

**Universidade de São Paulo**  
**Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Biogeodinâmica de herbicidas utilizados em cana-de-açúcar  
(*Saccharum* spp.) na sub-bacia do rio Corumbataí**

**Eduardo Dutra de Armas**

**Tese apresentada para obtenção do título de Doutor  
em Ecologia de Agroecossistemas**

**Piracicaba**  
**2006**

**Eduardo Dutra de Armas**  
**Engenheiro Agrônomo**

**Biogeodinâmica de herbicidas utilizados em cana-de-açúcar**  
**(*Saccharum* spp.) na sub-bacia do rio Corumbataí**

**Orientadora:**  
**Prof<sup>a</sup>. Dra. REGINA TERESA ROSIM MONTEIRO**

**Tese apresentada para obtenção do título de Doutor**  
**em Ecologia de Agroecossistemas**

**Piracicaba**  
**2006**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/ USP**

Armas, Eduardo Dutra de

Biogeodinâmica de herbicidas utilizados em cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) na sub-bacia do rio Corumbataí / Eduardo Dutra de Armas. – Piracicaba, 2006.  
186 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2006.  
Bibliografia.

1. Bacia hidrográfica 2. Biogeoquímica 3. Cana-de-açúcar 4. Modelagem matemática 5. Pesticidas 6. Poluição de rios 7. Rio Corumbataí 8. Simulação de sistemas I. Título

CDD 633.61

**“Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor”**

“Nenhuma grande vitória é possível sem  
que tenha sido precedida de pequenas  
vitórias sobre nós mesmos”

*L. M. Leonor*

“Houve um tempo em que se fazia  
ciência a partir de quatro elementos:  
água, terra, fogo e ar. Naquele tempo  
não se sabia que é possível fazer  
qualquer coisa com apenas dois:  
vontade e imaginação...”

*Autor desconhecido*

“A ciência é, acima de tudo, a busca  
incessante da auto-descoberta, para que  
a dedicação, o prazer do conhecimento e  
a criatividade tornem-se forças a serem  
canalizadas para uma descoberta maior –  
a busca da verdade”

*E. D. Armas*

*A meus pais, Edes e Neiva, meu irmão Rafael e minha esposa Denise, pelo imenso  
carinho, apoio e compreensão*

***Dedico!***

*À minha querida “avó”, Ruth Peil Almeida, pelos seus ensinamentos de vida, amor e fé*

***Ofereço!***

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pela sabedoria e por iluminar os meus caminhos;

À Prof<sup>a</sup>. Dra. Regina Teresa Rosim Monteiro pela orientação, amizade, estímulo, experiência e otimismo constante;

À CAPES, pela bolsa de estudos;

A FAPESP, pelo auxílio financeiro para o projeto;

A minha esposa Denise e ao meu irmão Rafael, pelo convívio, companheirismo, carinho, afeto e ajuda inestimável, indireta ou diretamente em várias etapas deste projeto;

Aos técnicos do Escritório de Defesa Agropecuária, Regional Piracicaba da CDA, Armando Valler Amâncio, Rui Marcos Lopes Correa e Miguel Antonio Guercio, pela valiosa parceria para o desenvolvimento de parte deste trabalho;

Ao Laboratório de Análises Meteorológicas e Climatologia Aplicada, CEAPLA/UNESP, Rio Claro, em especial ao Prof. Dr. Norberto Morales, pelo fornecimento de dados meteorológicos incluídos no simulador;

À Dra. Maria Victoria Ballester, pelas sugestões para o desenvolvimento da etapa de simulação de transporte de agrotóxicos na sub-bacia do rio Corumbataí. Em especial, ao Daniel Vitória, pela boa vontade, paciência e pelos ensinamentos em Sistemas de Informação Geográfica;

Ao Prof. Dr. Plínio Barbosa de Camargo e a estagiária Amanda Calil Rodrigues de Moraes, do Laboratório de Ecologia Isotópica, do CENA, pelo inestimável apoio nas coletas de amostras para análise de resíduos de herbicidas, pelos momentos de descontração, pela amizade e companheirismo;

À Dra. Colleen H. Green, pesquisadora do United States Department of Agriculture – Agricultural Research Service – Grassland Soil and Water Research Laboratory, Temple, Texas, pela ajuda direta na correção de problemas no modelo SWAT e calibração do sistema;

À Dra. Rosângela Blotta Abakerli e os técnicos do Laboratório de Resíduos de Pesticidas, Embrapa Meio Ambiente, Débora, Marley, Geane e Márcia, pela amizade, pelos momentos de descontração e apoio na análise de resíduos de herbicidas;

Aos amigos do Laboratório de Ecotoxicologia, Pricila, Wagner, Hélio, Amauri e Ademir pelos momentos de descontração e de trabalho. Em especial aos companheiros do Projeto Políticas Públicas – Avaliação da Qualidade da Água da Sub-Bacia do Rio Corumbataí através de Bioensaios, Paula, Gláucia, Maria Alice e Milena, pela amizade, companheirismo e troca de experiências;

Aos amigos e colaboradores do Serviço Municipal de Água e Esgoto de Piracicaba, Ivan Canale, Antonio Carlos Ferreira, Elaine Contiero Ribeiro e Janice Froes de Aguilar (*in memorian*), pelo apoio direto em várias fases deste projeto.

A todos os amigos que estiveram presentes, pelo incentivo e carinho e, àqueles que ficaram ausentes pela distância, mas presentes nas vibrações;

Um agradecimento especial à família Gameiro, pela amizade, carinho e acolhida em alguns momentos difíceis na condução deste trabalho e, em especial, à Paula, pelos momentos de descontração e ajuda na editoração gráfica.

Aos amigos do Laboratório de Microbiologia Molecular, Simão, Juliano, Daniele, Robinson, Pablo, Denise Mescholotti e Fernando Baldesin, pelos momentos de descontração e amizade; Em especial ao πBull pela ajuda na implementação do sistema de MySQL e ao Dr. Marcio Rodrigues Lambais pela disponibilização dos sistemas computacionais que permitiram agilizar este trabalho;

A todos os membros dos fóruns de discussão dos softwares R e SWAT, via internet, que por ventura, auxiliaram na programação;

Aos funcionários do Laboratório de Informática do CENA, pelo apoio na solução de problemas operacionais, com gratidão especial ao João Geraldo;

Ao Prof. Dr. Reynaldo Victória e Prof. Dr. José Roberto Santista, pelas sugestões no Exame de Qualificação;

Muito Obrigado!

## SUMÁRIO

|                                                                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| RESUMO.....                                                                                                                                       | 9  |
| ABSTRACT .....                                                                                                                                    | 11 |
| 1 INTRODUÇÃO .....                                                                                                                                | 13 |
| Referências .....                                                                                                                                 | 17 |
| 2 USO DE AGROTÓXICOS EM CANA-DE-AÇÚCAR NA BACIA DO RIO<br>CORUMBATAÍ E O RISCO DE POLUIÇÃO HÍDRICA.....                                           | 20 |
| Resumo .....                                                                                                                                      | 20 |
| Abstract .....                                                                                                                                    | 20 |
| 2.1 Introdução .....                                                                                                                              | 20 |
| 2.2 Material e Métodos.....                                                                                                                       | 22 |
| 2.2.1 Área de estudo .....                                                                                                                        | 22 |
| 2.2.2 Procedimento investigativo.....                                                                                                             | 23 |
| 2.3 Resultados e discussão.....                                                                                                                   | 25 |
| 2.4 Conclusões.....                                                                                                                               | 40 |
| Referências .....                                                                                                                                 | 40 |
| 3 DIAGNÓSTICO ESPAÇO-TEMPORAL DA OCORRÊNCIA DE HERBICIDAS<br>NAS ÁGUAS SUPERFICIAIS E SEDIMENTOS DO RIO CORUMBATAÍ E<br>PRINCIPAIS AFLUENTES..... | 43 |
| Resumo .....                                                                                                                                      | 43 |
| Abstract .....                                                                                                                                    | 43 |
| 3.1 Introdução .....                                                                                                                              | 44 |
| 3.2 Material e Métodos.....                                                                                                                       | 48 |
| 3.2.1 Área de estudo .....                                                                                                                        | 48 |
| 3.2.2 Coleta e tratamento de amostras .....                                                                                                       | 50 |
| 3.2.3 Análise de resíduos.....                                                                                                                    | 52 |
| 3.2.3.1 Análise de glifosato .....                                                                                                                | 52 |
| 3.2.3.1.1 Extração .....                                                                                                                          | 52 |
| 3.2.3.1.2 Análise cromatográfica.....                                                                                                             | 53 |
| 3.2.3.2 Análise dos demais herbicidas .....                                                                                                       | 53 |

|                                                                                                                                                                        |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.2.3.2.1 Extração .....                                                                                                                                               | 53  |
| 3.2.3.2.2 Análise cromatográfica .....                                                                                                                                 | 54  |
| 3.2.3.3 Recuperações e desempenho dos métodos .....                                                                                                                    | 55  |
| 3.3 Resultados e discussão.....                                                                                                                                        | 56  |
| 3.4 Conclusões.....                                                                                                                                                    | 77  |
| Referências .....                                                                                                                                                      | 78  |
| 4 SIMULAÇÃO DA BIOGEO DINÂMICA DE AGROTÓXICOS E IDENTIFICAÇÃO<br>DE ÁREAS CRÍTICAS NA SUB-BACIA DO RIO CORUMBATAÍ PARA APORTE<br>DE RESÍDUOS AOS CORPOS HÍDRICOS ..... | 83  |
| Resumo .....                                                                                                                                                           | 83  |
| Abstract .....                                                                                                                                                         | 83  |
| 4.1 Introdução .....                                                                                                                                                   | 84  |
| 4.2 Material e Métodos .....                                                                                                                                           | 86  |
| 4.2.1 Área de estudo .....                                                                                                                                             | 86  |
| 4.2.2 Descrição do modelo matemático .....                                                                                                                             | 88  |
| 4.2.3 Entrada de Dados .....                                                                                                                                           | 91  |
| 4.2.3.1 Modelo Digital do Terreno .....                                                                                                                                | 91  |
| 4.2.3.2 Caracterização do uso e cobertura do solo e tipos de solos da bacia.....                                                                                       | 91  |
| 4.2.3.3 Bancos de dados.....                                                                                                                                           | 92  |
| 4.2.4 Delineamento e parametrização da bacia do Corumbataí.....                                                                                                        | 96  |
| 4.2.5 Calibração/validação do modelo SWAT .....                                                                                                                        | 96  |
| 4.2.6 Cenários simulados .....                                                                                                                                         | 98  |
| 4.2.7 Análise de dados .....                                                                                                                                           | 101 |
| 4.3 Resultados e discussão.....                                                                                                                                        | 102 |
| 4.3.1 Calibração e validação .....                                                                                                                                     | 103 |
| 4.3.2 Balanço da biogeodinâmica de agrotóxicos .....                                                                                                                   | 112 |
| 4.3.3 Identificação de áreas críticas .....                                                                                                                            | 117 |
| 4.3.3.1 Ametrina .....                                                                                                                                                 | 117 |
| 4.3.3.2 Atrazina .....                                                                                                                                                 | 140 |
| 4.3.3.3 Clomazona .....                                                                                                                                                | 148 |
| 4.3.3.4 Glifosato .....                                                                                                                                                | 152 |



|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 4.3.3.5 Hexazinona ..... | 152 |
| 4.3.3.6 Simazina.....    | 153 |
| 4.4 Conclusões.....      | 155 |
| Referências .....        | 155 |
| Apêndices.....           | 160 |

## RESUMO

### **Biogeodinâmica de herbicidas utilizados em cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) na sub-bacia do rio Corumbataí**

A sub-bacia hidrográfica do rio Corumbataí é de grande importância sócio-econômica no estado de São Paulo, cujo rio, de mesmo nome, tornou-se alvo de preocupação ainda maior nos últimos anos, quando passou a atender 100% do abastecimento do município de Piracicaba. Sendo explorada principalmente pela cultura da cana-de-açúcar e composta de solos com características físico-químicas distintas e relevo variando de plano a montanhoso, surge grande preocupação em torno do comportamento ambiental dos agrotóxicos empregados nesta bacia, o qual é desconhecido até o momento. O presente estudo teve por objetivo avaliar a biogeodinâmica dos agrotóxicos empregados em cana-de-açúcar nesta bacia hidrográfica, vindo a servir de subsídio aos processos de avaliação da qualidade da água desta bacia e definição de metas para o Plano de Bacias, elaborado pelo Comitê das Bacias dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí. Este trabalho consistiu de caracterização temporal do uso de agrotóxicos em cana-de-açúcar, o qual serviu de suporte na definição de moléculas e períodos de amostragem para o monitoramento de resíduos em água e sedimento na calha principal do rio Corumbataí e principais afluentes. A identificação de áreas críticas na sub-bacia para o aporte de agrotóxicos foi realizada por meio do modelo matemático SWAT. O estudo apontou o uso principalmente de herbicidas, sendo os únicos produtos de uso declarado no período de avaliação, com consumo sazonal de algumas moléculas e uso indistinto de outras ao longo do ano, o que permitiu um planejamento estratégico do monitoramento de resíduos. Os herbicidas glifosato, atrazina, ametrina, 2,4-D, metribuzim, diurom e acetocloro representaram aproximadamente 85% do volume total de produtos consumidos entre 2000 e 2003. Imazapir foi identificado como o herbicida de maior frequência de uso, sendo também vislumbrado o emprego de moléculas de alta toxicidade e mobilidade, como sulfentrazone, trifloxissulfurom-sódico, paraquate, tebutiurrom e imazapique. No monitoramento de resíduos, níveis quantificáveis de ametrina, atrazina, simazina, hexazinona, glifosato e clomazona foram detectados em amostras de água, com níveis desprezíveis de ametrina e glifosato em sedimento. A área de recarga do aquífero Guarani, no norte da bacia, apresentou os níveis mais elevados de triazinas e clomazona. As triazinas representam o grupo de moléculas detectadas em níveis mais altos, com a atrazina superando os padrões de potabilidade e de qualidade de água para a vida aquática em alguns pontos. Estas moléculas foram também apontadas pela simulação, como as de maior tendência de ocorrer nos corpos hídricos superficiais e subterrâneos, quando aplicadas em período chuvoso, sendo superadas por glifosato em corpos hídricos superficiais, quando a aplicação ocorreu em período de seca. A simulação de um cenário de expansão da cultura de cana-de-açúcar resultou em aumento da participação das áreas com Areia Quartzosa para o aporte de herbicidas aos corpos hídricos, que juntamente com o Podzólico Vermelho-Amarelo, Podzólico Vermelho-Escuro e solos Litólicos, apresentaram maior vulnerabilidade na bacia. As regiões norte da bacia e as sub-bacias do Ribeirão Claro e rio Passa Cinco

## Gracias por visitar este Libro Electrónico

Puedes leer la versión completa de este libro electrónico en diferentes formatos:

- HTML(Gratis / Disponible a todos los usuarios)
- PDF / TXT(Disponible a miembros V.I.P. Los miembros con una membresía básica pueden acceder hasta 5 libros electrónicos en formato PDF/TXT durante el mes.)
- Epub y Mobipocket (Exclusivos para miembros V.I.P.)

Para descargar este libro completo, tan solo seleccione el formato deseado, abajo:

