de São Paulo, o maior produtor nacional.

Este setor vem enfrentando inúmeros desafios referentes ao alcance de uma produção com enfoque sustentável, por se tratar de uma monocultura a qual vem se expandindo progressivamente, muitas vezes sem um monitoramento ambiental adequado.

A preocupação de promover o desenvolvimento sustentável do setor está fortemente atrelada às exigências do mercado internacional, uma vez que o mesmo está adotando medidas regulatórias para o uso e produção de biocombustíveis frente à rápida expansão dos biocombustíveis na matriz energética mundial.

Segundo Perosa (2012) uma das condições necessárias para o desenvolvimento de um mercado internacional de combustíveis de biomassa é a busca por

mecanismos que garantam a sua sustentabilidade. Ainda segundo o autor, o descaso com essas condições favoreceria o consumo de alternativas fósseis, que em sua maioria são mais baratas.

Dentre as medidas necessárias para o desenvolvimento sustentável do setor e enquadramento do mesmo no mercado globalizado, estão as que coíbem o uso irresponsável de defensivos agrícolas, responsáveis pela degradação do meio ambiente. Um forte indício da necessidade de fiscalização nesta área é que ao analisar o cenário de transformações na cultura da cana-de-açúcar sob uma ótica mais compartimentada, observa-se que o setor de defensivos agrícolas acompanhou, paralelamente, a mesma trajetória de crescimento e de avanço tecnológico por se tratar de um agente de apoio ao desenvolvimento da produção.

Segundo a estimativa de mercado realizada anualmente pelo Sindicato Nacional da Indústria de Produtos para Defesa Agrícola (SINDAG) apresentado em relatório pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA – BRASIL, 2012a), o mercado de defensivos agrícolas contabilizou R\$ 14,070 bilhões em 2011, no acumulado de janeiro a outubro, contra R\$ 12,669 bilhões no mesmo período do ano precedente, totalizando um aumento de 11% nas vendas.

No Brasil, a classe de herbicidas é a que tem respondido pelo maior valor das vendas de defensivos agrícolas. Em 2011, foi responsável por 33,9% do faturamento total, ou seja, R\$ 3,45 bilhões (BRASIL, 2012a). Neste segmento, o crescimento foi impulsionado pelos mercados de algodão, arroz e cana-de-açúcar.

Em função da extensa área cultivada e da necessidade de controle de plantas daninhas responsáveis diretas pela limitação do desenvolvimento e produtividade da cultura, a cana-de-açúcar figura entre os principais consumidores de herbicida no mercado nacional e conseqüentemente um forte candidato a agente de degradação do meio ambiente (por exemplo, contaminação de ambientes hídricos) na ausência de práticas adequadas de uso destes produtos. Este fato mostra a real necessidade de uma abordagem criteriosa quanto ao uso e impactos gerados pelos herbicidas.

Com o intuito de minimizar os problemas ligados ao uso de herbicidas, recorre-se ao avanço nas técnicas de aplicação, partindo da premissa de que o uso da tecnologia de aplicação de defensivos agrícolas visa colocar a quantidade certa de ingrediente

ativo no alvo, com a máxima eficiência e da maneira mais econômica possível, afetando o mínimo o ambiente (MATTHEWS, 2002).

Atualmente esta prática conta com diferentes sistemas de aplicação na cultura da cana-de-açúcar. No entanto, frente à necessidade de uso racional dos insumos agrícolas visando menores impactos ambientais da agricultura, inúmeras pesquisas têm sido realizadas buscando compreender o comportamento de herbicidas no solo. Tais estudos podem proporcionar impactos em diferentes pontos do processo produtivo, entre eles ambiental, econômico e energético.

Dadas as considerações precedentes, o trabalho teve como objetivo geral desenvolver um parâmetro técnico para recomendação de herbicidas na cultura da cana-de-açúcar com base no potencial de sorção do solo e avaliar seu impacto econômico.

Mais especificamente pretende-se:

- Identificar correlação do comportamento de herbicidas com diferentes variáveis encontradas no solo (matéria orgânica e textura);

2. REVISÃO DE LITERATURA

Frente aos assuntos levantados na introdução este capítulo irá abordar temas de importância referente ao setor sucroalcooleiro, destacando sua importância econômica no cenário nacional e a necessidade do controle de plantas daninhas sabendo de sua interferência direta na produtividade da cultura. Buscando ainda explicar os impactos que esta prática tem no ambiente uma vez que o controle químico é o mais utilizado e o conhecimento da dinâmica destes produtos no solo é um entrave para sua recomendação.

2.1. Setor sucroalcooleiro

O Brasil destaca-se como líder mundial na produção de cana-de-açúcar, sendo seguido pela Índia, China e outros, segundo dados da *Food and Agriculture Organization* (FAO, 2010), apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Média de produção (milhões toneladas) no período de 1999 a 2009 dos principais países produtores de cana-de-açúcar

| Países | Produção (milhões toneladas) |
|-----------|------------------------------|
| Brasil | 451,670 |
| Índia | 293,732 |
| China | 93,994 |
| Tailândia | 59,558 |
| Paquistão | 50,878 |
| México | 48,552 |
| Colômbia | 37,659 |
| Austrália | 35,165 |

Fonte: FAO (2010)

Segundo o panorama econômico nacional do setor sucroalcooleiro de 2011, apresentado na Figura 1, a produção de álcool foi de 27,6 bilhões de litros e a de açúcar 38,6 milhões de toneladas. Parte desta produção é destinada ao mercado externo, gerando uma receita aproximada de US\$ 15,7 bilhões, o que representa 16,7% das exportações do agronegócio nacional. Os dados ainda mostram que a cultura atingiu um Valor de Produção Bruta (VPB) de R\$ 38,6 bilhões, sendo então responsável por 0,93% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional e 20,03% do PIB agropecuário.

| | |
|----------------------------|---|
| Geração de renda: | PIB Brasil: R\$ 4,143 trilhões PIB Agropecuário: R\$ 192,7 bilhões VBP Cana: R\$ 38,6 bilhões |
| Área cultivada: | 8,3 milhões de hectares (16,8 % da área total) |
| Produção: | 38.675,50 milhões de toneladas de açúcar 27.669.553,9 bilhões de litros de etanol |
| Exportações ¹ : | US\$ 94,32 bilhões (Agronegócio) US\$ 15,77 bilhões (Açúcar e álcool) |

Figura 1. Panorama nacional do setor sucroalcooleiro, 2011

Fonte: BRASIL (2012a), BRASIL (2012b), BRASIL (2011a) e INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE, 2012).

¹ Dados acumulados de fev/2011 a jan/2012.

De acordo com o levantamento da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB – BRASIL, 2011a), o Brasil cultivou, em 2011, aproximadamente, 8,3 milhões de hectares com cana-de-açúcar, com a produção da safra 2011/12 atingindo 571.471 milhões toneladas, com queda de 8,4% em relação à safra 2010/11, que foi de 623,905 milhões de toneladas. As causas foram diversas, mas, o clima foi o principal causador da queda da produção, em consequência das adversidades ocorridas a partir do mês de abril até outubro de 2010, com chuvas escassas em toda a região Centro-Oeste e Sudeste.

As estimativas também indicam que 52,7% da cana-de-açúcar é utilizada na produção de álcool e 47,3% na produção de açúcar, indicativo que pode variar em função dos preços, principalmente os de exportação (BRASIL, 2011a).

A produção de cana-de-açúcar no Brasil se concentra nas regiões Centro-Sul e Nordeste do Brasil, como observado na Figura 2. As áreas em vermelho são os focos de concentração de plantações e usinas produtoras de açúcar, etanol e bioeletricidade.

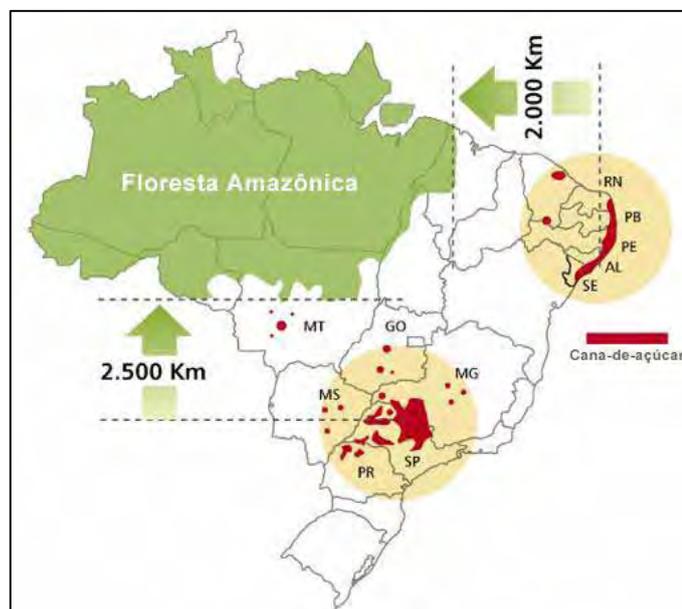


Figura 2. Distribuição geográfica da cultura da cana-de-açúcar no Brasil (UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR - UNICA, 2008a).

O Estado de São Paulo continua sendo o maior produtor com 52,2% (4.370 mil hectares), seguido por Minas Gerais com 8,87% (742,65 mil hectares), Goiás com

8,1% (678,42 mil hectares), Paraná com 7,3% (611,44 mil hectares) Mato Grosso do Sul com 5,70% (480,86 mil hectares), Alagoas com 5,45% (463,65 mil hectares), Pernambuco com 3,89% (326,11 mil hectares). Nos demais Estados produtores as áreas são menores, mas, com bons índices de produtividade (BRASIL, 2011a).

O levantamento feito pela CONAB indicou um aumento de área em todas as regiões. O aumento foi maior na região Centro-Oeste com 27,90%, seguido da região Norte com acréscimo de 13,20%, região Sul com incremento de 8,80%, Sudeste 6,10% e na região Nordeste a área manteve-se estável, com pequena elevação de 1,70% na área colhida (BRASIL, 2011a).

Estes dados reforçam a importância da cadeia produtiva de cana-de-açúcar no cenário nacional e através deles pode-se concluir que o setor gera milhares de empregos diretos e indiretos contribuindo para o crescimento da economia.

Segundo Fredo et al. (2012), em estudo sobre o impacto da mecanização agrícola na geração de empregos no setor sucroalcooleiro no estado de São Paulo, o número de pessoas empregadas na colheita no ano de 2011 totalizou 103,998 milhões. No entanto, em 2007/08 o contingente de trabalhadores era de 210 mil, revelando uma queda de 50,47% como um reflexo do avanço da mecanização agrícola. Ou seja, cada avanço de 1% na mecanização na colheita representou a dispensa de 1.027 trabalhadores. Ainda de acordo com os autores, em 2011 dos 5,3 milhões de hectares colhido, 69,8% foram realizados com o auxílio de máquinas, contra 41,7% na safra 2007/08, havendo, portanto um acelerado processo de substituição da colheita manual pela mecanizada.

2.2. Mercado de defensivos agrícolas

O mercado de defensivos agrícolas movimentou bilhões de dólares anualmente. Segundo dados do MAPA (BRASIL, 2012a), no Brasil, o setor contabilizou R\$ 14,070 bilhões em 2011, contra R\$ 12,669 bilhões em 2010, uma variação de 11%.

Neste mercado, a classe de herbicidas é a que tem respondido pelo maior valor das vendas de defensivos agrícolas em 2010, com 33,4% do faturamento, já em 2011, foi responsável por 32,5% do faturamento total (R\$ 4,57 bilhões) ficando em segundo lugar em volume de vendas (Tabela 2).

Tabela 2. Estimativa de mercado de defensivos (Milhões R\$) e representatividade no mercado (%), respectivamente (dados acumulado de Janeiro a Outubro).

| Segmento | 2010 | | 2011 | |
|-------------|---------------|------|---------------|------|
| | Milhões (R\$) | % | Milhões (R\$) | % |
| Herbicidas | 4.231 | 33,4 | 4.570 | 32,5 |
| Fungicidas | 3.698 | 29,2 | 3.830 | 27,2 |
| Inseticidas | 4.072 | 32,1 | 4.903 | 34,8 |
| Acaricidas | 160 | 1,3 | 191 | 1,4 |
| Outros | 508 | 4,0 | 576 | 4,1 |
| Total | 12.669 | | 14.070 | |

Fonte: BRASIL (2012a).

A queda dos preços dos defensivos agrícolas e o aumento nos preços recebidos de vários produtos agrícolas contribuíram para o bom desempenho do setor de defensivos em 2011.

O setor de inseticidas foi o que mais se destacou no ano de 2011. Os negócios alcançaram variação positiva de 20,4% na comparação com o ano anterior, passando de R\$ 4,072 bilhões para R\$ 4,903 bilhões. Segundo o MAPA a causa foi o crescimento nos mercados de algodão, batata, café, cana-de-açúcar, milho, soja e trigo (BRASIL, 2011b).

A estimativa da indústria de defensivos agrícolas é de que este mercado continue crescendo e os fatores que motivam tal otimismo são: (i) maior investimento em tecnologia nas lavouras; (ii) antecipação de compra nos canais de distribuição; (iii) e as boas cotações de várias *commodities*. Também, espera-se acréscimo na produção da cultura da cana-de-açúcar, tendo em vista os investimentos do segmento na produção de etanol e de açúcar, em função das cotações favoráveis.

2.3. Métodos de controle de plantas daninhas

A cultura da cana-de-açúcar assume importante função dentro do agronegócio nacional, e seu sucesso está estreitamente relacionado com a manutenção das áreas em condições adequadas para o seu cultivo. Ao se tratar de condições ideais de cultivo, deve-se dar grande atenção a problemas relacionados à interferência de plantas daninhas.

A presença dessas plantas pode interferir no processo produtivo da cana-de-açúcar, competindo pelos recursos do meio, principalmente água, luz e nutrientes, liberando substâncias alelopáticas, atuando como hospedeiro de pragas e doenças comuns à cultura e interferindo nas práticas de colheita (PITELLI, 1985).

A época de ocorrência, tamanho populacional e espécies presentes determinam a intensidade da interferência no desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar. A ocorrência de uma elevada população de plantas daninhas no início do desenvolvimento da cultura pode proporcionar perdas acentuadas na produtividade se o controle não for adequado e realizado no momento correto.

A interferência das plantas daninhas não se limita ao comprometimento do desenvolvimento da cultura, mas também por ocasião da colheita. A presença de plantas daninhas continua a causar prejuízos, uma vez que quando o corte da cana-de-açúcar é realizado manualmente e sem a queima prévia, a presença de planta daninha diminui o rendimento do trabalhador e o torna mais vulnerável às picadas de animais peçonhentos.

Na colheita mecanizada da cana-de-açúcar, especialmente na sem queima prévia, a infestação de plantas daninhas diminui o rendimento das colhedoras e eleva o teor de impurezas vegetais e minerais da cana-de-açúcar. A longevidade do canavial, também, diminui quando não se realiza um controle eficiente das plantas daninhas. Por estes motivos, a cultura deve ser mantida livre da competição com plantas daninhas durante todo o seu ciclo (OLIVEIRA et al., 2007).

Há várias formas de se controlar as plantas daninhas, entretanto, as associações mais comuns são de métodos culturais com os mecânicos e os químicos (PROCÓPIO et al., 2003, OLIVEIRA et al., 2007).

Os métodos culturais são práticas que visam tornar a cultura da cana-de-açúcar mais competitiva em relação às plantas daninhas e englobam a redução de espaçamentos de plantio, cultivos intercalares ou rotação de cultura com soja, amendoim, milho e adubos verdes e, o uso de variedades de alto perfilhamento que sombreiam o solo mais rapidamente (PROCÓPIO et al., 2003).

No controle mecânico utilizam-se arados e grades por ocasião da reforma do canavial e este método é de grande eficiência, dependendo da umidade do solo, da radiação solar e das espécies predominantes na área.

Para o controle de planta daninha na entrelinha da cana-de-açúcar são usados cultivadores tratorizados, nas grandes lavouras, e tração animal nas pequenas e médias propriedades. A capina manual, já muito utilizada, hoje se restringe às áreas experimentais. No entanto, o cultivo mecânico apresenta limitações especialmente por não controlar o planta daninha da linha da cana-de-açúcar e, mesmo para o da entrelinha, sua eficiência pode ser grandemente diminuída, dependendo das condições climáticas e das plantas infestantes, como algumas do gênero *brachiaria*, que se multiplicam de forma vegetativa.

O método químico tem sido o mais utilizado tanto por pequenos, quanto médios e grandes produtores, havendo no mercado herbicidas que são utilizados na pré-emergência de plantas daninhas ou na pós-emergência, com as plantas daninhas em estágios iniciais ou muito desenvolvidas. Uma das principais dúvidas em torno da recomendação e aplicação de herbicidas é sobre a dinâmica dos produtos no solo, e os fatores que afetam esta dinâmica (CHRISTOFFOLETI e LÓPEZ-OVEJERO, 2005).

O uso generalizado do método químico de controle das plantas daninhas se deve ao cultivo de grandes áreas, à praticidade, à eficácia e, principalmente, à utilização de menor quantidade de mão-de-obra quando comparado com outros métodos de controle.

Os elevados danos causados pelas plantas daninhas à cultura da cana-de-açúcar ocorrem porque esta cultura apresenta desenvolvimento inicial lento, o que torna longo o período em que o canavial necessita estar livre da interferência das mesmas (PROCÓPIO et al., 2004; KUVA et al., 2000, 2003, 2008). Esse fato também justifica o elevado consumo, nessa cultura, de herbicidas que apresentam longo efeito residual no solo (PROCÓPIO et al., 2004).

2.4. Comportamento de herbicidas no solo

Para entender o comportamento dos herbicidas no solo deve-se lançar mão de conceitos como sorção, termo referente à interação do herbicida no solo. Koskinen e

Harper (1990) caracterizam a adsorção ou sorção como um fenômeno temporário pelo qual determinada substância em solução se fixa a uma superfície sólida ou líquida. A interação entre as forças da superfície coloidal do adsorvente (solo) e do adsorvato (herbicida) promove essa fixação. O aumento ou diminuição da concentração do herbicida na solução do solo varia de acordo com o sentido e a intensidade dessas forças. Esta interação afeta a absorção do herbicida pelas raízes de plantas daninhas e os processos de sua dissipação, tais como: degradação biológica, volatilização, lixiviação e transporte por erosão hídrica (HERWIG et al., 2001).

Segundo Firmino et al. (2008), parte do comportamento apresentado por essas moléculas é explicado pela sorção de herbicidas na superfície dos colóides orgânicos e minerais do solo, dentro das suas diversas classes. Desta forma, é necessário conhecer os fatores que agem sobre estes produtos para então tentar prever o seu comportamento.

A determinação do potencial de sorção de herbicidas e, conseqüentemente, a estimativa do seu efeito residual no solo, é fundamental na previsão da sua persistência, podendo ser estimado por meio de coeficientes. O coeficiente de sorção nos colóides do solo (K_d) é o principal deles, e representa a relação entre a concentração do herbicida sorvido ao solo C_s (mg.g^{-1}) e a concentração do herbicida encontrada na solução de equilíbrio C_w (mg.ml^{-1}), para determinada quantidade do herbicida adicionado. Desta forma, quanto menor este coeficiente, maior é a sua lixiviação potencial. No entanto, a natureza orgânica dos herbicidas e sua alta afinidade pela matéria orgânica, tornam o teor de carbono orgânico do solo o melhor parâmetro isolado para prever o coeficiente de sorção padronizado para o carbono orgânico (K_{oc}) (OLIVEIRA, 2001; CHRISTOFFOLETI e LÓPEZ-OVEJERO, 2005).

A dinâmica dos herbicidas no ambiente é então regida pelos atributos físico, químicos e biológicos do solo, juntamente com as condições ambientais e as características físico-químicas do próprio produto, dentre as quais, Christoffoleti e López-Ovejero (2005) destacam: (i) constante de equilíbrio de ionização de um ácido ou base fraca (pK_a); (ii) coeficiente de partição octanol-água (K_{ow}); (iii) solubilidade em água; e (iv) meia-vida do herbicida no solo.

As constantes de ionização ácido/base (pK_a ou pK_b) mostram o valor de pH onde metade das moléculas estão ionizadas e metade não ionizadas (PROCÓPIO et al.,

2003). Conforme a constante de equilíbrio de ionização, os herbicidas iônicos podem ser classificados em herbicidas ácidos ou herbicidas básicos (OLIVEIRA, 2001; REGITANO et al., 2002).

O coeficiente de partição (K_{ow}) refere-se à medida da intensidade da afinidade da molécula pela fase polar (representada pela água) e apolar (representada pelo 1-octanol). Quanto maior o K_{ow} , maior a adsorção e maior a persistência do herbicida no solo. Em contrapartida, quanto menor o K_{ow} , maior a solubilidade do herbicida e menor sua sorção no solo, favorecendo sua mobilidade.

A solubilidade de um herbicida expressa a quantidade máxima com que este é dissolvido em água, em determinada temperatura, até que ocorra a saturação da solução, sendo seu valor expresso em $mg.L^{-1}$. As moléculas muito solúveis possuem facilidade de se dissiparem no ambiente por fluxo de água e apresentam coeficientes de sorção relativamente baixos no solo. Quanto maior a quantidade de grupos hidrofílicos, maior será sua afinidade pela água, logo, maior sua solubilidade (CHRISTOFFOLETI e LÓPEZ-OVEJERO, 2005).

A persistência de um composto no ambiente é normalmente medida pela meia-vida, que é definida como o tempo necessário para que ocorra a dissipação de metade da quantidade inicial do herbicida aplicado (SILVA et al., 2007).

Conforme citado, a sorção dos herbicidas está correlacionada também com as propriedades do solo, as quais devem ser consideradas nas recomendações de aplicação desses produtos (SILVA et al., 2005). Em uma abordagem sobre solos tropicais, Mancuso et al. (2011) relataram que a dinâmica dos herbicidas no solo é definida pela correlação entre as características inerentes ao mesmo, como o pH, predominância de minerais de argila 1:1 e óxidos de ferro e alumínio, além da presença da matéria orgânica na capacidade de troca catiônica (CTC) total. O tipo e conteúdo de argila, teor e características da matéria orgânica e umidade do solo afetam as interações do herbicida no solo (LEVANON et al., 1993; CZAPAR et al., 1994).

A matéria orgânica apresenta acentuada capacidade de sorver herbicidas (STEVENSON, 1972) e isto reduz a atividade biológica e a mobilidade dos compostos químicos aplicados ao solo (LEE e FARMER, 1989; SCHEUNERT et al., 1992). A pronunciada reatividade da matéria orgânica está relacionada principalmente com sua elevada

área superficial específica e presença de vários grupos funcionais, como carboxilas, hidroxilas e aminas, e estruturas alifáticas e aromáticas (STEVENSON, 1972; STEARMAN et al., 1989; KUCKUK et al., 1997).

Por ser um ambiente dinâmico, não existe um único atributo capaz de ditar a sorção dos defensivos agrícolas no solo. Entretanto, as interações entre os teores de carbono orgânico (C_{org}) e argila, os valores de pH e teores de matéria orgânica devem ser consideradas, para melhor entendimento do seu potencial de sorção.

Em geral, a sorção de herbicidas no solo tem sido relacionada com teores de argila e matéria orgânica. Em estudos sobre sorção do herbicida imazaquin, Regitano et al. (2001) encontraram maior disponibilidade e, portanto, maior potencial de lixiviação em solos com baixos teores de C_{org} e argila e com valores de pH acima de 6,0. Já Inoue et al. (2007) observaram intensa lixiviação do herbicida imazapic em solo Latossolo Vermelho distrófico relacionada, possivelmente, à sua baixa capacidade de sorção, em razão de seu baixo teor de carbono orgânico ($5,2 \text{ g.dm}^{-3}$) e de argila (10%).

Estes estudos apontam para uma dinâmica diretamente proporcional entre o potencial de sorção do solo e seus teores de argila e matéria orgânica, onde os dados revelaram que com o aumento dos teores destes componentes do solo houve um decréscimo na concentração de herbicidas em solução do solo justamente por estarem sorvidos ao solo.

2.5. Impacto ambiental do uso de herbicidas na cultura da cana-de-açúcar

A agricultura mundial apresentou forte evolução ao longo dos anos, tanto em produtividade quanto em área cultivada, acompanhada pelo uso intenso de defensivos agrícolas, os quais tiveram importante participação neste incremento. Novas moléculas químicas surgiram no mercado com características físico-químicas que propiciam funcionalidades diferenciadas e comportamentos ambientais distintos, com grandes alterações nos perfis toxicológicos e ecotoxicológicos, fruto dos avanços tecnológicos e pressões ambientalistas.

Em função de sua extensa área cultivável, o Brasil destaca-se como um dos maiores mercados consumidores de defensivos agrícolas, fato preocupante levando em consideração o alto grau de toxicidade que apresentam alguns produtos e o impacto ambiental

causado pelo mesmo. Esta questão se torna mais importante ainda com a intensificação do uso da água dos rios, o que tem despertado, nos últimos anos, crescente preocupação com o gerenciamento dos corpos hídricos.

Segundo Lima (1990), impacto ambiental pode ser definido como qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causado por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que direta ou indiretamente, afetam a saúde, a segurança e o bem estar da população, as atividades sociais e econômicas, a biota e a qualidade dos recursos ambientais.

Spadotto (2002), em estudo sobre o comportamento ambiental de herbicidas, destaca a importância da lixiviação e o escoamento superficial destes produtos ao considerar os processos de transporte entre compartimentos ambientais, com os quais os herbicidas estão relacionados depois de aplicados em áreas agrícolas. Ainda de acordo com o autor, o escoamento superficial favorece a contaminação das águas superficiais, com o herbicida sendo carregado e adsorvido às partículas do solo erodido ou em solução.

A lixiviação dos herbicidas através do solo tende a resultar em contaminação das águas subterrâneas e neste caso, as substâncias químicas são carregadas em solução juntamente com a água que alimenta os aquíferos.

Segundo Oliveira-Filho e Lima (2002), são inúmeras as consequências observadas quando os defensivos agrícolas atingem corpos hídricos, podendo ser destacadas:

- Toxicidade para organismos aquáticos, comprometendo a cadeia alimentar e a biodiversidade local;
- Acumulação no sedimento ou organismos aquáticos (magnificação biológica), contaminando fontes alimentares do homem;
- Contaminação direta da população humana pelo consumo de água;
- Toxicidade para culturas irrigadas com água contaminada;
- Acumulação em culturas irrigadas com água contaminada.

Estas informações mostram o quão importante é aliar práticas conservacionistas de solos com recomendações adequadas de herbicidas, pois, segundo Guilherme et al. (2000), os solos funcionam como “filtros” químicos e biológicos, reduzindo o impacto ambiental provocado por produtos químicos e evitando que resíduos dos defensivos

agrícolas atinjam as águas superficiais e subsuperficiais. Os fenômenos citados podem ser observados com maior facilidade na Figura 3.

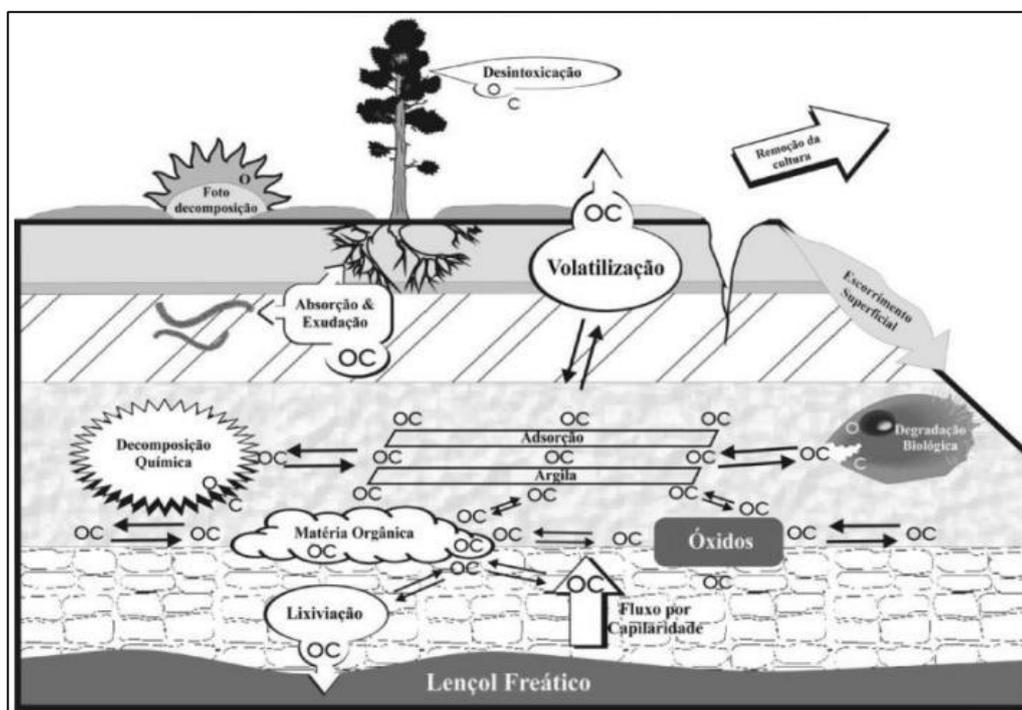


Figura 3. Comportamento e destino ambiental dos herbicidas.

Fonte: adaptado de WEBER e MILLER (1989).

A contaminação de solos e ambientes hídricos pelos defensivos agrícolas varia de acordo com suas propriedades intrínsecas, das características do próprio solo, do método de aplicação e das quantidades de produtos utilizadas (OLIVEIRA-FILHO e LIMA, 2002) e das condições ambientais. Quanto às características dos solos, o que se observa é que solos mais leves ou arenosos são mais suscetíveis a gerar impactos ambientais no que tange a prática de aplicação de herbicidas para o controle de plantas daninhas. Isso porque, em geral, solos com estas características apresentam menor potencial de sorção, disponibilizando, portanto, maior quantidade de herbicida em solução do solo e conseqüentemente elevando o potencial de lixiviação.

Em estudo sobre o uso de defensivos agrícolas em cana-de-açúcar na sub-bacia do rio Corumbataí, De Armas et al. (2005) concluíram que os herbicidas representam a classe de agrotóxicos mais empregada nesta cultura.

A situação é ainda mais agravante quando se verifica que das 33 moléculas de herbicidas registradas no Brasil, descritas pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) para a cultura da cana-de-açúcar, 23 são de ação residual, aplicados em pré-emergência. Muitos apresentam longo poder residual, principalmente aqueles indicados para a cultura plantada no final da época das chuvas (BLANCO et al., 2010).

Blanco et al. (2010) ainda citam que, de acordo com estas informações, a cana-de-açúcar figura como principal cultura que apresenta maior potencial de risco de ocorrência de problemas relacionados à permanência de moléculas de herbicidas no solo, por um período além do desejável, passível de causar contaminação ambiental e toxicidade para culturas sensíveis utilizadas em sucessão à cana-de-açúcar. Este fato se justifica dada a extensão de áreas cultivadas e ainda pela própria característica da cultura que apresenta um ciclo muito longo necessitando do uso de herbicidas com ação residual.

Desta forma, programas de monitoramento ambiental, realizados por meio de estudos de campo bem planejados, são considerados por diversos autores como o melhor procedimento de avaliação, gerando informações que subsidiem ações para minimizar a poluição da água subterrânea (FILIZOLA, et al. 2002; AZEVEDO et al., 2000). Aliado a esta prática está também a necessidade do uso adequado de herbicidas através de recomendações técnicas mais apuradas que proporcionem doses adequadas capazes de combater efetivamente as plantas daninhas e que proporcionem os menores riscos de contaminação ambiental.

2.6. Impacto econômico do controle de plantas daninhas no canavial

Segundo a União da Indústria de Cana-de-açúcar do estado de São Paulo (UNICA), a competitividade do açúcar e do etanol no Brasil resulta das condições climáticas favoráveis à produção, do nível de organização e da tecnologia desenvolvida no setor e não da ação do poder público. Isto porque, com o fim da regulamentação governamental, iniciou-se o regime de livre mercado, sem subsídios, com os preços do açúcar e etanol passando a ser definidos conforme as oscilações de oferta e demanda (UNICA, 2008b).

De acordo com Schmidtke et al. (2005), com a desregulamentação, muitas das funções que antes pertenciam ao governo passaram a ser de responsabilidade das usinas, que sentiram a necessidade de um nível elevado de capacitação tecnológica para garantir a sua sobrevivência no mercado. Os grandes avanços tecnológicos, gerenciais e investimentos na infraestrutura resultaram na redução de custos de produção para o setor.

Dentre os fatores que contribuíram para este avanço no setor pode-se destacar a introdução de novas variedades de cana-de-açúcar desenvolvidas no Brasil, novos sistemas de moagem, uso de vinhaça e torta de filtro como fertilizantes, controle biológico da broca da cana-de-açúcar, otimização das operações agrícolas, autonomia em energia e, mais recentemente, o início da venda de energia excedente e melhor gerenciamento técnico, agrícola e industrial.

Todas essas inovações colaboraram para o aumento da produtividade e competitividade brasileira no setor. Outros aspectos que favorecem o setor são: matéria-prima mais eficiente e mais ecologicamente correta para essa finalidade e a existência no Brasil de terras cultiváveis suficientes para expandir a produção de etanol em proporção significativa para os principais países desenvolvidos. Com isso, o grande diferencial do setor no país é o custo de produção.

Sendo este o grande diferencial do setor, a gestão de custos é de grande relevância para estas organizações, por representar uma significativa racionalização nos processos de produção, com economia de recursos, e por proporcionar melhor resultado financeiro, traduzido em aumento da margem operacional e capacidade de investimento de capital. Desta maneira, a contabilidade de custos pode ser considerada uma importante ferramenta de gestão empresarial ao identificar alternativas para lidar com diferentes situações que possam surgir.

Para que se tenha eficiência e eficácia em uma gestão é essencial que sejam conhecidos os custos ocorridos e suas origens, bem como sua estrutura e impactos no resultado. Nesse sentido, cabe ressaltar a importância para o setor sucroalcooleiro do conhecimento de sua estrutura de custos fixos e variáveis, bem como a análise dessa estrutura, para que possam ser feitas inferências sobre uma gestão de riscos operacionais eficaz buscando melhores resultados.

Mediante a necessidade de controle dos custos, ao planejar o cultivo de uma cultura, é fundamental que os produtores tenham um roteiro bem estruturado, pois toda e qualquer operação acarreta em custo, o qual pode não ser revertido em ganho ao final do ciclo na ausência do planejamento. Menegatti (2006) afirma que a avaliação do empreendimento visando ampliar, reduzir, adotar outras práticas ou sistemas de cultivo, necessita da elaboração da planilha de custos e também da análise do comportamento dos preços do mercado.

São dados de custo de produção que auxiliam o produtor ou empresa na determinação da rentabilidade das atividades agropecuárias, além de possibilitar a determinação de causas ou motivos de possíveis variações dos custos unitários das diferentes explorações ou mesmo de uma determinada exploração em diferentes sistemas de produção. Permite ainda determinar corretamente as exigências físicas dos fatores de produção, bem como um dos elementos mais importantes para a tomada de decisão do produtor ou empresa (NEVES et al., 1986).

Segundo Richetti (2007), os custos de produção são elemento essencial nas ações gerenciais e administrativas da propriedade rural na busca de padrões de qualidade e obtenção de lucro e a elaboração de estimativas de custo de produção tornam-se, para o produtor, ação obrigatória para auxiliar a tomada de decisão, considerando que cada propriedade possui particularidades quanto à área plantada, topografia, níveis tecnológicos, máquinas, equipamentos e aspectos administrativos.

A associação de parâmetros técnicos mais “refinados” e análise do impacto econômico no custo de produção da cultura da cana-de-açúcar é fundamental no gerenciamento e redução dos custos, além de melhorar drasticamente a qualidade da operação.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Origem e categorização das amostras de solo

Para a viabilização do projeto, foram utilizadas amostras de solos armazenadas no banco de solos do Departamento de Solos e Recursos Ambientais, da Faculdade de Ciências Agrônomicas/UNESP, campus de Botucatu, priorizando as amostras armazenadas nos últimos três meses, pois para tal período o laboratório de análise de solos possui amostras estocadas (contraprova).

As informações dos solos contidas no banco de dados do departamento foram categorizadas segundo determinadas variáveis: matéria orgânica e textura, pois trata-se de parâmetros com grande influência no comportamento do herbicida no solo.

Após o rearranjo dessas informações em função de suas variáveis, foram selecionadas 46 amostras de solos (Tabela 3), as quais foram submetidas a procedimentos laboratoriais para determinação da capacidade de sorção de herbicida.

Tabela 3. Amostras de solo do banco de solos e suas características físico-químicas determinadas por análises laboratoriais

| Unidades Amostrais | pH (CaCl ₂) | M.O. (g/dm ³) | SB (mmol/dm ³) | CTC | V% | Textura do solo |
|-----------------------|----------------------------|------------------------------|-------------------------------|-----|----|--------------------|
| 1 | 5,6 | 22 | 44 | 64 | 68 | Argilosa |
| 2 | 5,9 | 20 | 57 | 76 | 75 | Argilosa |
| 3 | 6,0 | 10 | 42 | 58 | 73 | Argilosa |
| 4 | 5,8 | 22 | 55 | 72 | 77 | Argilosa |
| 5 | 4,9 | 19 | 31 | 60 | 51 | Argilosa |
| 6 | 4,5 | 18 | 25 | 80 | 31 | Argilosa |
| 7 | 5,4 | 28 | 53 | 75 | 72 | Argilosa |
| 8 | 5,6 | 24 | 58 | 80 | 72 | Argilosa |
| 9 | 6,1 | 16 | 47 | 63 | 75 | Argilosa |
| 10 | 5,8 | 27 | 66 | 88 | 75 | Argilosa |
| 11 | 6,0 | 15 | 65 | 82 | 79 | Muito Argilosa |
| 12 | 6,0 | 9 | 42 | 56 | 74 | Muito Argilosa |
| 13 | 4,3 | 21 | 14 | 50 | 28 | Argilosa |
| 14 | 4,1 | 16 | 6 | 46 | 14 | Argilosa |
| 15 | 4,2 | 11 | 4 | 34 | 11 | Argilosa |
| 16 | 4,8 | 17 | 12 | 34 | 34 | Média |
| 17 | 4,1 | 13 | 4 | 30 | 12 | Média |
| 18 | 4,4 | 10 | 4 | 27 | 17 | Média |
| 19 | 4,5 | 26 | 15 | 57 | 27 | Média |
| 20 | 4,7 | 16 | 12 | 41 | 29 | Argilosa |
| 21 | 4,3 | 13 | 4 | 39 | 10 | Argilosa |
| 22 | 4,3 | 20 | 10 | 52 | 20 | Argilosa |
| 23 | 4,1 | 19 | 5 | 48 | 11 | Argilosa |
| 24 | 4,3 | 14 | 4 | 31 | 12 | Argilosa |
| 25 | 4,2 | 22 | 15 | 63 | 23 | Argilosa |
| 26 | 4,1 | 19 | 9 | 67 | 14 | Argilosa |
| 27 | 4,0 | 22 | 4 | 97 | 4 | Argilosa |
| 28 | 5,6 | 18 | 51 | 72 | 71 | Argilosa |
| 29 | 5,7 | 10 | 47 | 67 | 70 | Argilosa |
| 30 | 6,0 | 7 | 41 | 57 | 72 | Argilosa |
| 31 | 6,2 | 31 | 91 | 108 | 84 | Argilosa |
| 32 | 5,8 | 23 | 70 | 92 | 76 | Argilosa |
| 33 | 5,8 | 13 | 54 | 73 | 74 | Muito Argilosa |
| 34 | 4,9 | 31 | 58 | 95 | 62 | Arenosa |
| 35 | 4,2 | 11 | 41 | 114 | 36 | Arenosa |
| 36 | 4,8 | 19 | 27 | 51 | 53 | Arenosa |
| 37 | 4,9 | 23 | 43 | 69 | 63 | Arenosa |
| 38 | 4,8 | 29 | 47 | 83 | 57 | Média |
| 39 | 4,6 | 21 | 38 | 67 | 57 | Arenosa |
| 40 | 5,5 | 17 | 35 | 52 | 67 | Arenosa |
| 41 | 5,1 | 10 | 22 | 39 | 56 | Arenosa |
| 42 | 5,3 | 19 | 31 | 53 | 58 | Arenosa |
| 43 | 4,9 | 13 | 21 | 46 | 47 | Arenosa |
| 44 | 5,4 | 14 | 30 | 48 | 61 | Arenosa |
| 45 | 5,1 | 12 | 27 | 47 | 56 | Arenosa |
| 46 | 5,7 | 21 | 34 | 54 | 64 | Arenosa |

3.2. Categorização dos herbicidas em estudo

Nesta pesquisa foram utilizados 6 princípios ativos de herbicidas utilizados na cultura da cana-de-açúcar: ametrina, amicarbazone, diuron, imazapic, hexazinona e sulfentrazone. Estes princípios ativos estão categorizados na Tabela 4, quanto sua solubilidade, constante de ionização e meia vida. Estas características são fundamentais para compreender o comportamento dos herbicidas no solo e servem de aporte para discussões sobre a disponibilidade dos produtos em solução do solo.

Tabela 4. Categorização dos herbicidas estudados

| Princípio ativo | Solubilidade (mg.L ⁻¹) | Constante de ionização (pKa) | Meia vida (dias) |
|----------------------------|------------------------------------|------------------------------|------------------|
| Ametrina ¹ | 200 | 4,1 | 70 a 250 |
| Amicarbazone ² | 4600 | - | 180 |
| Diuron ³ | 42 | Não se ioniza | 118 |
| Imazapic ⁴ | 220 | 3,9 | 120 |
| Hexazinona ³ | 29800 | 1,1 | 115 |
| Sulfentrazone ¹ | 490 | 6,6 | 180 |

Fontes: ¹RODRIGUES e ALMEIDA (2005); ²TOLEDO et al. (2004); ³LANÇAS et al. (2003); ⁴VENCIL (2002).

3.3. Extração da solução do solo

As análises foram realizadas no laboratório do Núcleo de Pesquisas Avançadas em Matologia (NUPAM), o qual está vinculado ao Departamento de Produção e Melhoramento Vegetal, também localizado na Faculdade de Ciências Agrônomicas/UNESP em Botucatu para avaliar o processo de sorção dos diferentes herbicidas e solos. Para a realização deste procedimento, de acordo com metodologia desenvolvida e validada por Carbonari (2009), primeiramente, pesaram-se sete gramas de cada amostra de solo com o auxílio de uma balança analítica da marca Shimadzu (AY220), introduzindo-a em um cartucho plástico com uma pastilha porosa, sendo este conjunto acoplado a um compartimento para coleta da solução do solo, como observado na Figura 4.



Figura 4. Balança analítica Shimadzu (AY220), cartucho plástico com pastilha porosa, cartucho com solo acoplado ao compartimento de coleta e picete de 3 ml, respectivamente.

Posteriormente foi adicionado a solução até a saturação (visual) do solo, com o auxílio de um picete de 3 ml (Figura 4), com uma solução composta de $0,5 \mu.L^{-1}$ dos princípios ativos dos seguintes herbicidas: ametrina, amicarbazone, diuron, hexazinona, imazapic e sulfentrazone. Após a saturação do solo, o conjunto foi pesado novamente para determinar a quantidade exata de solução em cada cartucho contendo solo.

Após a saturação com a solução, os cartuchos com solo permaneceram em descanso reagindo por 24 horas em câmara escura. Após este período a solução do solo foi extraída em cada um dos cartuchos por centrifugação a 4000 rpm, a $25^{\circ} C$ por 5 minutos, em centrífuga da marca Hettich (Rotanta 460R). As soluções foram então extraídas e armazenadas em tubos de vidro amber (vial 9 mm) (Figura 5), para sua posterior análise. Foram realizadas quatro repetições (cartuchos) para cada amostra.



Figura 5. Centrífuga Hettich (Rotanta 460R) e tubos de vidro amber (vial 9 mm), respectivamente

3.4. Análises cromatográficas

Para a realização das análises foi utilizado um sistema LC-MS/MS (Figura 6), composto por um Cromatógrafo Líquido de Alta Eficiência (HPLC), Shimadzu, modelo Proeminence UFLC, que combina análise ultra-rápida e excelente performance de separação, com alta confiabilidade de resultados; equipado com duas bombas LC-20AD, autoinjeter SIL-20AC, degazeificador DGU-20A5, sistema controlador CBM-20A (permite a operação totalmente automatizada) e forno CTO-20AC (para controle da temperatura da coluna).

Acoplado ao HPLC utilizou-se o espectrômetro de massas 3200 Q TRAP (Applied Biosystems), híbrido do tipo triplo quadrupolo, onde Q1 e Q3 são utilizados como filtros de massa e Q2 e como uma célula de colisão onde as moléculas intactas e fragmentos de Q1 são quebrados em fragmentos de massas menores. O modo utilizado nas análises foi o triplo quadrupolo, sendo que Q3 é definido para detectar apenas uma massa especial, que é um fragmento conhecido (filho) da molécula intacta (pai) de massa conhecida filtrada por Q1. Este é o modo quantitativo padrão utilizado para metabólito alvo, tendo como principais vantagens alta sensibilidade e reprodutibilidade, baixo ruído e medição simultânea de até 100 compostos (QUEIROGA, 2009).



Figura 6. Cromatógrafo Líquido (Proeminence UFLC) acoplado ao espectrômetro de massas (3200 Q TRAP) LC-MS/MS. Botucatu/SP, 2012

Após a quantificação do herbicida na solução do solo, os dados foram confrontados com as diferentes variáveis do solo determinadas inicialmente, permitindo assim correlações entre a quantidade de herbicida sorvida e adsorvida no solo com as variáveis já determinadas: matéria orgânica e textura. Este estudo permitiu o desenvolvimento de um parâmetro técnico para o aprimoramento do sistema de recomendação existente no mercado.

3.5. Análise econômica

3.5.1. Estruturação da base de cálculos

O procedimento adotado para análise do impacto econômico na utilização de herbicidas está estruturado a partir da comparação de recomendação de dose em dois tipos de classificação do solo: a recomendação feita pelos fabricantes e outra a partir do potencial de sorção do solo, determinado através de análise laboratorial.

A recomendação feita pelos fabricantes de produtos comerciais prioriza as doses em função da característica física do solo. Nessa recomendação, a classificação utilizada se situa entre solos leve, médio e pesado (ou arenoso, médio e argiloso).

Já a classificação do potencial de sorção, foi estabelecida a partir da distribuição de frequência acumulada deste potencial nas amostras analisadas, classificadas previamente pelo laboratório de Análises de Solos como arenoso, médio e argiloso².

Esta nova classificação parte da premissa de que solos mais pesados apresentam maior potencial de sorção e solos mais leves, menor potencial, fato evidenciado em literatura já citada. Desta maneira, a classificação dos solos foi norteadada pela distribuição de frequência acumulada do potencial de sorção de todas as amostras analisadas.

As amostras de solos foram numeradas de 1 a 46, permitindo assim a distribuição de frequência acumulada. A seguir, os resultados com a disponibilidade dos herbicidas em solução foram classificados em ordem crescente, mantendo sempre a correspondência com a sua amostra de origem. Desta forma, a fração inicial (de 0 a 30%) da

²Três amostras de solos foram classificadas como muito argilosos pelo laboratório de análise de solos do Departamento de Solos e Recursos Ambientais, mas incorporadas na classificação do presente trabalho como argilosos.

distribuição de frequência, que faz correspondência com as amostras com os menores resultados de disponibilidade de herbicida em solução, originou a classificação de solo tipo pesado, segundo o potencial de sorção do solo. A fração intermediária (de 30 a 70%) correspondente com as amostras de solo com média disponibilidade de herbicida em solução deu origem a classificação de solo tipo médio, segundo o potencial de sorção do solo. E finalmente, a fração final da distribuição (de 70 a 100%) correspondente com as amostras com maior disponibilidade de herbicida em solução do solo deu origem a classificação de solo tipo leve, novamente de acordo com o potencial de sorção do solo.

3.5.2. Análise do impacto econômico

O levantamento para analisar o impacto econômico foi realizado da seguinte forma: comparou-se a classificação convencional da amostra de solo com a estabelecida de acordo com seu potencial de sorção. Nos casos em que elas se mostraram compatíveis manteve-se a mesma dose; quando estas classificações diferiram entre si, foram realizados ajustes de doses, prevalecendo a classificação baseada no potencial de sorção.

Este ajuste é realizado da seguinte maneira: se uma amostra de solo foi classificada convencionalmente como leve, mas de acordo com seu potencial de sorção é classificada como média, passa a existir a necessidade de incremento na dose. Nesse caso, ao invés de receber a dose prescrita pelo fabricante para solos do tipo leve, deve-se adicionar a quantidade necessária de produto para que se atinja a prescrição para solos do tipo médio. Este mesmo procedimento foi realizado nos demais casos em que se verificou diferença entre as duas classificações.

As considerações econômicas foram baseadas na comparação entre as duas recomendações permitindo contabilizar reduções ou incrementos nas doses estabelecidas pelo fabricante e nas suas implicações diretas ou indiretas no processo produtivo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Resultados da quantificação dos herbicidas em solos com diferentes composições físico/químicas

Parte dos defensivos agrícolas quando aplicados ao sistema solo-planta fatalmente tem como destino final o solo, independente da época de aplicação ou mesmo do método utilizado, seja diretamente no solo ou na parte aérea das plantas. Em se tratando de herbicidas, ao entrarem em contato com o solo, estes estão sujeitos a processos físico-químicos responsáveis pela sua trajetória no ambiente.

Seguindo a tendência da literatura buscou-se ajustar os modelos de regressão em função do teor de MO. Os modelos foram criados a partir de gráficos de interação entre a porcentagem de massa herbicida (μL^{-1}) presente na solução após a primeira extração em função do teor de MO do solo em questão. Este modelo adotado mostrou-se adequado para os herbicidas: ametrina, amicarbazone, diuron, hexazinona, e sulfentrazone.

Já para o herbicida imazapic, houve a necessidade de ajustar o modelo de regressão em função do teor de argila do solo, uma vez que, de acordo com os dados da pesquisa, não houve correlação positiva da sorção com os teores de MO.

Nas Figuras 7, 8, 9, 10, 11 e 12 são apresentados os resultados das análises dos herbicidas diuron, ametrina, hexazinona, amicarbazone, sulfentrazone e imazapic, respectivamente, na solução do solo (% massa de herbicida na solução do solo) nas diferentes amostras de solo.

Os resultados para o herbicida diuron permitem constatar que houve um declínio na disponibilidade de herbicida (%) na solução do solo com o aumento do teor de MO e aparente estabilização em altos teores de MO. Ou seja, como já citado anteriormente, este composto orgânico apresenta acentuada capacidade de sorver herbicidas reduzindo sua atividade biológica e mobilidade quando aplicados ao solo.

Mallawatanri e Mulla (1992) demonstraram que pelo menos 80% do incremento da sorção observada para metribuzin, diuron e 2,4-D, ao compararem solos com diferentes propriedades, estava relacionado ao aumento do conteúdo de carbono orgânico.

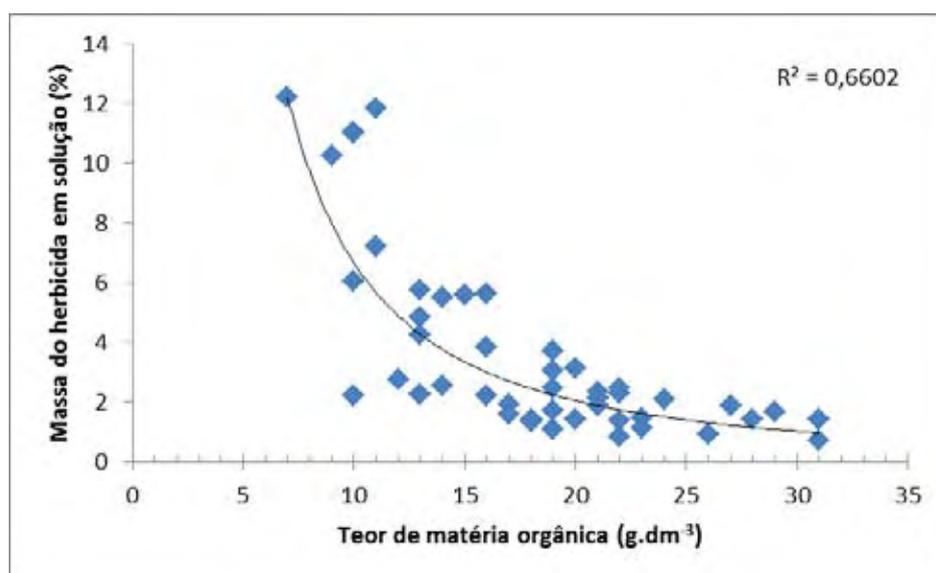


Figura 7. Massa do herbicida diuron em solução (% do total aplicado) em função do teor de matéria orgânica (g.dm⁻³)

Diversos estudos indicaram que o comportamento sortivo do diuron apresenta correlação positiva com os teores de matéria orgânica e CTC do solo (SPURLOCK e BIGGAR, 1994; ROCHA, 2003), sendo que solos com baixos teores de MO apresentam

maior potencial de lixiviação do herbicida, justamente pela maior disponibilidade em solução do solo.

O que se observa também na Figura 7 é a baixa disponibilidade do diuron mesmo nas amostras com os menores teores de matéria orgânica, possivelmente, em função da baixa solubilidade do produto (42 mg.L^{-1}).

A disponibilidade do herbicida ametrina em solução também apresenta declínio com o aumento do teor de MO (Figura 8), no entanto com uma disponibilidade duas vezes superior ao diuron nas amostras com menor teor de MO (em torno de 25%).

A ametrina é um herbicida muito utilizado em cana-de-açúcar e tem como característica ser pouco móvel no perfil do solo, sendo muito sorvido por colóides orgânicos e minerais. Sua sorção pelos colóides é influenciada pelo pH e teor de MO (SILVA et al., 2007).

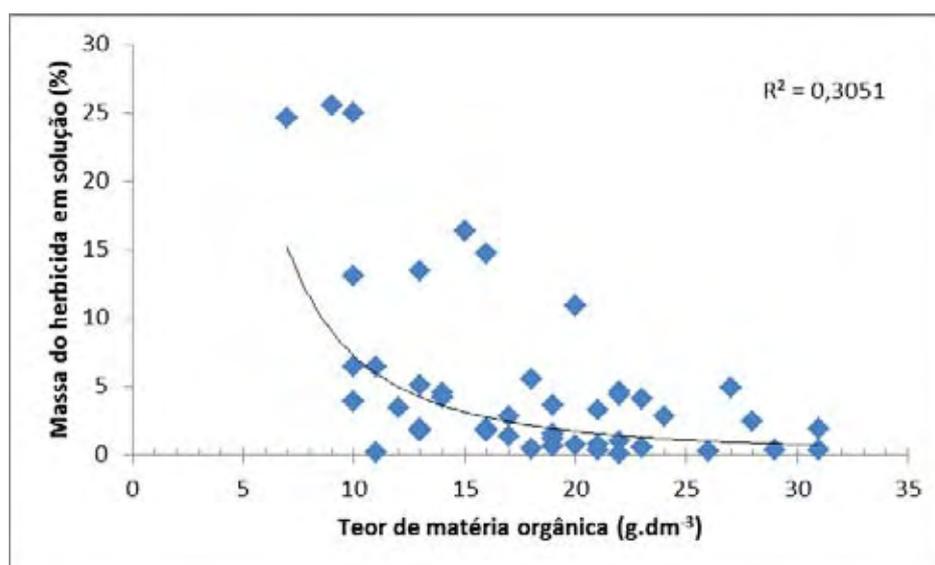


Figura 8. Massa do herbicida ametrina em solução (% do total aplicado) em função do teor de matéria orgânica (g.dm^{-3})

Comportamentos semelhantes foram observados nos resultados dos herbicidas, hexazinona e amicarbazone, os quais apresentaram a mesma tendência de declínio dos herbicidas anteriores com a diferença de uma maior disponibilidade do produto

encontrado em solução no solo nos diferentes teores de MO estudados, como observado nas Figuras 9 e 10.

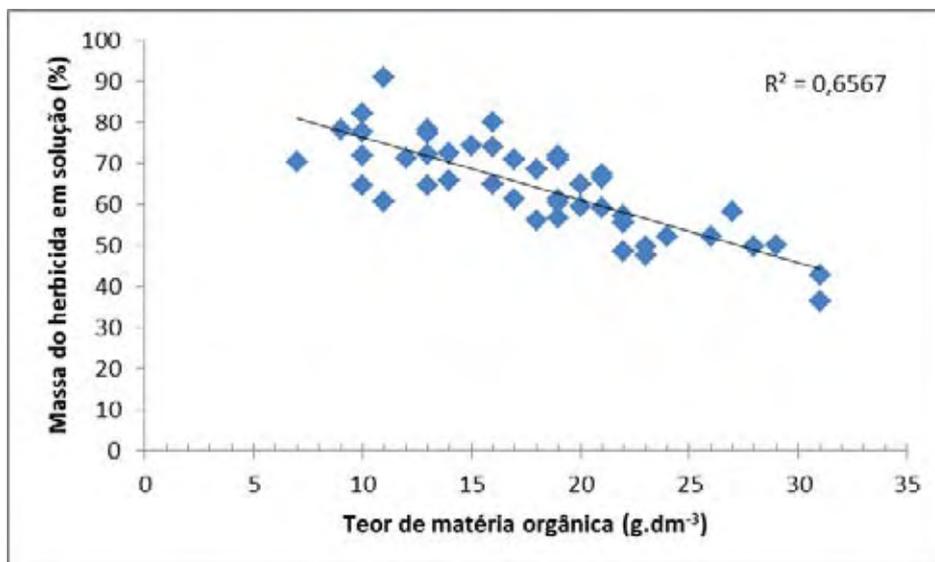


Figura 9. Massa do herbicida hexazinona em solução (% do total aplicado) em função do teor de matéria orgânica (g.dm⁻³).

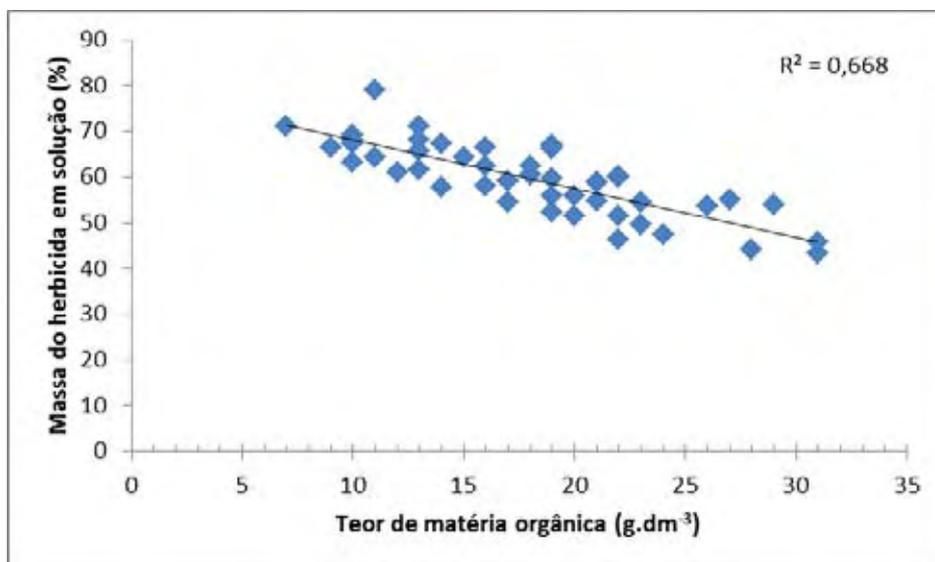


Figura 10. Massa do herbicida amicarbazone em solução (% do total aplicado) em função do teor de matéria orgânica (g.dm⁻³).

Os resultados para os herbicidas hexazinona e amicarbazone mostram, ainda, certa semelhança em seus comportamentos quando aplicados ao solo, ou seja, uma alta disponibilidade nas amostras de solos com baixo teor de MO, declinando para aproximadamente 40% nas amostras com os maiores teores de MO.

A maior disponibilidade dos herbicidas hexazinona e amicarbazone em solução do solo também pode ser explicada por suas altas solubilidades em água. Dentre os herbicidas estudados, os dois apresentam os maiores valores de solubilidade, 29.800 e 4.600 mg.L⁻¹, respectivamente.

Já os resultados para o herbicida sulfentrazone apresentados na Figura 11 mostram comportamento semelhante aos herbicidas hexazinona e amicarbazone, no entanto o decréscimo da disponibilidade de herbicida em função do incremento dos teores de MO é maior chegando próximo a 15% em teores superiores a 30 g/dm³.

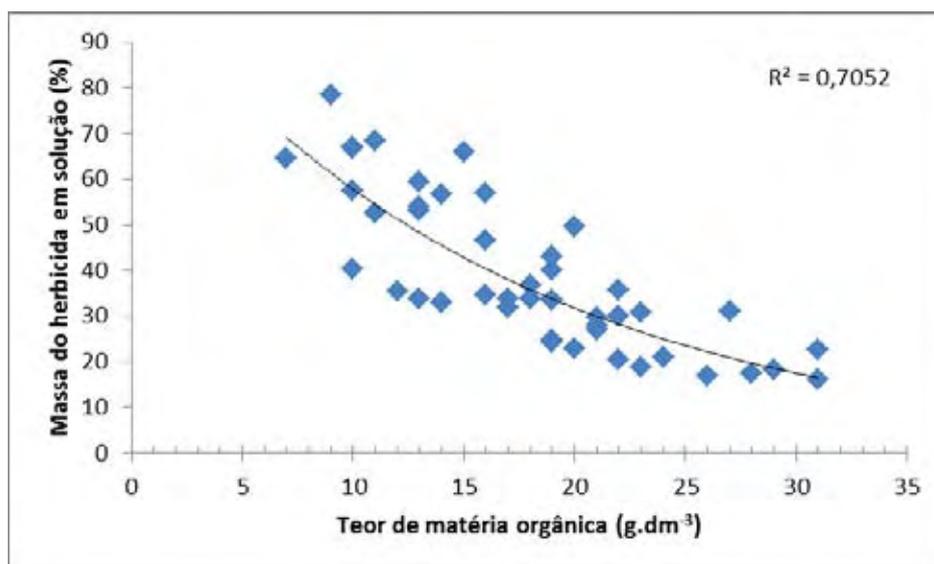


Figura 11. Massa do herbicida sulfentrazone em solução (% do total aplicado) em função do teor de matéria orgânica (g.dm⁻³).

Como citado anteriormente, o ajuste do modelo de regressão para o herbicida imazapic (Figura 12) ocorreu em função do teor de argila do solo, uma vez que, de acordo com os dados da pesquisa, não houve interação positiva com os teores de MO.

Para o herbicida imazapic, as variáveis disponibilidade de herbicida na solução do solo e teor de argila no solo são inversamente proporcionais, como mostra a Figura 12, onde em solos com baixos teores de argila observam-se altas concentrações do herbicida na solução do solo com posterior decréscimo nesta concentração em função do incremento do teor de argila.

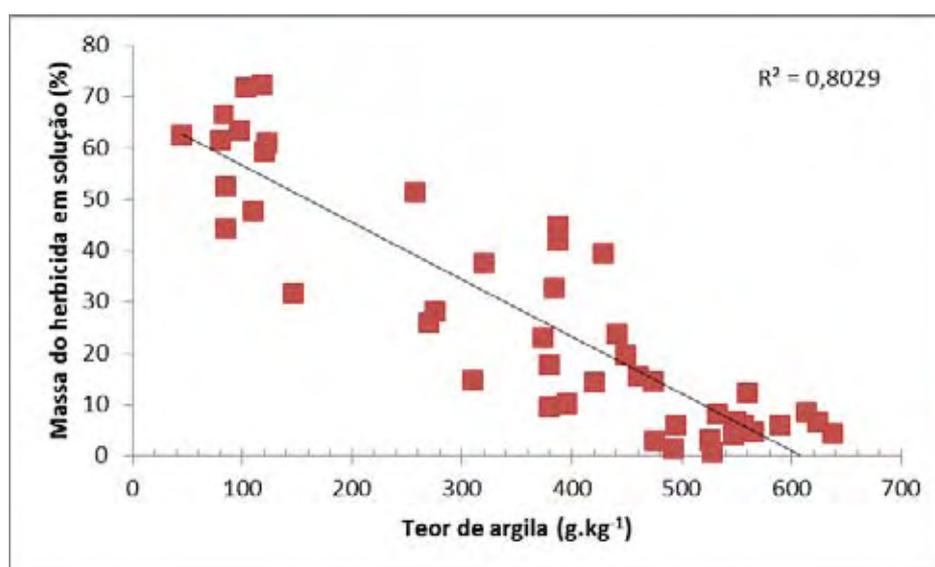


Figura 12. Massa do herbicida imazapic em solução (% do total aplicado) em função do teor de argila do solo (g.kg⁻¹).

A adsorção das imidazolinonas (grupo no qual se insere o imazapic) pelos solos é altamente influenciada pelos teores de matéria orgânica, sendo que os solos com maiores teores de argila ou matéria orgânica requerem maiores doses dos produtos (MILLER e WESTRA, 1998; LÓPEZ-OVEJERO et al., 2009).

Mesmo apresentando baixos valores de coeficientes de correlação (R^2), o qual mede a proporção da variabilidade da massa de herbicida em solução (%) que é explicada pelos teores de matéria orgânica (ametrina, amicarbazone, diuron, hexazinona e sulfentrazone) e argila (imazapic) os modelos apresentaram uma tendência de comportamento, no qual se vê um decréscimo da massa de herbicida em função do incremento nos teores destes compostos.

4.2. Aprimoramento na recomendação de herbicidas

A recomendação dos herbicidas, de acordo com os rótulos dos produtos comerciais, é dada conforme parâmetros de classificação de solos. No entanto, tais denominações não seguem critérios específicos de classificação, tornando difícil sua compreensão.

A preocupação com uma especificação da classificação mais adequada dos solos está na forte correlação entre as propriedades físico/químicas do solo com o comportamento dos herbicidas neste ambiente. De acordo com os resultados desta pesquisa apresentados anteriormente, nota-se que a disponibilidade dos herbicidas estudados em solução do solo está diretamente relacionada com o teor de MO, com exceção do herbicida imazapic, o qual apresenta forte correlação com o teor de argila. Estes dados contrariam a maioria dos rótulos dos produtos comerciais que preconizam suas doses de acordo com a textura do solo.

Para maior confiabilidade de determinação de doses, os parâmetros utilizados devem ser fracionados de modo a permitir um detalhamento de classificação dentro das diferentes classes. Este procedimento se faz necessário, pois de acordo com os gráficos expostos anteriormente nota-se que existem necessidades diferentes de adequação de dose ao longo da variação nos teores dos parâmetros estudados.

4.3. Avaliação econômica da recomendação de herbicidas baseada no potencial de sorção do solo

Estas análises foram feitas utilizando os seguintes herbicidas: diuron, hexazinona e imazapic, sendo os dois primeiros representantes do grupo com correlação com o teor de MO e o último tendo correlação com o teor de argila.

Os herbicidas diuron e hexazinona foram selecionados por serem dois extremos em termos de solubilidade, 42 e 29.800 mg.L⁻¹, respectivamente. Já o herbicida imazapic foi selecionado justamente por sua correlação positiva com o teor de argila.

4.3.1. Comparação entre as classificações de solo (convencional e baseada em seu potencial de sorção)

De acordo com os fabricantes dos produtos comerciais selecionados, o produto deve ser manejado na cultura da cana-de-açúcar de acordo com o tipo de solo, aqui padronizado como leve, médio e pesado, por ser mais comumente mais usado. As etapas para o procedimento podem ser observadas nas Tabelas 5, 6 e 7.

Tabela 5. Etapas para classificação baseada no potencial de sorção do solo e para teste de compatibilidade para o herbicida diuron

| Amostras | Classificação convencional do solo | Massa de herbicida na solução do solo (μL^{-1}) (média) | Frequência acumulada (%) | Classificação baseada no potencial de sorção do solo | Teste de compatibilidade (1= sim e 0 = não) |
|----------|------------------------------------|--|--------------------------|--|---|
| | | 0,000 | 0,000 | | |
| 1 | Pesada | 0,712 | 2,174 | Pesada | 1 |
| 2 | Pesada | 0,841 | 4,348 | Pesada | 1 |
| 3 | Média | 0,940 | 6,522 | Pesada | 0 |
| 4 | Leve | 1,112 | 8,696 | Pesada | 0 |
| 5 | Leve | 1,159 | 10,870 | Pesada | 0 |
| 6 | Pesada | 1,349 | 13,043 | Pesada | 1 |
| 7 | Pesada | 1,373 | 15,217 | Pesada | 1 |
| 8 | Pesada | 1,418 | 17,391 | Pesada | 1 |
| 9 | Leve | 1,421 | 19,565 | Pesada | 0 |
| 10 | Pesada | 1,423 | 21,739 | Pesada | 1 |
| 11 | Pesada | 1,441 | 23,913 | Pesada | 1 |
| 12 | Pesada | 1,477 | 26,087 | Pesada | 1 |
| 13 | Leve | 1,602 | 28,261 | Pesada | 0 |
| 14 | Média | 1,687 | 30,435 | Média | 1 |
| 15 | Leve | 1,706 | 32,609 | Média | 0 |
| 16 | Pesada | 1,874 | 34,783 | Média | 0 |
| 17 | Leve | 1,898 | 36,957 | Média | 0 |
| 18 | Média | 1,944 | 39,130 | Média | 1 |
| 19 | Pesada | 2,101 | 41,304 | Média | 0 |
| 20 | Leve | 2,141 | 43,478 | Média | 0 |
| 21 | Pesada | 2,218 | 45,652 | Média | 0 |
| 22 | Leve | 2,230 | 47,826 | Média | 0 |
| 23 | Leve | 2,252 | 50,000 | Média | 0 |
| 24 | Pesada | 2,316 | 52,174 | Média | 0 |
| 25 | Pesada | 2,331 | 54,348 | Média | 0 |
| 26 | Pesada | 2,463 | 56,522 | Média | 0 |
| 27 | Pesada | 2,469 | 58,696 | Média | 0 |
| 28 | Leve | 2,549 | 60,870 | Média | 0 |
| 29 | Leve | 2,763 | 63,043 | Média | 0 |
| 30 | Pesada | 3,050 | 65,217 | Média | 0 |
| 31 | Pesada | 3,114 | 67,391 | Média | 0 |
| 32 | Pesada | 3,711 | 69,565 | Média | 0 |
| 33 | Pesada | 3,851 | 71,739 | Leve | 0 |
| 34 | Pesada | 4,270 | 73,913 | Leve | 0 |
| 35 | Média | 4,842 | 76,087 | Leve | 0 |
| 36 | Pesada | 5,494 | 78,261 | Leve | 0 |
| 37 | Pesada | 5,580 | 80,435 | Leve | 0 |
| 38 | Pesada | 5,608 | 82,609 | Leve | 0 |
| 39 | Pesada | 5,741 | 84,783 | Leve | 0 |
| 40 | Pesada | 6,024 | 86,957 | Leve | 0 |
| 41 | Leve | 7,202 | 89,130 | Leve | 1 |
| 42 | Pesada | 10,248 | 91,304 | Leve | 0 |
| 43 | Pesada | 11,008 | 93,478 | Leve | 0 |
| 44 | Média | 11,036 | 95,652 | Leve | 0 |
| 45 | Pesada | 11,841 | 97,826 | Leve | 0 |
| 46 | Pesada | 12,197 | 100,000 | Leve | 0 |

Tabela 6. Etapas para classificação baseada no potencial de sorção do solo e para teste de compatibilidade para o herbicida hexazinona

| Amostras | Classificação convencional do solo | Massa de herbicida na solução do solo (μL^{-1}) (média) | Frequência acumulada (%) | Classificação baseada no potencial de sorção do solo | Teste de compatibilidade (1 = sim e 0 = não) |
|----------|------------------------------------|--|--------------------------|--|--|
| | | 0,000 | 0,000 | | |
| 1 | Pesada | 36,450 | 2,174 | Pesada | 1 |
| 2 | Leve | 42,684 | 4,348 | Pesada | 0 |
| 3 | Pesada | 47,455 | 6,522 | Pesada | 1 |
| 4 | Pesada | 48,601 | 8,696 | Pesada | 1 |
| 5 | Leve | 49,682 | 10,870 | Pesada | 0 |
| 6 | Pesada | 49,731 | 13,043 | Pesada | 1 |
| 7 | Média | 50,064 | 15,217 | Pesada | 0 |
| 8 | Pesada | 51,949 | 17,391 | Pesada | 1 |
| 9 | Média | 52,218 | 19,565 | Pesada | 0 |
| 10 | Pesada | 55,511 | 21,739 | Pesada | 1 |
| 11 | Pesada | 55,980 | 23,913 | Pesada | 1 |
| 12 | Leve | 56,743 | 26,087 | Pesada | 0 |
| 13 | Pesada | 56,934 | 28,261 | Pesada | 1 |
| 14 | Pesada | 57,191 | 30,435 | Média | 0 |
| 15 | Pesada | 58,199 | 32,609 | Média | 0 |
| 16 | Leve | 59,160 | 34,783 | Média | 0 |
| 17 | Pesada | 59,351 | 36,957 | Média | 0 |
| 18 | Leve | 60,369 | 39,130 | Média | 0 |
| 19 | Leve | 60,687 | 41,304 | Média | 0 |
| 20 | Pesada | 61,132 | 43,478 | Média | 0 |
| 21 | Leve | 61,260 | 45,652 | Média | 0 |
| 22 | Pesada | 64,440 | 47,826 | Média | 0 |
| 23 | Pesada | 64,504 | 50,000 | Média | 0 |
| 24 | Pesada | 64,718 | 52,174 | Média | 0 |
| 25 | Pesada | 64,919 | 54,348 | Média | 0 |
| 26 | Leve | 65,585 | 56,522 | Média | 0 |
| 27 | Leve | 66,402 | 58,696 | Média | 0 |
| 28 | Pesada | 67,204 | 60,870 | Média | 0 |
| 29 | Pesada | 68,414 | 63,043 | Média | 0 |
| 30 | Pesada | 70,165 | 65,217 | Média | 0 |
| 31 | Pesada | 70,766 | 67,391 | Média | 0 |
| 32 | Média | 70,968 | 69,565 | Média | 1 |
| 33 | Leve | 71,253 | 71,739 | Leve | 1 |
| 34 | Pesada | 71,756 | 73,913 | Leve | 0 |
| 35 | Leve | 71,883 | 76,087 | Leve | 1 |
| 36 | Leve | 72,095 | 78,261 | Leve | 1 |
| 37 | Pesada | 72,328 | 80,435 | Leve | 0 |
| 38 | Pesada | 73,723 | 82,609 | Leve | 0 |
| 39 | Pesada | 74,261 | 84,783 | Leve | 0 |
| 40 | Pesada | 77,290 | 86,957 | Leve | 0 |
| 41 | Pesada | 77,419 | 89,130 | Leve | 0 |
| 42 | Média | 78,024 | 91,304 | Leve | 0 |
| 43 | Pesada | 78,226 | 93,478 | Leve | 0 |
| 44 | Pesada | 79,906 | 95,652 | Leve | 0 |
| 45 | Média | 82,056 | 97,826 | Leve | 0 |
| 46 | Pesada | 90,726 | 100,000 | Leve | 0 |

Tabela 7. Etapas para classificação baseada no potencial de sorção do solo e para teste de compatibilidade para o herbicida imazapic

| Amostras | Classificação convencional do solo | Massa de herbicida na solução do solo ($\mu\text{L-1}$) (média) | Frequência acumulada (%) | Classificação baseada no potencial de sorção do solo | Teste de compatibilidade (1 = sim e 0 = não) |
|----------|------------------------------------|---|--------------------------|--|--|
| | | 0,000 | 0,000 | | |
| 1 | Pesada | 0,804 | 2,174 | Pesada | 1 |
| 2 | Pesada | 1,465 | 4,348 | Pesada | 1 |
| 3 | Pesada | 2,905 | 6,522 | Pesada | 1 |
| 4 | Pesada | 3,054 | 8,696 | Pesada | 1 |
| 5 | Pesada | 3,259 | 10,870 | Pesada | 1 |
| 6 | Pesada | 4,167 | 13,043 | Pesada | 1 |
| 7 | Pesada | 4,479 | 15,217 | Pesada | 1 |
| 8 | Pesada | 4,553 | 17,391 | Pesada | 1 |
| 9 | Pesada | 6,071 | 19,565 | Pesada | 1 |
| 10 | Pesada | 6,114 | 21,739 | Pesada | 1 |
| 11 | Pesada | 6,117 | 23,913 | Pesada | 1 |
| 12 | Pesada | 6,662 | 26,087 | Pesada | 1 |
| 13 | Pesada | 6,690 | 28,261 | Pesada | 1 |
| 14 | Pesada | 8,315 | 30,435 | Média | 0 |
| 15 | Pesada | 8,426 | 32,609 | Média | 0 |
| 16 | Pesada | 9,548 | 34,783 | Média | 0 |
| 17 | Pesada | 10,135 | 36,957 | Média | 0 |
| 18 | Pesada | 12,390 | 39,130 | Média | 0 |
| 19 | Pesada | 14,305 | 41,304 | Média | 0 |
| 20 | Pesada | 14,646 | 43,478 | Média | 0 |
| 21 | Média | 14,913 | 45,652 | Média | 1 |
| 22 | Pesada | 15,540 | 47,826 | Média | 0 |
| 23 | Pesada | 17,592 | 50,000 | Média | 0 |
| 24 | Pesada | 19,530 | 52,174 | Média | 0 |
| 25 | Pesada | 23,112 | 54,348 | Média | 0 |
| 26 | Pesada | 23,650 | 56,522 | Média | 0 |
| 27 | Média | 26,024 | 58,696 | Média | 1 |
| 28 | Média | 28,026 | 60,870 | Média | 1 |
| 29 | Leve | 31,814 | 63,043 | Média | 0 |
| 30 | Pesada | 32,682 | 65,217 | Média | 0 |
| 31 | Média | 37,616 | 67,391 | Média | 1 |
| 32 | Pesada | 39,572 | 69,565 | Média | 0 |
| 33 | Pesada | 41,853 | 71,739 | Leve | 0 |
| 34 | Leve | 44,291 | 73,913 | Leve | 1 |
| 35 | Pesada | 44,832 | 76,087 | Leve | 0 |
| 36 | Leve | 47,698 | 78,261 | Leve | 1 |
| 37 | Média | 51,397 | 80,435 | Leve | 0 |
| 38 | Leve | 52,486 | 82,609 | Leve | 1 |
| 39 | Leve | 59,346 | 84,783 | Leve | 1 |
| 40 | Leve | 60,931 | 86,957 | Leve | 1 |
| 41 | Leve | 61,556 | 89,130 | Leve | 1 |
| 42 | Leve | 62,523 | 91,304 | Leve | 1 |
| 43 | Leve | 63,536 | 93,478 | Leve | 1 |
| 44 | Leve | 66,529 | 95,652 | Leve | 1 |
| 45 | Leve | 71,700 | 97,826 | Leve | 1 |
| 46 | Leve | 72,455 | 100,000 | Leve | 1 |

A partir desta informação inicial e das classificações de solo em estudo, compararam-se as 46 amostras de solo analisadas, e os resultados desta comparação podem ser observados nas Tabelas 8, 9 e 10.

Tabela 8. Compatibilidade entre as amostras classificadas convencionalmente com as classificadas pelo potencial de sorção do solo, para o herbicida diuron

| Tipo de solo | N° de amostras classificadas pelo potencial de sorção do solo | N° de amostras compatíveis com a classificação convencional | % de amostras compatíveis |
|---------------------|--|--|----------------------------------|
| Leve | 14 | 1 | 7,1 |
| Médio | 19 | 2 | 10,5 |
| Pesado | 13 | 8 | 61,5 |

Os dados da Tabela 8 mostram que o sistema convencional de classificação foi pouco compatível com a classificação baseada no potencial de sorção do solo para o herbicida diuron, com apenas 7,1% de compatibilidade nas amostras de tipo solo leve e 10,53% nos solos do tipo médio. O resultado melhor foi para solos tipo pesado com 61,54% das amostras compatíveis. O mesmo estudo foi feito para o herbicida hexazinona e apresentado na Tabela 9.

Tabela 9. Compatibilidade entre as amostras classificadas convencionalmente com as classificadas pelo potencial de sorção do solo, para o herbicida hexazinona

| Tipo de solo | N° de amostras classificadas pelo potencial de sorção do solo | N° de amostras compatíveis com a classificação convencional | % de amostras compatíveis |
|---------------------|--|--|----------------------------------|
| Leve | 14 | 3 | 21,4 |
| Médio | 19 | 1 | 5,3 |
| Pesado | 13 | 8 | 61,5 |

De acordo com a Tabela 9, o melhor resultado foi novamente na relação entre as amostras de solos do tipo pesado com 61,5% de compatibilidade. Já para os solos do tipo leve a compatibilidade aumentou em um comparativo com o herbicida diuron, passando para 21,4 % das amostras compatíveis. Novamente observa-se a baixa porcentagem de amostras compatíveis para solos médios 5,3 %.

Tabela 10. Compatibilidade entre as amostras classificadas convencionalmente com as classificadas pelo potencial de sorção do solo, para o herbicida imazapic

| Tipo de solo | Nº de amostras classificadas pelo potencial de sorção do solo | Nº de amostras compatíveis com a classificação convencional | % de amostras compatíveis |
|---------------------|--|--|----------------------------------|
| Leve | 14 | 11 | 78,6 |
| Médio | 19 | 4 | 21,1 |
| Pesado | 13 | 13 | 100,0 |

Os melhores resultados de compatibilidade foram observados para o herbicida imazapic (Tabela 10), onde das 14 amostras classificadas pelo potencial de sorção como leve, 11 foram compatíveis com a classificação convencional, representando 78,6 % das amostras. A compatibilidade entre as classificações para solo tipo médio foi de 21,1%, já para solos classificados como pesado, todas as amostras foram compatíveis.

Estes resultados são importantes, pois apontam para falhas no sistema de recomendação atual que é baseada primariamente nas características físicas do solo, tendo implicações diretas quanto ao manejo de recomendação dos herbicidas.

4.3.2. Adequação nas doses dos herbicidas em função da recomendação a partir do potencial de sorção do solo

As plantas daninhas são um dos pontos críticos no estabelecimento da cultura da cana-de-açúcar, demandando significativos recursos financeiros para seu controle, sendo a maior parte investida em herbicidas (QUINTELA et al., 2002). Desta maneira faz-se necessário o aprimoramento na recomendação destes produtos.

Entendendo a necessidade de aprimorar a dose dos herbicidas, compararam-se a recomendação estabelecida pelo fabricante e a baseada no potencial de sorção do solo. Os resultados podem ser observados nas Tabelas 11, 12 e 13.

Tabela 11. Diferença entre a recomendação do fabricante do herbicida diuron e a baseada no potencial de sorção do solo

| Tipo de solo | Recomendação do fabricante (kg/ha) | Recomendação baseada no potencial de sorção do solo (kg/ha) | Redução/Incremento (%) |
|---------------------|---|--|-------------------------------|
| Leve | 1,80 | 0,36 | 80,0 (-) |
| Médio | 2,50 | 2,23 | 10,8 (-) |
| Pesado | 3,50 | 4,10 | 17,1 (+) |

Os resultados da Tabela 11 apontam para uma redução na dose recomendada do herbicida diuron em 80% para solos leves, passando de 1,80 kg/ha de produto para 0,36 kg/ha. Em solos do tipo médio há também uma redução na dose, porém em menor proporção, de 2,50 kg/ha para 2,23 kg/ha, totalizando 10,8% de redução.

Contudo, nas amostras de solo do tipo pesada, nota-se que de acordo com potencial de sorção do solo a dose passa a ser de 4,10 kg/ha, sendo 17,1 % superior à recomendada pelo fabricante.

Tabela 12. Diferença entre a recomendação do fabricante do herbicida hexazinona e a baseada no potencial de sorção do solo

| Tipo de solo | Recomendação do fabricante (g p.c./ha) | Recomendação baseada no potencial de sorção do solo (g p.c./ha) | Redução/Incremento (%) |
|---------------------|---|--|-------------------------------|
| Leve | 250,00 | 107,14 | 57,1 (-) |
| Médio | 350,00 | 318,42 | 9,0 (-) |
| Pesado | 450,00 | 511,54 | 13,7 (+) |

Para o herbicida hexazinona (Tabela 12), os resultados apontam para nova redução na dose recomendada com base no potencial de sorção do solo, tanto para solos do tipo leve (57,1%) quanto para do tipo médio (9%). Para solos do tipo pesado, a recomendação baseada no potencial de sorção exige um incremento de 13,7% na dose do produto.

Tabela 13. Diferença entre a recomendação do fabricante do herbicida imazapic e a baseada no potencial de sorção do solo

| Tipo de solo | Recomendação do fabricante (g/ha) | Recomendação baseada no potencial de sorção do solo (g/ha) | Redução/Incremento (%) |
|--------------|-----------------------------------|--|------------------------|
| Leve | 140,00 | 133,75 | 4,5 (-) |
| Médio | 157,50 | 145,53 | 7,6 (-) |
| Pesado | 175,00 | 175,00 | - |

Os resultados apresentados na Tabela 13 referentes ao herbicida imazapic apresentam maior semelhança entre as duas recomendações, mostrando que a recomendação deste produto pelos fabricantes é coerente com a recomendação baseada pelo potencial de sorção. As diferenças se encontram nos solos tipo leve e médio, onde a indicação mediante estudo de sorção do solo é 4,5 e 7,6% inferior, respectivamente.

Esta semelhança não é ao acaso, pois dentre os herbicidas analisado no presente estudo, somente o herbicida imazapic apresentou correlação com teor de argila, acertadamente utilizado como parâmetro pelo fabricante para estabelecimento da dose do produto.

Em geral, os resultados apresentados para os herbicidas analisados indicam redução na dose do produto em solos do tipo leve e médio, de acordo com o potencial de sorção do solo. Estes dados corroboram com Boström e Fogelfors (2002), os quais citam que graus satisfatórios de controle de plantas daninhas frequentemente são obtidos com uso de doses de herbicidas abaixo daquelas normalmente recomendadas no rótulo dos produtos.

4.3.3. Impacto econômico da recomendação baseada no potencial de sorção do solo

Os resultados da adequação de doses dos herbicidas diuron, hexazinona e imazapic permitiram estimar uma economia de dose destes produtos, dentro das classes de solo leve e médio, através da recomendação baseada no potencial de sorção do solo. Esta economia pode ser facilmente mensurada através do dimensionamento da propriedade e posterior adequação das doses de herbicidas de acordo as duas recomendações em estudo.

Outro dado importante desta análise é que as estimativas apuradas apontam para um incremento desnecessário na dose dos herbicidas indicadas pelos fabricantes. Este fato pode implicar em danos à própria cultura por intoxicação. Ferreira et al. (2005) observaram que as cultivares de cana-de-açúcar tem apresentado respostas diferenciadas aos herbicidas, tendo como consequências frequentes problemas de fitotoxicidade.

Esta interferência também foi observada por Azania et al. (2005) ao testarem os herbicidas diuron + hexazinone, azafenidin + hexazinone, metribuzin e isoxaflutole em solos de textura muito argilosa (61% de argila, 24% de areia e 15% de silte). Já Barela e Christoffoleti (2006) ao estudarem os herbicidas sulfentrazone, tebuthiuron, metribuzin, ametryn, diuron, clomazone, pendimethalin e diuron + hexazinone em um Latossolo Vermelho - Amarelo distrófico álico de textura arenosa, relataram que esses produtos alteraram de forma negativa a qualidade da matéria-prima da cana-de-açúcar.

Esta fitotoxicidade pode ocasionar redução na produtividade do canavial, contudo é difícil associar esta perda apenas a este fato isolado uma vez que inúmeras outras variáveis também podem estar envolvidas.

Por outro lado, os resultados para solos do tipo pesado para dois dos três herbicidas analisados (diuron e hexazinona) mostram que a recomendação fornecida pelos fabricantes é inferior à indicada pelo potencial de sorção do solo. Esta subdosagem prescrita pelos fabricantes, pode causar falhas no controle das plantas daninhas e conseqüentemente provocar redução na produtividade do canavial, em função da interferência direta destas plantas no desenvolvimento da cultura.

Outro aspecto importante é que este controle ineficaz prejudica a colheita mecanizada, pois como citado anteriormente a infestação de plantas daninhas diminui o rendimento das colhedeiras e eleva o teor de impurezas vegetais e minerais da cana-de-açúcar, haja vista o considerável aumento desta atividade nos últimos anos.

Deve-se ainda considerar que após a constatação do manejo inadequado no controle de plantas daninhas existe a possibilidade de uma nova intervenção no canavial a fim de suprir a necessidade de manutenção do campo em condições adequada para a cultura. A capina manual ou química, exemplos destas intervenções, acarretam custos, muitas vezes maiores que o próprio custo do controle químico.

Uma alternativa para melhor uso da técnica de recomendação de herbicida baseada no potencial de sorção do solo é aliar a ela técnicas de agricultura de precisão, assim com o mapeamento da área e o conhecimento do potencial de sorção de cada tipo de solo, aplica-se a dose adequada para cada situação.

Os resultados obtidos nesta pesquisa são importantes, uma vez que incorporam aspectos econômicos na tomada de decisão para controle de plantas daninhas na cultura da cana-de-açúcar. Nesse contexto, a seleção da melhor dose de herbicida para controle de plantas daninhas pode ser aperfeiçoada com o uso de sistemas de suporte de decisão, considerando-se os fatores que influenciam a eficácia do herbicida, como as características físico/químicas do solo.

4.4. Impacto ambiental da recomendação baseada no potencial de sorção do solo

Os resultados apontaram para possível risco de impacto ambiental, através da contaminação de ambientes hídricos, na aplicação de herbicidas através da recomendação encontrada nos rótulos dos produtos comerciais, principalmente em ambientes com solos do tipo leve e médio, os quais apresentam maior potencial de lixiviação e onde foram encontrados os maiores incrementos nas doses dos herbicidas estudados.

Dentre os herbicidas analisados, o que acarreta maior fator impactante é a hexazinona, em função principalmente de sua alta solubilidade (29.800 mg.L^{-1}), o que garante a este produto maior mobilidade no perfil do solo e conseqüentemente maiores chances de atingir águas subterrâneas.

Apesar dos resultados apontarem para um possível risco de impacto ambiental frente à recomendação incorreta de herbicidas, é difícil mensurá-lo mediante os inúmeros processos bióticos, abióticos, físicos e químicos que estão envolvidos no destino final destes produtos. Segundo Menzer et al. (1994), para a avaliação dos riscos para o meio ambiente, devem ser realizados estudos sobre o destino e a persistência do defensivo agrícola e seus produtos de degradação, a hidro e lipossolubilidade, a adsorção no solo, processos de degradação biótica e abiótica, a bioacumulação e a investigação da toxicidade para organismos do solo e da água.

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos nesta pesquisa pode-se concluir que:

- Houve decréscimo na disponibilidade dos herbicidas ametrina, amicarbazone, diuron, hexazinona e sulfentrazone em solução do solo em função do incremento nos teores de matéria orgânica na composição do solo;
- Houve decréscimo na disponibilidade do herbicida imazapic em solução do solo em função do incremento nos teores de argila na composição do solo;
- Os resultados estimados de adequação de doses dos herbicidas em função do potencial de sorção do solo apresentaram redução na participação dos custos com herbicidas no custo operacional total da cultura da cana-de-açúcar;
- 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, mantendo assim a eficácia do produto e diminuindo a contaminação ambiental, sem afetar o controle das plantas daninhas.

- Os dados desta pesquisa apontam para uma falha na recomendação de doses de herbicidas constante nos rótulos dos produtos comerciais, uma vez que os resultados apontam para a interferência de outras variáveis na disponibilidade do herbicida em solução do solo e não apenas a textura, como prioriza a maioria dos fabricantes.

6. REFERÊNCIAS

- AZANIA, C. A. M. et al. Seletividade de herbicidas. II – Aplicação de herbicidas em pós-emergência inicial e tardia da cana-de-açúcar na época das chuvas. **Planta Daninha**, Viçosa, MG, v. 23, n. 4, p. 669-675, 2005.
- AZEVEDO, D. A. et al. Monitoring of priority pesticides and other organic pollutants in river water from Portugal by gas chromatography: mass spectrometry and liquid chromatography: atmospheric pressure chemical ionization mass spectrometry. **Journal of Chromatography A**, Amsterdam, v. 879, p. 13-26, 2000.
- BARELA, J. F.; CHRISTOFFOLETI, P. J. Seletividade de herbicidas aplicados em pré-emergência da cultura da cana-de-açúcar (RB867515) tratada com nematicidas. **Planta Daninha**, Viçosa, MG, v. 24, n. 2, p. 371-378, 2006.
- BLANCO, F. M. G.; VELINI, E. D.; BATISTA FILHO, A. Persistência do herbicida Sulfentrazone em solo cultivado com cana-de-açúcar. **Bragantia**, Campinas, v. 69, n. 1, p. 71-75, 2010.
- BOSTRÖM, U.; FOGELFORS, H. Response of weeds and crop yield to herbicide dose decision-support guidelines. **Weed Science**, Champaign, v. 50, p. 186-195, 2002.
- BRASIL. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira, terceiro levantamento**. 2011a. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/11_01_06_09_14_50_boletim_cana_3o_lev_safra_2010_2011.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2011.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Estatística e dados básicos de economia agrícola**: agosto 2012. Brasília, DF. 2012a. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/vegetal/Estatistica/Estat%C3%ADticas%20e%

20Dados%20B%C3%A1sicos%20de%20Economia%20Agr%C3%ADcola/Pasta%20-%20Agosto%202012.pdf >. Acesso em: 07 set. 2012.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Nota à imprensa**: janeiro 2012. Brasília, DF. 2012b. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/internacional/indicadores-e-estatisticas/balanca-comercial>>. Acesso em: 16 fev. 2012.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Venda de fertilizantes chega a 8,5 milhões de toneladas**. Brasília, DF. 2011b. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/noticias/2011/06/venda-de-fertilizantes-chega-a-8-milhoes-de-toneladas>>. Acesso em: 12 jan. 2012.

CARBONARI, C. A. **Efeito da palha na disponibilidade do herbicida amicarbazone na solução do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar**. 2009. 101 f. Tese (Doutorado em Agronomia / Proteção de Plantas)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2009.

CHRISTOFFOLETI, P. J.; LÓPES-OVEJERO, R. F. **Dinâmica dos herbicidas aplicados ao solo na cultura da cana-de-açúcar**. Piracicaba: BASF, 2005. 49 p.

CZAPAR, G. F.; KANVAR, R. S.; FAWCETT, R. Herbicide and trace movement to field drainage tiles under simulated rainfall conditions. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 30, p. 19-32, 1994.

DE ARMAS, E. D. et al. Uso de agrotóxicos em cana-de-açúcar na bacia do rio Corumbataí e o risco de poluição hídrica. **Química Nova**, São Paulo, v. 28, n. 6, p. 975-982, 2005.

FERREIRA, E. A. et al. Sensibilidade de cultivares de cana-de-açúcar a mistura trifloxysulfuronsodium + ametryn. **Planta Daninha**, Viçosa, MG, v. 23, n. 1, p. 93-99, 2005.

FILIZOLA, H. F. et al. Monitoramento e avaliação do risco de contaminação por pesticidas em água superficial e subterrânea na região de Guaíra. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 37, n. 5, p. 659-667, 2002.

FIRMINO, L. E. et al. Sorção do imazapyr em solos com diferentes texturas. **Planta Daninha**, Viçosa, MG, v. 26, n. 2, p. 395-402, 2008.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Trade STAT**. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/site/535/default.aspx#ancor>>. Acesso em: 23 nov. 2010.

FREDO, C. E. et al. Efeito da mecanização nos empregos. **Agroanalysis**, São Paulo, v. 32, n. 4, p. 24-25, 2012.

GUILHERME, L. R. G. et al. Contaminação de microbacia hidrográfica pelo uso de pesticidas. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 21, n. 207, p. 40-54, 2000.

HERWIG, U. et al. Physicochemical interactions between atrazine and clay minerals. **Applied Clay Science**, Amsterdam, v. 18, p. 201-222, 2001.

INOUE, M. H. Potencial de lixiviação de imazapic e isoxaflutole em colunas de solo. **Planta Daninha**, Viçosa, MG, v. 25, n. 3, p. 547-555, 2007.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Em 2011, PIB cresce 2,7% e totaliza R\$ 4,143 trilhões**. 2012. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia_visualiza.php?id_noticia=2093>. Acesso em: 06 ago. 2012.

KOSKINEN, W. C.; HARPER, S. S. The retention process: mechanisms. In: CHENG, H. H. (Ed.). **Pesticides in the soil environment: processes, impacts and modelling**. Madison: Soil Science Society of America, 1990. p. 51-57. (Book Series, 2).

KUCKUK, R. et al. Preliminary investigations into the interactions of herbicides with aqueous humic substances. **Pesticide Science**, West Sussex, v. 51, p. 450-454, 1997.

KUVA, M. A. et al. Padrões de infestação de comunidades de plantas daninhas no agroecossistema de cana-crua. **Planta Daninha**, Viçosa, MG, v. 26, n. 3, p. 549-557, 2008.

KUVA, M. A. et al. Períodos de interferência das plantas daninhas na cultura da cana-de-açúcar. I – Tiririca. **Planta Daninha**, Viçosa, MG, v. 18, n. 2, p. 241-251, 2000.

KUVA, M. A. et al. Períodos de interferência das plantas daninhas na cultura da cana-de-açúcar. III – Capim-brachiaria (*Brachiaria decumbens*) e capim-colonião (*Panicum maximum*). **Planta Daninha**, Viçosa, MG, v. 21, n. 1, p. 37-44, 2003.

LANÇAS, F. M.; LAVORENTI, A. **Monitoramento de Hexazinone e Diuron em águas de superfície (rios) em regiões canavieiras do estado de São Paulo**. Piracicaba: ESALQ/USP, 2003.

LEE, D.; FARMER, W. J. Dissolved organic matter interaction with napropamide and four other nonionic pesticides. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 18, p. 468-474, 1989.

LEVANON, D. et al. Mobility of agrochemicals through soil from two tillage systems. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 22, p. 155-161, 1993.

LIMA, R. E. Estudos geomorfológicos na avaliação de impacto ambiental. In: SEMINÁRIO SOBRE AVALIAÇÃO E RELATÓRIO DE IMPACTO AMBIENTAL, 1., 1990, Curitiba. **Anais...** Curitiba: FUPEF/UFPR, 1990. p. 73-80.

- LÓPEZ-OVEJERO, R. F. et al. **Comportamento dos herbicidas aplicados ao solo na cultura da cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP 2, 2009. 72 p.
- MALLAWATANTRI, A. P.; MULLA, D. J. Herbicide adsorption and organic carbon contents on adjacent low-input versus conventional farms. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 21, n. 4, p. 546-551, 1992.
- MANCUSO, M. A. C.; NEGRISOLI, E.; PERIM, L. Efeito residual de herbicidas no solo (“*Carryover*”). **Revista Brasileira de Herbicidas**, Maringá, v. 10, n. 2, p. 151-164, 2011.
- MATTHEWS, G. A. The application of chemicals for plant disease control. In: WALLER, J. M.; LENNÉ, J. M.; WALLER, S. J. **Plant pathologist’s pocketbook**. London: CAB, 2002. p. 345-353.
- MENEGATTI, A. L. **Custos de produção para soja comercial e transgênica a luz das metodologias utilizadas pelos órgãos públicos no Brasil e nos Estados Unidos: um estudo para o Mato Grosso do Sul**. 2006. 123 f. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada)-Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.
- MENZER, R. E. et al. Methods in environmental toxicology. In: HAYES, A. W. **Principles and methods in toxicology**. 3rd. ed. New York: Raven Press, 1994. p. 1391-1418.
- MILLER, P.; WESTRA, P. **Herbicide behavior in soils**. Fort Collins: Colorado State University, 1998. (Crop Series, 562).
- NEVES, E. M.; CIDADE, P. F. A.; ESPERANCINI, M. S. T. **Orçamentos de custos de seis culturas no Estado de São Paulo**. Piracicaba: FEALQ/SRB, 1986. 86 p.
- OLIVEIRA, M. F. Comportamento de herbicidas no ambiente. In: OLIVEIRA JUNIOR, R. S.; CONSTANTIN, J. **Plantas daninhas e seu manejo**. Guaíba: Agropecuária, 2001. p. 315-362.
- OLIVEIRA, M. W. et al. Nutrição mineral e adubação da cana-de-açúcar. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 28, n. 239, p. 30-43, 2007.
- OLIVEIRA-FILHO, E. C.; LIMA, J. E. F. W. **Impacto da agricultura sobre os recursos hídricos na região do Cerrado**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2002. 50 p.
- PEROSA, B. B. A emergência da governança socioambiental. **Agroanalysis**, São Paulo, v. 32, n. 5, p. 25-27, 2012.
- PITELLI, R. A. Interferência de plantas daninhas em culturas agrícolas. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 11, n. 129, p. 16-27, 1985.

PROCÓPIO, S. O.; SILVA, A. A.; VARGAS, L. Manejo e controle de plantas daninhas em cana-de-açúcar. In: VARGAS, L.; ROMAN, E. S. (Ed.). **Manual de manejo e controle de plantas daninhas**. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2004. p. 397-452.

PROCÓPIO, S. O. et al. **Manejo de plantas daninhas na cultura da cana-de-açúcar**. Viçosa, MG: Ed. Universidade Federal de Viçosa, 2003. 150 p.

QUEIROGA, C. L. Analisadores de massa: QTRAP. In: _____. **Espectrometria de massas: princípios e aplicações**. Disponível em: <<http://www.espectrometriademassas.com.br/capitulos/>>. Acesso em: 25 abr. 2012.

QUINTELA, A. C. R. et al. Controle de plantas daninhas em cana crua (cultivar RB835089) no sistema integrado palhiço, herbicida e vinhaça. **STAB**, Piracicaba, v. 20, n. 4, p. 38-42, 2002.

REGITANO, J. B.; ALLEONI, L. R. F.; TORNISIELO, V. L. Atributos de solos tropicais e a sorção de imazaquin. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 58, n. 4, p. 801-807, 2001.

REGITANO, J. B. et al. Imazaquin mobility in tropical soils in relation to soil moisture and rainfall timing. **Weed Research**, Oxford, v. 42, p. 271-279, 2002.

RICHETTI, A. **Estimativa de produção de mandioca industrial, safra 2007**. Dourados: Embrapa, 2007. 6 p. (Comunicado Técnico, 133).

ROCHA, W. S. D. **Sorção de 2,4-D e diuron nos agregados organominerais de latossolos em função dos conteúdos de matéria orgânica e de água**. 2003. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas)-Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

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

SCHEUNERT, I.; MANSOUR, M.; ANDREUX, F. Binding of organic pollutants to soil organic matter. **International Journal of Environmental Analytical Chemistry**, New York, v. 46, p. 189-199, 1992.

SCHMIDTKE, C. R.; VIEIRA, D. C.; SHIKIDA, P. F. A. Inserção da agroindústria canavieira paranaense no comércio internacional e os reflexos do protecionismo. In: ENCONTRO PARANAENSE DE ECONOMIA, 4., 2005, Toledo. **Anais...** Toledo: Edunioeste, 2005.

SILVA, A. A. et al. Herbicidas: comportamento no solo. In: SILVA, A. A.; SILVA, J. F. (Ed.). **Tópicos em manejo de plantas daninhas**. Viçosa, MG: Ed. Universidade Federal de Viçosa, 2007. p. 189-248.

SILVA, C. M. M. et al. Exsudação radicular de imazapyr por mudas de eucalipto cultivadas em solução nutritiva. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 29, n. 6, p. 915-920, 2005.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PRODUTOS PARA DEFESA AGRÍCOLA: **Dados de mercado**. 2011. Disponível em: <http://www.sindag.com.br/dados_mercado.php>. Acesso em: 12 jan. 2012.

SPADOTTO, C. A. **Comportamento e destino ambiental de herbicidas**. Comitê de Meio Ambiente, Sociedade Brasileira da Ciência das Plantas Daninhas. 2002. Disponível em: <<http://www.cnpma.embrapa.br/herbicidas/>>. Acesso em: 12 jan. 2012.

SPURLOCK, F.; BIGGAR, J. W. Thermodynamics of organic chemical partition in soils. II: Nonlinear partition of substituted phenylureas from aqueous solution. **Environmental Science Technology**, Iowa, v. 28, n. 4, p. 996-1002, 1994.

STEARMAN, G. K. et al. Herbicides reactivity of soil organic matter fractions in no-tilled and tilled cotton. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 53, p. 1690-1694, 1989.
STEVENSON, F. J. Organic matter reactions involving herbicides in soil. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 1, p. 333-343, 1972.

TOLEDO, R. E. B. et al. Dinamic (amicarbazone): novo herbicida seletivo para o controle de plantas daninhas em pré e pós-emergência na cultura da cana-de-açúcar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DA CIÊNCIA DAS PLANTAS DANINHAS, 24., 2004, São Pedro. **Anais...** São Pedro: Sociedade Brasileira da Ciência das Plantas Daninhas, 2004. p. 451.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. **Setor sucroenergético**: mapa da produção. 2008a. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/content/show.asp?cntCode={D6C39D36-69BA-458D-A95C-815C87E4404D}>>. Acesso em: 23 nov. 2010.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. **Setor sucroenergético**: histórico. 2008b. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/content/default.asp?cchCode={C2B8C535-736F-406B-BEB2-5D12B834EF59}>>. Acesso em: 12 jan. 2012.

VENCILL, W. L. (Ed.). **Herbicide handbook**. 8. ed. Lawrence: Weed Science Society of America, 2002. 493 p.

WEBER, J. B.; MILLER, C. T. Organic chemical movement over and through soil. In: SAWHNEY, B. L.; BROWN, K. (Ed.). **Reactions and movement of organic chemicals in soils**. Madison: SSSA/ASA, 1989. p. 305-334. (Special Publication, 22).