

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL CAUSADO PELO SISTEMA  
PRODUÇÃO DE SOJA NA REGIÃO OESTE DO PARANÁ**

**José Tomadon Júnior**

**Engenheiro de Produção Agroindustrial, 2007**

**Orientadores: Prof. Dr. Marcelino Luiz Gimenes**

**Prof. Dr. Paulo Roberto Paraíso**

**Coorientadora: Prof<sup>a</sup>. Dra. Cássia Maria Lie Ugaya**

MARINGÁ

2015

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL CAUSADO PELO SISTEMA DE  
PRODUÇÃO DE SOJA NA REGIÃO OESTE DO PARANÁ**

**José Tomadon Júnior**

**Engenheiro de Produção Agroindustrial, 2007**

**Orientadores: Prof. Dr. Marcelino Luiz Gimenes**

**Prof. Dr. Paulo Roberto Paraíso**

**Coorientadora: Prof<sup>a</sup>. Cássia Maria Lie Ugaya**

Tese de Doutorado submetida à Universidade Estadual de Maringá, como parte dos requisitos necessários para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Química, área de Processos de Separação e Sistemas Particulados.

MARINGÁ

2015

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
(Biblioteca Central - UEM, Maringá – PR., Brasil)

T655a Tomadon Júnior, José  
Avaliação do impacto ambiental causado pelo sistema produção de soja na Região Oeste do Paraná / José Tomadon Júnior. -- Maringá, 2015..  
161 f. : il., figs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Marcelino Luiz Gimenes.  
Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Paraíso.  
Coorientadora: Profa. Dra. Cássia Maria Lie Ugaya.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, 2015.

1. Soja - Produção - Impacto ambiental - Região Oeste - Paraná. 2. Avaliação do ciclo de vida. 3. Fatores de caracterização - Perfil Ambiental. 4. Agricultura de precisão. I. Gimenes, Marcelino Luiz, orient. II. Paraíso, Paulo Roberto, orient. III. Ugaya, Cássia, Maria Lie, coorient. IV. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. V. Título.

CDD 21.ed.628


UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA


Esta é a versão final da Tese de Doutorado apresentada por José Tomadon Júnior perante a Comissão Julgadora do Curso de Doutorado em Engenharia Química em 10 de Fevereiro de 2015.

COMISSÃO JULGADORA

  
Prof. Dr. Marcelino Luiz Gimenes  
Orientador

  
Prof. Dr. Paulo Roberto Paraíso  
Orientador

  
Prof.ª Dr.ª Cássia Maria Lie Ugaya  
Coorientador

  
Prof. Dr. Rodrigo Augusto Freitas de Alvarenga  
Membro

  
Prof.ª Dr.ª Irene Domenes Zapparoli  
Membro

  
Prof. Dr.ª Maria Angélica Simões Dornellas de Barros  
Membro

  
Prof. Dr. Luiz Mário de Matos Jorge  
Membro

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, luz do meu caminho, por dar-me força, sabedoria e paciência necessárias para a superação de todos os obstáculos desta jornada.

Agradeço à minha mãe, Nelci Veiga Mello, pelas sólidas bases educacionais. Além disso, ela sempre acreditou na minha capacidade de vencer.

Agradeço aos meus padrinhos Estel Mello Figueiredo Goulart e Adenor Goulart por me acolher durante as estadias em Curitiba e pelo apoio incondicional.

Agradeço aos meus orientadores, Marcelino Luiz Gimenes e Paulo Roberto Paraíso, pela confiança e por me proporcionar a chance de desenvolver este trabalho.

Agradeço a minha co-orientadora, Cássia Maria Lie Ugaya, por aceitar meu pedido e participar deste projeto, já durante o desenvolvimento da pesquisa. Sua contribuição ao trabalho foi inestimável.

Agradeço a Universidade Tecnológica Federal do Paraná e aos professores do grupo de Gestão pela ajuda e confiança em mim depositada durante o desenvolvimento da pesquisa. Este apoio foi fundamental para eu superar todas as barreiras que surgiram ao longo desta caminhada.

Agradeço ao professor Luiz Mário Mattos Jorge pelo incentivo e ajuda no início deste projeto.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Estadual de Maringá, pela oportunidade de cursar o Doutorado.

Agradeço a todos os professores do Departamento de Engenharia Química pela solidária ajuda e colaboração.

Agradeço a todos os amigos e companheiros do curso de Pós-Graduação pelo companheirismo nos momentos alegres e nos difíceis.

Seria necessário um espaço muito maior para agradecer a todos aqueles que me ajudaram, à sua maneira, nesta pesquisa. Agradeço de coração a todos pelo apoio, acompanhamento e confiança em mim depositada.

## AVALIAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL CAUSADO PELO SISTEMA PRODUÇÃO DE SOJA NA REGIÃO OESTE DO PARANÁ

AUTOR: José Tomadon Júnior

ORIENTADORES: Marcelino L. Gimenes e Paulo R. Paraíso.

CO-ORIENTADORA: Cássia M. L. Ugaya

Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Química. Universidade Estadual de Maringá; av. Colombo, 5790, bloco E46, sala 09; CEP 87020-900, Maringá-PR, Brasil. Defendida em 12 de fevereiro de 2015, 148 p.

### RESUMO

Soja, oleaginosa de importância internacional pela alta demanda por proteína, óleo comestível e matéria-prima para biodiesel, tem sua produção crescente ano a ano. Tradicionalmente, o sistema de produção de soja em Plantio Direto aplica os insumos na propriedade de acordo com a média das análises de solo, ou seja, são aplicados de forma homogênea. Porém, o solo não é homogêneo. A Agricultura de Precisão procura solucionar esta questão através da aplicação dos insumos, nas quantidades certas, em determinadas áreas da propriedade. Um sistema de produção difundido pelo território nacional, com ocupação de 30.173 mil hectares, também requer uma avaliação dos impactos causados ao ambiente. Esta avaliação se mostra ainda mais necessária devido ao grande aumento no uso de defensivos agrícolas e, também, pela utilização de ingredientes ativos com alto poder toxicológico. Alguns deles já inclusos em listas de defensivos proibidos nos Estados Unidos, Europa e por convenções como a de Estocolmo, de Rotterdam, Protocolo de Montreal, entre outras. Uma ferramenta disponível é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Uma ACV consiste na compilação e avaliação de entradas e saídas e também de potenciais impactos ambientais de um sistema de produto, ao longo de seu ciclo de vida. Desta forma, o objetivo desta pesquisa consiste na avaliação do impacto ambiental causado pelo processo de produção da soja com sistema de manejo Plantio Direto e aplicação da técnica de agricultura de precisão na região Oeste do Paraná, durante a safra 2012/13. Para atingir os objetivos propostos, realizou-se a construção de um inventário do sistema agrícola Produção de Soja, com todas as entradas e saídas deste sistema. Este inventário foi modelado no software SimaPro para obter os perfis ambientais com auxílio de métodos de avaliação de impacto: CML-IA; EDIP 2003; IMPACT 2002+; ReCiPe; e USEtox. Adicionalmente, após as avaliações de impacto realizadas, notou-se a relevância para a categoria de impacto toxicidade (humana e ecológica). Tendo em vista que estas categorias de impacto são dependentes das regiões, foram obtidos fatores de caracterização regionalizados, visando averiguar a diferença com os resultados dos fatores disponíveis. Para tanto, selecionou-se o método USEtox. Os resultados obtidos mostraram a existência de uma grande amplitude de variação do potencial impacto ambiental entre as fazendas que compuseram a amostra da coleta de dados. Os métodos empregados para obter a avaliação do potencial impacto ambiental convergem, principalmente, para a categoria de Ecotoxicidade, para a emissão de defensivos como o principal contribuinte ao impacto ambiental. Substâncias como: cipermetrina, carbendazim, lambda-cialotrina, glifosato, metomil, entre outras, são apontadas como os ingredientes ativos que mais impactam

o ambiente. A avaliação do potencial impacto ambiental, com fatores de caracterização adaptados, mostrou-se inferior daquela com o emprego do método padrão. Na categoria Toxicidade Humana, houve uma redução de 36,5% no impacto. Essa redução foi ainda maior na categoria Ecotoxicidade – 82,52%. Dessa forma, para obter um perfil ambiental mais próximo da realidade, fez-se necessário o inventário representativo de uma área agrícola menor, como a eleita na região paranaense em foco. E o mais importante – para se obter resultados mais coerentes com a realidade estudada, faz-se imprescindível o emprego de fatores de caracterização correspondentes às características dessa realidade, e não empregar fatores de caracterização representativos de outras regiões ou fatores globais.

## ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT CAUSED BY THE SOYBEAN SYSTEM PRODUCTION IN THE WEST OF PARANÁ

AUTHOR: José Tomadon Júnior

SUPERVISORS: Marcelino L. Gimenes e Paulo R. Paraíso.

CO- SUPERVISOR: Cássia M. L. Ugaya

Doctoral thesis; Chemical Engineering Pos-graduate Program; State University of Maringá; Colombo Avenue, 5790, bl. E46 – 09; ZIP CODE 87020-900, Maringá-PR, Brazil. Presented on February, 12th 2015, 148p.

### ABSTRACT

Soybean, oilseed of international importance by the high demand of protein, edible oil and biodiesel raw material, has its production growing year by year. Traditionally, the production of soybean under no-tillage system applies the production inputs in the farm according to the average soil analysis, in other words, they are applied in a homogenous form. However, soil is not homogenous. Precision Agriculture seeks to solve this issue with the input application, in the right quantity, in specific areas of the property. A production system widespread throughout the country, with occupation of 30 173 million hectares, also requires an environmental impacts assessment. This assessment becomes even more necessary by the great increase in the use of pesticides and also by the use of active ingredients with high toxicology power. Some of them are in the lists of prohibited pesticides in the United States and Europe and also listed by conventions like Stockholm, Rotterdam, Montreal Protocol, among others. An available tool is the Life Cycle Assessment (LCA). An LCA consists in a compilation and assessment of inputs and outputs and also the potentials environmental impacts of a product system in their life cycle. Thereby, the goal of this resource is the assessment of environmental impact caused by the soybean production process under no-tillage system and application of precision agriculture in the West of Paraná, during the 2012/13 crop. To fulfill the proposed goal it was constructed an inventory of the soybean agricultural system, with its inputs and outputs. This inventory was modeled in SimaPro software to obtain the environmental profiles with the help of impact assessment methods: CML-IA; EDIP 2003; IMPACT 2002+; ReCiPe; and USEtox. Additionally, after the impact assessment, it was observed the relevance for the toxicity impact category (human and ecological). Considering that these impact categories are region dependents, regionalized characterization factors were obtained in order to ascertain the differences with the results of the available characterization factors. To aim this goal, it was selected the USEtox method. The results obtained showed the existence of a wide range of variation of the potential environmental impact between the farms that composed the sample of data collection. The methods used to obtain the assessment of potential environmental impact converge, mainly, to the Ecotoxicity category, for the pesticide emission as the main contributor to the environmental impact. Substances like: cypermethrin, carbendazim, lambda-cyhalothrin, glyphosate, methomyl, among others, are pointed as the active ingredients that have a major impact on the environment. The assessment of potential environmental impact, with the adapted characterization factors, was lower than the assessment with the standard method. In the Human



Toxicity category there was a reduction of 36,5% in the impact. The reduction was greater in the Ecotoxicity category – 82,52%. Thereby, to obtain an environmental profile nearest of reality, it was necessary an inventory of a smaller agricultural area, as the region in focus. And the most important – to obtain more consistent results with the studied reality, it was necessary the use of characterization factors corresponding to the characteristics of this reality, in spite of using representative characterization factors of others regions or global factors.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1.</b> Classificação das intervenções ambientais em categorias de ponto médio e ponto final. ....   | 9  |
| <b>Figura 2.</b> Sistema de produto da Soja.....  | 44 |
| <b>Figura 3.</b> Frações dos defensivos aplicados que atingem o solo e a água.....  | 52 |
| <b>Figura 4.</b> Avaliação do potencial impacto ambiental do sistema agrícola – método CML-IA. ....   | 68 |
| <b>Figura 5.</b> Avaliação do Impacto da produção de soja calculado pelo método EDIP 2003. ....   | 69 |
| <b>Figura 6.</b> Avaliação do impacto da produção de soja calculado pelo método IMPACT 2002+. ....  | 71 |
| <b>Figura 7.</b> Avaliação do impacto ambiental da produção de soja calculado pelo método ReCiPe. ....  | 72 |
| <b>Figura 8.</b> Avaliação do impacto causado pela produção de soja calculado pelo USEtox. ....   | 74 |
| <b>Figura 9.</b> Variação do impacto ambiental nas fazendas amostradas e principais substâncias promotoras na categoria Toxicidade Humana via compartimentos: a) b) ar; c) d) água; e) f) solo. g) impacto máximo e mínimo entre as fazendas. ....          | 77 |
| <b>Figura 10.</b> Cenários do sistema agrícola produção de soja com variações em suas entradas e saídas - método CML-IA; categoria de impacto Toxicidade Humana. ....   | 79 |
| <b>Figura 11.</b> Variação do potencial impacto ambiental, entre as fazendas e principais substâncias promotoras, na categoria Toxicidade Humana – Ar via compartimentos: a) b) ar; c) d) água; e) solo. f) impacto máximo e mínimo entre as fazendas. .... | 80 |
| <b>Figura 12.</b> Cenários do sistema agrícola produção de soja com variações em suas entradas e saídas - método EDIP 2003; categoria de impacto Toxicidade Humana - Ar.....  | 81 |
| <b>Figura 13.</b> Variação do impacto ambiental na categoria Toxicidade Humana – Água via compartimentos: a) b) ar; c) d) água; e) solo. f) impacto máximo e mínimo entre as fazendas.....  | 82 |
| <b>Figura 14.</b> Cenários do sistema agrícola produção de soja com variações em suas entradas e saídas – método EDIP 2003; categoria de impacto Toxicidade Humana – Água.....  | 83 |
| <b>Figura 15.</b> Variação do impacto ambiental na categoria de Toxicidade Humana – Solo via compartimentos: a) b) ar; c) d) água; e) f) solo. g) impacto máximo e mínimo entre as fazendas. ....   | 85 |
| <b>Figura 16.</b> Cenários do sistema agrícola produção de soja com variações em suas entradas e saídas - método EDIP 2003; categoria de impacto Toxicidade Humana – Solo.....  | 86 |
| <b>Figura 17.</b> Variação do impacto ambiental na categoria Não Carcinogênico entre as diversas fazendas amostradas via compartimentos: a) água; b) c) solo. d) impacto máximo e mínimo entre as fazendas.....   | 87 |
| <b>Figura 18.</b> Cenários do sistema agrícola de produção de soja, com variações em suas entradas e saídas - método IMPACT 2002+; categoria de impacto Não Carcinogênico. ....   | 88 |
| <b>Figura 19.</b> Variação do impacto ambiental, nas fazendas amostradas, na categoria de impacto Carcinogênico via compartimento: a) b) ar; c) água; d) solo. e) impacto máximo e mínimo entre as fazendas.....  | 89 |
| <b>Figura 20.</b> Cenários do sistema agrícola, produção de soja com variações em suas entradas e saídas - método IMPACT 2002+; categoria de impacto Carcinogênico. ....  | 90 |
| <b>Figura 21.</b> Variação do impacto ambiental nas fazendas avaliadas e principais substâncias promotoras do impacto na categoria Toxicidade Humana, via compartimentos: a) ar; b) c) água; d) e) solo. f) impacto máximo e mínimo entre as fazendas. .... | 92 |
| <b>Figura 22.</b> Cenários do sistema agrícola produção de soja com variações em suas entradas e saídas – método ReCiPe; categoria de impacto Toxicidade Humana. ....   | 93 |
| <b>Figura 23.</b> Variação do potencial impacto ambiental entre as fazendas e principais substâncias promotoras do impacto na subcategoria Cancerígeno, via compartimentos: a) ar; b) água; c) solo. d) impacto máximo e mínimo entre as fazendas. ....     | 95 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Figura 24.</b> Cenários do sistema agrícola de produção de soja com variações em suas entradas e saídas – modelo USEtox; categoria de impacto Cancerígeno.....  | 96  |
| <b>Figura 25.</b> Variação do potencial impacto ambiental entre as fazendas e principais substâncias promotoras do impacto na subcategoria Não Cancerígeno, via compartimento água e solo. b) impacto máximo e mínimo entre as fazendas. ....                        | 97  |
| <b>Figura 26.</b> Cenários do sistema agrícola produção de soja com variações em suas entradas e saídas – modelo USEtox; categoria de impacto Não Carcinogênico.....   | 98  |
| <b>Figura 27.</b> Variação do impacto ambiental nas fazendas e principais substâncias promotoras do impacto na categoria Ecotoxicidade de Água Doce, via compartimentos: a) b) c) água; d) solo. e) impacto máximo e mínimo entre as fazendas. ....                  | 101 |
| <b>Figura 28.</b> Cenários do sistema agrícola produção de soja com variações em suas entradas e saídas – método CML-IA; categoria de impacto Ecotoxicidade em Água Doce.....  | 102 |
| <b>Figura 29.</b> Variação do impacto ambiental para Ecotoxicidade em Água Marinha – a) b) compartimento ar; c) d) e) compartimento água. f) impacto máximo e mínimo entre as fazendas. ....   | 103 |
| <b>Figura 30.</b> Cenários do sistema agrícola produção de soja com variações em suas entradas e saídas – método CML-IA; categoria de impacto Ecotoxicidade em Água Marinha. ....  | 104 |
| <b>Figura 31.</b> Variação do impacto ambiental em Ecotoxicidade Terrestre – a) b) compartimento solo. c) impacto máximo e mínimo entre as fazendas. ....  | 105 |
| <b>Figura 32.</b> Cenários do sistema agrícola produção de soja com variações em suas entradas e saídas – método CML-IA; categoria de impacto Ecotoxicidade Terrestre .....  | 106 |
| <b>Figura 33.</b> Variação do potencial impacto ambiental, entre as fazendas e principais substâncias promotoras do impacto, na categoria Ecotoxicidade Aquática – Efeito Agudo (a e b). c) impacto máximo e mínimo entre as fazendas. ....                          | 107 |
| <b>Figura 34.</b> Cenários do sistema agrícola produção de soja com variações em suas entradas e saídas – método EDIP 2003; categoria de impacto Ecotoxicidade Aquática – Efeito Agudo.....  | 108 |
| <b>Figura 35.</b> Variação do potencial impacto ambiental, entre as fazendas, e principais substâncias promotoras do impacto na categoria Ecotoxicidade Aquática – Efeito Crônico(a). b) impacto máximo e mínimo entre as fazendas. ....                             | 108 |
| <b>Figura 36.</b> Cenários do sistema agrícola produção de soja com variações em suas entradas e saídas – método EDIP 2003; categoria de impacto Ecotoxicidade Aquática – Efeito Crônico.....  | 109 |
| <b>Figura 37.</b> Variação do potencial impacto ambiental, entre as fazendas, e principais substâncias promotoras do impacto na categoria Ecotoxicidade do Solo com Efeito Crônico (a e b). c) impacto máximo e mínimo entre as fazendas. ....                       | 110 |
| <b>Figura 38.</b> Cenários do sistema agrícola produção de soja com variações em suas entradas e saídas – método EDIP 2003; categoria de impacto Ecotoxicidade do Solo – Efeito Crônico.....   | 111 |
| <b>Figura 39.</b> Variação do potencial impacto ambiental entre as fazendas e principais substâncias promotoras do impacto na categoria Ecotoxicidade Aquática via compartimentos: a) ar; b) c) água; d) e) solo. f) impacto máximo e mínimo entre as fazendas. .... | 112 |
| <b>Figura 40.</b> Cenários do sistema agrícola produção de soja com variações em suas entradas e saídas – método IMPACT 2002+; categoria de impacto Ecotoxicidade Aquática.....  | 114 |
| <b>Figura 41.</b> Variação do potencial impacto entre as fazendas e principais substâncias promotoras do impacto na categoria Ecotoxicidade Terrestre (a,b). c) impacto máximo e mínimo entre as fazendas. ....  | 114 |
| <b>Figura 42.</b> Cenários do sistema agrícola produção de soja com variações em suas entradas e saídas – método IMPACT 2002+; categoria de impacto Ecotoxicidade Terrestre.....   | 115 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Figura 43.</b> Variação do potencial impacto ambiental entre as fazendas e principais substâncias promotoras do impacto na categoria Ecotoxicidade Terrestre via compartimentos: a) água; b) c) solo. d) impacto máximo e mínimo entre as fazendas. ....        | 116 |
| <b>Figura 44.</b> Cenários do sistema agrícola produção de soja com variações em suas entradas e saídas – método ReCiPe; categoria de impacto Ecotoxicidade Terrestre. ....  | 117 |
| <b>Figura 45.</b> Variação do potencial impacto ambiental, entre as fazendas, e principais substâncias promotoras do impacto na categoria Ecotoxicidade em Água Doce via compartimentos: a) água; b) solo. c) impacto máximo e mínimo entre as fazendas. ....      | 118 |
| <b>Figura 46.</b> Cenários do sistema agrícola produção de soja com variações em suas entradas e saídas – método ReCiPe; categoria de impacto Ecotoxicidade Água Doce. ....  | 119 |
| <b>Figura 47.</b> Variação do potencial impacto ambiental, entre as fazendas, e principais substâncias promotoras do impacto na categoria Ecotoxicidade Marinha via compartimentos: a) ar; b) c) água; d) solo. e) impacto máximo e mínimo entre as fazendas. .... | 120 |
| <b>Figura 48.</b> Cenários do sistema agrícola produção de soja com variações em suas entradas e saídas – método ReCiPe; categoria de impacto Ecotoxicidade Água Marinha. ....   | 121 |
| <b>Figura 49.</b> Variação do potencial impacto ambiental entre as fazendas e principais substâncias promotoras do impacto na categoria Ecotoxicidade em Água Doce via compartimentos: a) água; b) solo. c) impacto máximo e mínimo entre as fazendas. ....        | 122 |
| <b>Figura 50.</b> Cenários do sistema agrícola produção de soja com variações em suas entradas e saídas – método USEtox; categoria de impacto Ecotoxicidade em Água Doce. ....   | 123 |
| <b>Figura 51.</b> Comparação do potencial impacto ambiental calculado pelos fatores de caracterização padrão do USEtox e os fatores regionalizados: a) toxicidade humana câncer; b) toxicidade humana não câncer. ....   | 130 |
| <b>Figura 52.</b> Comparação do potencial impacto ambiental calculado pelos fatores de caracterização padrão do USEtox e os fatores regionalizados para Ecotoxicidade. ....  | 131 |
| <b>Figura 53.</b> Avaliação do potencial impacto ambiental do sistema agrícola - método CML-IA. ....   | 141 |
| <b>Figura 54.</b> Avaliação do impacto da produção de soja calculado pelo método EDIP 2003. ....   | 143 |
| <b>Figura 55.</b> Avaliação do impacto da produção de soja calculado pelo método IMPACT 2002+. ....  | 145 |
| <b>Figura 56.</b> Avaliação do impacto da produção de soja calculado pelo método ReCiPe. ....  | 147 |

## Lista de Tabelas

|   |     |
|---|-----|
| <b>Tabela 1.</b> Cenários disponível no CML-IA, com diferenças no horizonte temporal e escala geográfica. ....  | 11  |
| <b>Tabela 2.</b> Compartimentos ambientais e rotas de exposição consideradas pelo ReCiPe. ....  | 23  |
| <b>Tabela 3.</b> Comparação entre os métodos na categoria de impacto Toxicidade Humana. ....  | 39  |
| <b>Tabela 4.</b> Comparação entre os métodos para a categoria Ecotoxicidade. ....   | 42  |
| <b>Tabela 5.</b> Informações sobre a fazenda e as quantidades de insumos aplicados. ....  | 46  |
| <b>Tabela 6.</b> Informações sobre os defensivos agrícolas aplicados na produção de soja. ....  | 47  |
| <b>Tabela 7.</b> Consumo de diesel para a produção de soja. ....  | 47  |
| <b>Tabela 8.</b> Dados de entrada e saída dos produtos aplicados para a produção de soja. ....  | 48  |
| <b>Tabela 9.</b> Emissões devido a queima de diesel. ....   | 51  |
| <b>Tabela 10.</b> Inventário da produção de soja na região oeste do Paraná. ....  | 58  |
| <b>Tabela 11.</b> Dados de entrada de insumos para produção de soja apresentados em outros estudos (kg.ha <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup> ). ....                          | 62  |
| <b>Tabela 12.</b> Emissões geradas pelo sistema agrícola apresentadas pelo inventário Agri-Footprint e Ecoinvent. ....  | 65  |
| <b>Tabela 13.</b> Potencial impacto ambiental em Toxicidade Humana. ....  | 74  |
| <b>Tabela 14.</b> Potencial impacto ambiental em Ecotoxicidade. ....  | 98  |
| <b>Tabela 15.</b> Principais substâncias promotoras do impacto ambiental no sistema da soja na região oeste do Paraná, para categorias referentes a toxicidade humana. .... | 124 |
| <b>Tabela 16.</b> Processos que mais contribuem para o potencial impacto nas categorias referentes a toxicidade humana. ....  | 124 |
| <b>Tabela 17.</b> Principais substâncias promotoras do potencial impacto ambiental no sistema da soja na região oeste do Paraná, na categoria de ecotoxicidade. ....        | 125 |
| <b>Tabela 18.</b> Processos que mais contribuem para o potencial impacto nas categorias referentes a ecotoxicidade. ....  | 126 |
| <b>Tabela 19.</b> Fatores de Caracterização Adaptados ao contexto brasileiro – compartimentos Solo e Água. ....   | 127 |
| <b>Tabela 20.</b> Fatores de Caracterização Adaptados ao contexto brasileiro – compartimento Ar. ....   | 128 |
| <b>Tabela 21.</b> Relação entre os fluxos elementares do sistema da Soja e os processos elementares selecionados no SimPro para representar os primeiros. ....              | 140 |
| <b>Tabela 22.</b> Defensivos agrícolas e seus respectivos números CAS. ....   | 148 |
| <b>Tabela 23.</b> Fatores de caracterização para toxicidade humana. ....  | 150 |
| <b>Tabela 24.</b> Fatores de caracterização para ecotoxicidade aquática. ....   | 154 |
| <b>Tabela 25.</b> Fatores de caracterização para ecotoxicidade terrestre. ....  | 158 |

## SUMÁRIO

|   |    |
|---|----|
| <b>1. INTRODUÇÃO</b> .....                                  | 1  |
| 1.1. OBJETIVOS .....  | 3  |
| 1.1.1. Objetivo Geral.....                                  | 3  |
| 1.1.2. Objetivos Específicos .....                          | 3  |
| <b>2. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....                         | 5  |
| 2.1. PRODUÇÃO DE SOJA .....                                 | 5  |
| 2.1.1. Agricultura de Precisão.....                         | 6  |
| 2.1.2. Uso de Defensivos Agrícolas na Produção de Soja..... | 7  |
| 2.2. INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA .....                      | 8  |
| 2.3. AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO CICLO DE VIDA .....            | 8  |
| 2.3.1. Métodos de Avaliação de Impacto.....                 | 10 |
| 2.3.1.1. CML-IA (GUINÉE <i>et al.</i> 2002).....            | 10 |
| 2.3.1.2. EDIP .....   | 12 |
| 2.3.1.2.1. Toxicidade humana .....                          | 14 |
| 2.3.1.2.2. Ecotoxicidade .....                              | 15 |
| 2.3.1.3. IMPACT 2002+ .....                                 | 17 |
| 2.3.1.3.1. Toxicidade humana .....                          | 18 |
| 2.3.1.3.2. Ecotoxicidade aquática e terrestre .....         | 19 |
| 2.3.1.4. ReCiPe (GOEDKOOPE <i>et al.</i> , 2009).....       | 21 |
| 2.3.1.4.1. Fator de exposição e destino.....                | 22 |
| 2.3.1.4.2. Fator de efeito ecotoxicológico .....            | 24 |
| 2.3.1.4.3. Efeito toxicológico humano e fator de dano.....  | 24 |
| 2.3.1.4.4. Fator de caracterização de ponto final.....      | 25 |
| 2.3.1.4.5. Fator de caracterização de ponto médio .....     | 25 |
| 2.3.1.5. USEtox .....                                       | 26 |
| 2.3.1.5.1. Fator de destino .....                           | 31 |
| 2.3.1.5.2. Fatores de exposição para o ambiente .....       | 33 |
| 2.3.1.5.3. Fatores de exposição humana.....                 | 33 |
| 2.3.1.5.4. Fator de efeito ecotoxicológico .....            | 35 |
| 2.3.1.5.5. Fatores de efeito humano.....                    | 36 |
| 2.3.1.6. Considerações sobre os métodos.....                | 37 |
| 2.3.1.6.1. Categoria toxicidade humana .....                | 38 |

|   |           |
|---|-----------|
| 2.3.1.6.2. Categoria ecotoxicidade .....  | 41        |
| 2.3.1.7. Escolha do método .....  | 43        |
| <b>3. MÉTODO</b> .....  | <b>44</b> |
| 3.1. COLETA DE DADOS .....  | 45        |
| 3.2. CONSTRUÇÃO DO INVENTÁRIO DO SISTEMA AGRÍCOLA.....                                    | 48        |
| 3.3. MODELAGEM DOS DADOS NO SIMAPRO .....   | 52        |
| 3.4. CÁLCULO DO POTENCIAL IMPACTO AMBIENTAL .....   | 55        |
| 3.5. ADAPTAÇÃO DOS FATORES DE CARACTERIZAÇÃO.....   | 56        |
| <b>4. RESULTADOS</b> .....  | <b>58</b> |
| 4.1. INVENTÁRIO DA PRODUÇÃO DE SOJA .....   | 58        |
| 4.2. AVALIAÇÃO DO POTENCIAL IMPACTO AMBIENTAL CAUSADO PELO SISTEMA PRODUÇÃO DE SOJA ..... | 67        |
| 4.2.1. Avaliação do Potencial Impacto Ambiental pelo método CML-IA .....                  | 67        |
| 4.2.2. Avaliação do Potencial Impacto Ambiental pelo método EDIP 2003.....                | 69        |
| 4.2.3. Avaliação do Potencial Impacto Ambiental pelo Método IMPACT 2002+.....             | 70        |
| 4.2.4. Avaliação do potencial impacto ambiental pelo método ReCiPe.....                   | 72        |
| 4.2.5. Avaliação do Potencial Impacto pelo modelo USEtox.....                             | 73        |
| 4.3. AVALIAÇÃO DO IMPACTO EM TOXICIDADE HUMANA.....                                       | 74        |
| 4.3.1. Método CML-IA.....   | 76        |
| 4.3.2. Método EDIP 2003 .....   | 79        |
| 4.3.3. Método IMPACT 2002+.....   | 87        |
| 4.3.4. Método ReCiPe.....   | 91        |
| 4.3.5. Método USEtox .....  | 94        |
| 4.4. AVALIAÇÃO DO IMPACTO EM ECOTOXICIDADE.....   | 98        |
| 4.4.1. Método CML-IA.....   | 100       |
| 4.4.2. Método EDIP 2003 .....   | 106       |
| 4.4.3. Método IMPACT 2002+.....   | 112       |
| 4.4.4. Método ReCiPe.....   | 116       |
| 4.4.5. Método USEtox .....  | 122       |
| 4.5. CONSIDERAÇÕES SOBRE OS MÉTODOS .....   | 123       |
| 4.6. FATORES DE CARACTERIZAÇÃO ADAPTADOS .....  | 126       |
| 4.7. AVALIAÇÃO DO IMPACTO COM FATORES DE CARACTERIZAÇÃO REGIONALIZADOS .....              | 129       |
| 4.7.1. Avaliação do Impacto em Toxicidade Humana.....                                     | 130       |

|  |     |
|--|-----|
| 4.7.2. Avaliação do Impacto em Ecotoxicidade ..... | 131 |
| <b>CONCLUSÃO</b> .....                             | 132 |
| <b>REFERÊNCIAS</b> .....                           | 134 |
| <b>APÊNDICES</b> .....                             | 139 |



## 1. INTRODUÇÃO

A soja é uma oleaginosa de importância internacional. Isto devido à grande demanda por proteína - presente no farelo de soja, óleo comestível e óleo destinado à produção de biodiesel.

De acordo com a Conab (2014), a produção de soja em 2003/04 ocupava uma área total de 21.375,8 mil hectares. Já a safra de 2013/14, por sua vez, ocupou uma área de 30.173,1 mil hectares. Constata-se assim, no período de 10 anos, um aumento de 41,2% no total de área plantada. Saliente-se que no período de 2003 a 2008 foi identificado um aumento médio de 70% na quantidade de defensivos aplicados na produção de soja por hectare (MEYER e CEDERBERG, 2010).

Além da grande demanda por proteína, outro fator impulsionou a demanda por soja a saber - o estabelecimento do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel. Este programa governamental delineou-se como uma ação estratégica prioritária para o Brasil. Em 13 de janeiro de 2005, foi então publicada a Lei n. 11.097, dispendo sobre a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira. Esta lei estabelece a obrigatoriedade da adição de um percentual mínimo de biodiesel ao óleo diesel vendido ao consumidor em território nacional. O percentual obrigatório estabelecido foi de uma adição de 5% de biodiesel no diesel até oito anos após a publicação da referida lei, havendo um percentual obrigatório intermediário de 2% três anos após a sua publicação. Salienta-se que este percentual de 5% foi antecipado em 3 anos e entrou em vigor em janeiro de 2010.

Werf, Petitti e Sanders (2005) e Cavalett e Ortega (2010) realizaram estudos que abrangiam em seu escopo a produção de soja. Os primeiros não realizaram uma avaliação do ciclo de vida da soja, seus estudos se concentraram nos impactos ambientais da produção de ração concentrada para porcos. Cavalett e Ortega (2010) desenvolveram uma avaliação ambiental integrada da produção de biodiesel de soja no Brasil. Neste estudo, os autores focaram-se no fluxo de material, energia, emergia e liberação de CO<sub>2</sub>. Ambos os estudos apontam o sistema agrícola como grande colaborador ao impacto ambiental avaliado. Esses resultados, somados à expansão agrícola, indicam a necessidade de avaliar com maior atenção os impactos ao ambiente causados pela produção de soja.

Esta avaliação pode ser realizada com o auxílio da técnica de Avaliação do Ciclo de Vida – ACV. Tal técnica consiste na compilação e avaliação das entradas e saídas e de potenciais impactos ambientais de um sistema de produto ao longo de seu ciclo de vida (GUINÉE *et al.* 2002).

É comum, na realização de uma ACV, a construção de inventários do ciclo de vida para a produção agrícola representativos de grandes extensões de terra. Inventários que podem representar inclusive o território nacional. Silva *et al.* (2010) apresentam um estudo comparativo da avaliação do impacto ambiental para produção de soja entre a região Sul e Centro-oeste. As categorias de impacto avaliadas no estudo foram: mudança climática; demanda acumulada de energia; acidificação; e ecotoxicidade terrestre. Os autores apontam a existência de diferenças nos impactos ambientais entre as duas regiões. Dessa forma, o estudo de Silva *et al.* (2010) corrobora a necessidade de se levar em consideração as variações espaciais que podem levar a diferentes necessidades de insumos, acarretando magnitudes de impacto diferentes.

Salienta-se também que os métodos empregados para realizar a avaliação do impacto representam cenários internacionais - alguns com opção de cenário global. Este último geralmente é apontado como preferencial para ser empregado para avaliar impactos em território brasileiro. Porém, um cenário global representa um grau de incerteza elevado nos resultados. Grupos de pesquisa, no entanto, se formaram para desenvolver fatores de caracterização representativos de regiões específicas, tais como: LCImpact; ImpactWorld+; LIME; LUCAS; e USEtox. A este último será dada atenção especial, visto disponibilidade de acesso para obtenção de fatores de caracterização regionalizados.

Dentro do sistema agrícola, uma técnica que pode ser empregada frente as variações espaciais presentes no solo vêm a ser a agricultura de precisão. Com o auxílio de ferramentas tais como: Sistema de Posicionamento Global – GPS, Sistema de Informação Geográfica – GIS e sensores, a agricultura de precisão procura aplicar as quantidades necessárias de insumos, de acordo com a real necessidade de um determinado espaço de terra. Com isso, procura-se obter maiores produtividades e redução do impacto ambiental (EMBRAPA, 2004).

Mourad (2008) e Marzullo (2007) também realizaram pesquisas de avaliação de impacto ambiental abrangendo a soja. Mourad (2008) realiza uma avaliação da produção de biodiesel de soja. No que compete à fase agrícola, a autora destaca impactos ambientais decorrentes do uso da terra e uso de agroquímicos no plantio de soja. Marzullo (2007) constrói o inventário do ciclo de vida do biodiesel e realiza a avaliação de impactos de acordo com a Análise de Ecoeficiência. Seguindo esta teoria, a autora realiza a avaliação dos impactos ambientais de acordo com seis classes: consumo de recursos energéticos; rejeitos; consumo de recursos materiais; potencial de toxicidade; uso da terra e potencial de riscos. Ressalta-se que estes trabalhos ainda não se encontram publicados em periódico eletrônico.

No que concerne aos principais trabalhos publicados, pertinentes à avaliação do ciclo de vida da soja, nenhum deles considerou o uso de ferramentas da agricultura de precisão durante o plantio da soja. Observa-se que somente o trabalho de Silva *et al.* (2010) concentra atenção somente na fase agrícola brasileira. A presente pesquisa oferece contribuições referentes aos impactos ambientais decorrentes da produção de soja com a consideração da agricultura de precisão; o aprofundamento do impacto ambiental em toxicidade (humana e ecológica); a identificação de quais as principais substâncias promotoras do impacto e a realização da avaliação do impacto ambiental do sistema Produção de Soja com fatores de caracterização regionalizados para o Brasil.

O presente trabalho está estruturado como se segue:

- Capítulo 1: apresentação e objetivos da pesquisa;
- Capítulo 2: revisão bibliográfica sobre o sistema agrícola Produção de Soja e sobre os métodos de avaliação de impactos ambientais do ciclo de vida (CML-IA; EDIP 2003, IMPACT 2002+, ReCiPe E USEtox);
- Capítulo 3: descrição de como a pesquisa foi executada;
- Capítulo 4: apresentação e discussão dos resultados obtidos;
- Conclusões pertinentes ao trabalho;
- Referências Bibliográficas.

## 1.1. OBJETIVOS

### 1.1.1. Objetivo Geral

Avaliar o potencial impacto ambiental causado pelo processo de produção da soja com sistema de manejo Plantio Direto e aplicação da técnica agricultura de precisão, na região Oeste do Paraná, durante a safra 2012/13.

### 1.1.2. Objetivos Específicos

- Comparar os dados de inventário de ciclo de vida da produção de soja com aplicação da agricultura de precisão com aqueles da prática convencional;

- identificar as considerações implementadas nos modelos CML-IA; EDIP 2003; IMPACT 2002+; ReCiPe; e USEtox para Toxicidade Humana e Ecotoxicidade;
- identificar os processos pertencentes ao ciclo de vida da soja que mais impactam na categoria referente à Toxicidade Humana e Ecotoxicidade;
- identificar as variáveis relevantes e possíveis de se obter dados para o desenvolvimento de fatores de caracterização regionalizados utilizando o USEtox;
- comparar resultados do impacto ambiental referentes à toxicidade com uso de fatores de caracterização padrão e regionalizados para o Brasil.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1. PRODUÇÃO DE SOJA

A soja (*Glucine max. L. Merril*) é considerada a principal oleaginosa produzida e consumida mundialmente. Isto devido à importância do produto para o consumo animal, através do farelo de soja, para o consumo humano e produção de energia, através do óleo de soja (SILVA, LIMA E BATISTA, 2010; MEYER e CEDERBERG, 2010).

Segundo a Conab (2013), no Brasil, a área plantada na safra de 2013/14 teve um aumento de 5,1% em relação à safra anterior. Isto representa um aumento de 30.173,1 mil para 31.698,1 mil hectares.

De acordo com o acompanhamento da safra brasileira de grãos (2013), realizado pela Conab, estima-se um acréscimo de 6,5% na produção de soja em relação à safra de 2012/13. Este valor representa um volume de produção de 91.744,5 mil toneladas, o que corresponde um acréscimo de 5.623,7 mil toneladas, acima do obtido na safra passada.

Os métodos de produção da soja disponíveis são: agricultura ecológica; agricultura orgânica; agricultura química e agricultura de herbicida. Este último vem a ser o mais praticado para a produção de soja no Brasil. Sua base consiste na aplicação de defensivos agrícolas como estratégia para combater as pragas no campo (EMBRAPA, 2011).

Para a produção da soja, um sistema de manejo disponível é o Sistema de Plantio Direto. Deve-se dar prioridade a este tipo de manejo do solo com o intuito de evitar a degradação do solo, ocorrida devido à utilização do sistema convencional de exploração agrícola (EMBRAPA, 2011). Este sistema envolve, simultaneamente, todas as boas práticas conservacionistas, com a vantagem de reverter o processo de degradação dos solos e melhorar o desempenho da soja e culturas associadas. O plantio direto envolve técnicas de produção que preservam a qualidade ambiental. Fundamenta-se na ausência de preparo do solo e na cobertura permanente do terreno pela realização de rotação de culturas (EMBRAPA, 2011).

Segundo Henrique Debiase<sup>1</sup>, pesquisador da Embrapa Soja, as etapas para a produção da soja, empregando o sistema de manejo do solo plantio direto são:

- planejamento do sistema de rotação de culturas;
- manutenção dos sistemas mecânicos de contenção de enxurrada;
- correção da acidez do solo;
- manejo da vegetação existente antes da semeadura da soja;

---

<sup>1</sup> Comunicação pessoal.

- adubação do solo;
- tratamento de sementes;
- semeadura;
- controle de pragas e doenças;
- colheita;
- transporte, dentro e fora da propriedade.

Para realizar com maior eficiência algumas etapas da produção da soja, pode-se empregar a técnica de agricultura de precisão.

### 2.1.1. Agricultura de Precisão

O desenvolvimento da técnica de agricultura de precisão iniciou-se com a constatação de que nem todos os campos, nem mesmo proporções de um mesmo campo, tem o mesmo ótimo de resposta econômica à aplicação de um dado insumo (EMBRAPA, 2005; WHELAN e McBRATNEY, 2000).

Dessa forma, o conceito de agricultura de precisão está associado à utilização de equipamento de alta tecnologia para avaliar, ou monitorar, as condições de uma determinada parcela do terreno, de modo adequado às variações espaciais e temporais em fatores que afetam a produtividade, como base para posterior aplicação dos insumos, de acordo com as necessidades de cada parcela do terreno (COELHO e SILVA, 2009). A citada ferramenta procura identificar a variabilidade espacial e temporal em campos de produção e desenvolver práticas de manejo que permitam um melhor gerenciamento dos processos de produção frente a variabilidade observada (EMBRAPA, 2005).

Dessa forma, os sistemas de manejo tradicionais, com o ineficiente tratamento da variabilidade de fatores que afetam a produção, pela média de extensas áreas de produção, pode dar lugar a estratégias econômicas e ecologicamente mais saudáveis, com tratamento de variabilidade sítio-específico (EMBRAPA, 2005).

As tecnologias aplicadas na agricultura de precisão são: sistema de posicionamento a partir de satélite (GPS); sistema de informação geográfica (SIG); e sensores eletrônicos (COELHO e SILVA, 2009).

De acordo com Coelho e Silva (2009) e Bongiovanni (2004) a Agricultura de Precisão possui dois grandes objetivos:

- aumento do rendimento dos produtores, ou seja, aumento de produtividade;

- redução do impacto ambiental.

Alcança-se redução do impacto ambiental com o rigor do controle da aplicação dos insumos, que deverá ser feita, tanto quanto possível, na medida da necessidade das plantas e/ou do terreno (COELHO e SILVA, 2009; BONGIOVANNI, 2004). Com esta prática ocorre aumento da produção, com a aplicação de mais adubo onde for necessário, como também podem ser reduzidos os custos e o impacto ambiental da atividade, não aplicando adubo em excesso, prevenindo-se a ocorrência de lixiviação de nutrientes (COELHO e SILVA, 2009; McBRATNEY *et al.*, 2005).

### 2.1.2. Uso de Defensivos Agrícolas na Produção de Soja

De acordo com Meyer e Cederberg (2010), a produção atual de soja depende, de forma acentuada, de defensivos agrícolas, configurando-se um desafio constante o controle de ervas daninhas aos produtores de soja.

As ervas daninhas, dentre as pragas que podem atacar a lavoura, são as que apresentam maior potencial para causar perdas de produção. Globalmente, estima-se que estas podem causar uma perda de até 37% da produção. Porém, com o uso das estratégias de controle presentes no método da agricultura de herbicidas, reduz-se tais perdas para 7 ou 8% (MEYER e CEDERBERG, 2010).

Segundo Meyer e Cederberg (2010), a agricultura brasileira apresenta um uso elevado, e em crescimento, de defensivos agrícolas. A produção da soja é apontada como responsável por este fato, visto que o cultivo desta oleaginosa consome 45% de todos os pesticidas vendidos.

Ainda acrescenta-se a esse fato o grande aumento na utilização de defensivos entre os anos de 2003 a 2008, correspondente a aproximadamente 70% na quantidade aplicada na lavoura referente a herbicidas, inseticidas e fungicidas (MEYER e CEDERBERG, 2010).

Estatísticas de vendas de defensivos mostram que o uso de herbicidas na soja aumentou após a adoção da nova técnica de controle de ervas daninhas – cultivar geneticamente modificada para tolerar glifosato. A maior causa do aumento do uso de herbicidas na soja foi o rápido desenvolvimento de ervas daninhas resistentes a glifosato em plantação de soja tolerante a esta substância (MEYER e CEDERBERG, 2010).

No Brasil há sinais de aumento no uso de herbicidas mais antigos e mais tóxicos na cultura da soja, e também a produção e importação de alguns defensivos com alta toxicidade, banidos em muitos países (MEYER e CEDERBERG, 2010).

É importante identificar os defensivos utilizados na produção de soja, e não simplesmente considerar a quantidade de ingredientes ativos utilizados, pois estes mudam com o tempo e os ingredientes ativos têm diferentes modos de ação e toxicidade e são usados em diferentes doses (MEYER e CEDERBERG, 2010).

## 2.2. INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA

A Análise do Inventário do Ciclo de Vida (LCI) envolve a coleta de dados e procedimentos de cálculo para quantificar entradas e saídas relevantes de um sistema de produto (ISO, 2006).

A análise do inventário realiza-se através das seguintes atividades (GUINÉE *et al.*, 2002):

- definição dos limites do sistema;
- construção do fluxograma do processo;
- coleta de dados de entradas e saídas do sistema;
- tratamento dos dados para estarem em conformidade com a unidade funcional definida, e;
- alocação - no caso de processos multi-funcionais.

Seu resultado principal compreende uma tabela de inventário com a quantificação das entradas oriundas do ambiente e as saídas para este último, em conformidade com uma unidade funcional (GUINÉE *et al.* 2002).

## 2.3. AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO CICLO DE VIDA

Na Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida os resultados da análise de inventário são processados e interpretados em termos de impactos ambientais. Para alcançar tal propósito, define-se uma lista de categorias de impacto (GUINÉE *et al.* 2002).

As intervenções ambientais devem ser relacionadas às categorias de impacto definidas. Este processo denomina-se classificação. Após esta etapa, faz-se necessário realizar a caracterização, ou seja, quantificar o potencial impacto ambiental que as intervenções listadas no inventário provocam nas categorias de impacto relacionadas (GUINÉE *et al.* 2002).

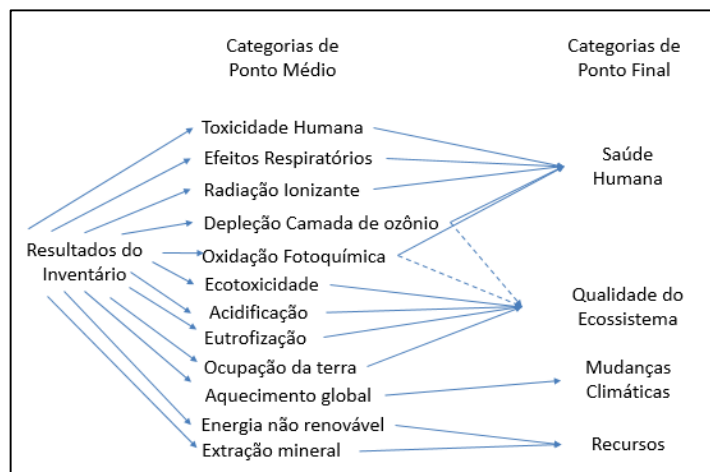


Estas etapas de classificação e caracterização podem ser levadas a termo através de métodos desenvolvidos para realizar avaliações de impacto ambiental. Dessa forma, os métodos ligam os resultados do inventário do ciclo de vida a um impacto ambiental (JOLLIET *et al.*, 2003).

Existem dois tipos de métodos para realizar uma avaliação do impacto ambiental (GOEDKOOOP *et al.*, 2009):

- métodos que convertem as emissões de substâncias perigosas e extração de recursos naturais em indicadores de categoria de impacto de ponto médio (como acidificação, mudança climática e ecotoxicidade) e;
- métodos que empregam indicadores de categoria de ponto final (como danos à saúde humana e danos à qualidade do ecossistema).

A Figura 1 mostra um esquema geral das ligações dos resultados do inventário com as categorias de impactos de ponto médio e ponto final.



**Figura 1.** Classificação das intervenções ambientais em categorias de ponto médio e ponto final.

**Fonte:** Adaptado de Jolliet *et al.* (2003).

Como mostra a Figura 1, os resultados do inventário com caminhos de impacto similares são alocados às categorias de impacto de ponto médio. Um indicador de ponto médio é então empregado para caracterizar os fluxos elementares e outras intervenções ambientais que contribuam com o mesmo impacto. Em seguida, essas categorias de impacto em ponto médio podem ser alocadas a uma, ou mais categorias de dano, representativas de mudanças na qualidade do meio ambiente (HUMBERT *et al.*, 2012).

### 2.3.1. Métodos de Avaliação de Impacto

Para realizar a avaliação ambiental de um sistema de produto estão à disposição dos usuários alguns métodos, como: CML-IA; EDIP 2003; IMPACT 2002+; ReCiPe; e USEtox.

#### 2.3.1.1. CML-IA (GUINÉE *et al.* 2002)

O método CML-IA desenvolveu-se com base no *Handbook on life Cycle Assessment: operational guide to the ISO Standards*, publicado por Guinée *et al.* (2002). Nesse método os indicadores de impacto referem-se ao ponto médio na cadeia causa-efeito. Para a modelagem, o método foi baseado em dados europeus.

No que se refere à construção do método, os autores consideram que:

- na análise de inventário o modelo considera estado estacionário em equilíbrio. Isto implica ser fundamental avaliar as consequências de longo prazo de uma decisão;
- o método ignora não linearidades no relacionamento entre entradas e saídas, e fluxos e efeitos em sistemas industriais e ecológicos;
- o método desenvolvido ignora detalhes em relação à distribuição temporal das atividades, emissões e efeitos. As emissões são especificadas como um total de emissão integrada no tempo. Procedimentos similares são empregados para os impactos ambientais. Ao mesmo tempo, no entanto, a análise de sensibilidade permite horizontes de tempo finitos;
- o método também ignora detalhes espaciais;
- a maioria dos mecanismos econômicos, sócio-culturais e tecnológicos são simplificados de forma grosseira ou completamente excluídos.

Segundo Guinée *et al.* (2002), os compartimentos considerados importantes que recebem as emissões são:

- ar;
- água doce;
- água marinha;
- solo agrícola;
- solo industrial.

De acordo com Guinée *et al.* (2002), para a definição das categorias de impacto, que iriam compor o método, recorreu-se à lista de categorias de impacto desenvolvida pela SETAC. Selecionaram-se as seguintes categorias de impacto:

- Depleção de recursos abióticos;
- Mudança climática;
- Depleção de ozônio estratosférico;
- Toxicidade humana;
- Ecotoxicidade;
  - Água doce;
  - Água marinha;
  - Terrestre;
- Formação foto-oxidante;
- Acidificação;
- Eutrofização.

No CML-IA é possível escolher diferentes cenários em relação a horizonte de tempo e escala geográfica. As alternativas disponíveis no método, apresentadas na Tabela 1, são:

**Tabela 1.** Cenários disponível no CML-IA, com diferenças no horizonte temporal e escala geográfica.

| <b>Alternativas</b> | <b>Método/fator de caracterização</b> |
|---------------------|---------------------------------------|
| Básico              | $HTP_{\infty,global}^1$               |
| Alternativa 1       | $HTP_{20,global}$                     |
| Alternativa 2       | $HTP_{100,global}$                    |
| Alternativa 3       | $HTP_{500,global}$                    |
| Alternativa 4       | $HTP_{\infty,continental}$            |

Cenários disponíveis para categorias de toxicidade humana e ecotoxicidade. 1 – horizonte de tempo. 2 – escala geográfica.

**Fonte:** (GUINÉE *et al.* 2002)

Para realizar o cálculo dos fatores de caracterização nas categorias relacionadas à toxicidade, o CML-IA utiliza o modelo USES 2.0, adaptado para ACV. Os resultados do potencial impacto de toxicidade são referenciados a uma substância de referência - 1,4 diclorobenzeno.

A categoria de Toxicidade Humana cobre os impactos na saúde humana devido às substâncias tóxicas presentes no ambiente. A área de proteção desta categoria de impacto é saúde humana.

A categoria Ecotoxicidade cobre os impactos das substâncias tóxicas nos ecossistemas aquáticos, terrestre e sedimento. A área de proteção é ambiente natural.

No CML-IA foram incluídos os fatores de caracterização apresentados por Guinée *et al.* (2002).

A formula empregada para o cálculo do potencial de toxicidade humana é:

$$\text{toxicidade humana} = \sum_i \sum_{ecom} HTP_{ecom,i} \times m_{ecom,i} \quad (1)$$

sendo:

$HTP_{ecom,i}$  – o fator de caracterização para o Potencial de Toxicidade Humana para a substância  $i$  emitida ao compartimento  $ecom$  (ar, água doce, água marinha, solo agrícola ou solo industrial);  
 $m_{ecom,i}$  – a emissão da substância  $i$  ao compartimento  $ecom$  (ar, água doce, água marinha, solo agrícola ou solo industrial).

Para o cálculo do potencial de ecotoxicidade, o CML-IA oferece fatores de caracterização para ecotoxicidade em água doce (FAETP), água marinha (MAETP) e terrestre (TETP).

Para o cálculo do potencial de ecotoxicidade são empregadas as seguintes equações:

$$\text{ecotoxicidade água doce} = \sum_i \sum_{ecom} FAETP_{ecom,i} \times m_{ecom,i} \quad (2)$$

$$\text{ecotoxicidade água marinha} = \sum_i \sum_{ecom} MAETP_{ecom,i} \times m_{ecom,i} \quad (3)$$

$$\text{ecotoxicidade terrestre} = \sum_i \sum_{ecom} TETP_{ecom,i} \times m_{ecom,i} \quad (4)$$

sendo:

$FAETP_{ecom,i}$  - o fator de caracterização de ecotoxicidade de água doce da substância  $i$  emitida ao compartimento  $ecom$  (ar, água doce, água marinha, solo agrícola e solo industrial);

$MAETP_{ecom,i}$  - o fator de caracterização de ecotoxicidade de água marinha da substância  $i$  emitida ao compartimento  $ecom$  (ar, água doce, água marinha, solo agrícola e solo industrial);

$TETP_{ecom,i}$  - o fator de caracterização de ecotoxicidade terrestre da substância  $i$  emitida ao compartimento  $ecom$  (ar, água doce, água marinha, solo agrícola e solo industrial).

De acordo com o mesmo autor, os dados foram garantidos pelo pesquisador Huijbregts e submetidos a uma revisão crítica não oficial. As incertezas do modelo e dos parâmetros ainda são consideráveis. Cuidado especial precisa ser tomado caso os resultados dependam predominantemente (ou especialmente) de metais pesados, em particular berílio (Be) e cromo (Cr).

### 2.3.1.2. EDIP

O EDIP caracteriza-se como um método de avaliação de impacto para a Avaliação do Ciclo de Vida desenvolvido com base em dados europeus. A quantificação dos impactos pelo método se dá em ponto médio na cadeia de causa e efeito (POTTING e HAUSCHILD, 2005a).

Nesse método existem fatores de caracterização disponíveis para 44 regiões, ou países da Europa, e também valores médios deste continente (POTTING e HAUSCHILD, 2005a).

No EDIP 97, primeira versão do método, foca-se a modelagem de caracterização, primeiramente, nos mecanismos ambientais para algumas das categorias de impacto. Os fatores de caracterização baseiam-se, exclusivamente, no conhecimento das propriedades das substâncias emitidas, desconsiderando as propriedades do ambiente receptor (POTTING e HAUSCHILD, 2005a).

Os compartimentos considerados são: ar; água e solo. Nesse método, o destino de uma substância é modelado como sendo um compartimento uniforme, ou seja, não há diferenciação em tipos de água e solo (POTTING, HAUSCHILD, 2005b; POTTING e HAUSCHILD 2005a).

A versão seguinte, EDIP 2003, inclui a avaliação de exposição baseada em informações regionais para emissões não globais, sendo que as categorias de impacto avaliadas regionalmente são (POTTING, HAUSCHILD, 2005b):

- Formação de ozônio fotoquímico;
- Acidificação;
- Eutrofização (terrestre e aquática);
- Ecotoxicidade;
- Toxicidade humana;
- Ruído.

Já as categorias de impacto que são avaliadas pelo método globalmente são:

- Aquecimento global;
- Depleção camada de ozônio.

A inclusão de informações regionais, bem como, as características do ambiente que recebe as emissões, se revela importante pois minimiza a discrepância entre o impacto modelado e o impacto real. Isto é atingido pela inclusão de uma maior parte da cadeia de causalidade e pela introdução de diferenciação espacial em relação à emissão e ao ambiente que a recebe (POTTING, HAUSCHILD, 2005b).

Para calcular o potencial impacto ambiental o método emprega a seguinte equação (POTTING, HAUSCHILD, 2005b):

$$EP_i^{mn} = E_i^m F_i^{nm} Q_i^n \quad (4)$$

sendo:

$EP$  – potencial impacto ambiental;

$E$  – fator de efeito;

$F$  – Fator de destino;

$Q$  – Quantidade total emitida;

$i$  – substância química;

$n$  – meio ambiente;

$m$  – rota de exposição.

No EDIP 2003, o fator de destino considera mecanismos de dispersão e distribuição das substâncias entre os compartimentos (POTTING, HAUSCHILD, 2005b).

Para o fator de efeito, muitos métodos consideram-no como o inverso da dose que não apresenta efeitos à população (POTTING e HAUSCHILD, 2005a):

$$E_i^m = \frac{1}{PNEC_{i,m}} \quad (5)$$

Neste caso, Potting e Hauschild (2005a) supõem que o efeito depende somente das propriedades da substância química, e não do ambiente que a está recebendo. Assim, os únicos processos de destino relevantes a serem considerados na modelagem da caracterização ambiental são aqueles que alteram a quantidade da substância que atinge as diferentes partes do ambiente (degradação biológica, transformação química, evaporação, deposição e sedimentação, etc.).

Vale ressaltar ainda que na caracterização da ecotoxicidade nenhuma distinção é feita entre os diferentes tipos de efeitos causados pelas substâncias químicas (POTTING e HAUSCHILD, 2005a).

#### 2.3.1.2.1. Toxicidade humana

De acordo com Potting e Hauschild (2005a), os fatores de caracterização de toxicidade humana podem ser obtidos da seguinte forma:

- previsão do aumento da exposição ou concentração ambiental para uma unidade de emissão de uma dada substância (avaliação da exposição) – PEC;
- concomitantemente, prever qual a concentração que não prejudica o ambiente – PNEC;
- por último divide-se o PEC por PNEC.

No que se refere à modelagem de destino, a estratégia do EDIP 97 consiste em identificar aquelas propriedades das substâncias relevantes para a toxicidade humana e, então, combiná-las na expressão do fator de caracterização (POTTING, HAUSCHILD, 2005b).

Ressalta-se - no EDIP 2003 os fatores de caracterização de toxicidade humana para emissões atmosféricas consideram: variação na altura da emissão; condições atmosféricas e a densidade populacional nas áreas expostas (Potting e Hauschild 2005a). Para as emissões atmosféricas, a rota de exposição priorizada pelo método é a inalação.

Ainda citando o EDIP 2003, considerando a rota de exposição ar, para a determinação dos fatores de caracterização para toxicidade humana, são levados em conta os seguintes aspectos:

- dois tipos de substâncias diferentes - uma de vida curta, o cloreto de hidrogênio, outra de vida longa, o benzeno;
- variação atual da densidade populacional regional e local;
- consideração de diferentes alturas de emissão: 1m; 25m; e 100m.

Para realizar essa diferenciação espacial, em relação às alturas da emissão, os autores se baseiam na altura da fonte emissora (ponto de emissão) e avaliam a concentração dos poluentes no nível do solo, considerando diferentes distâncias da fonte (direção horizontal). Argumentam os autores que o aumento da concentração no nível do solo depende da velocidade do vento e das características da fonte (altura e dinâmica de liberação) (POTTING e HAUSCHILD, 2005a).

Dessa forma, para a determinação dos fatores de exposição, os estudiosos propõem a combinação das seguintes situações (POTTING, HAUSCHILD, 2005b):

- substância emitida - modelo de substância de vida curta e vida longa;
- diferentes alturas de emissão;
- diferentes localizações geográficas;
- variação atual nas condições atmosféricas;
- variação atual na densidade populacional local e regional.

O fator de exposição local-dependente consiste em duas partes: quantificação da exposição próximo a fonte (0 – 10km); quantificação da exposição em longas distâncias da fonte (> 10km) (POTTING e HAUSCHILD 2005a).

#### 2.3.1.2.2. Ecotoxicidade

Para realizar a avaliação do impacto referente à Ecotoxicidade, o EDIP97 procura identificar as propriedades consideradas importantes para o potencial de ecotoxicidade da substância, como processos de transferência entre compartimentos e biodegradação e, então, incluí-las na expressão do fator de caracterização (POTTING e HAUSCHILD, 2005b).

No método (versão 97), considera-se a ecotoxicidade nos ecossistemas aquáticos (aguda e crônica), terrestres (exposição crônica) e em plantas de tratamento de efluentes (POTTING e HAUSCHILD, 2005a).

De acordo com os mesmos autores acima citados, as seguintes considerações referentes ao destino podem ser relevantes para caracterização do local:

- Diluição e evaporação - nenhuma diferenciação espacial é esperada nos padrões de diluição e dispersão das emissões para o solo. A evaporação é representada no modelo de destino-genérico, porém, apresenta uma variação espacial, dependente, entre outros fatores, da temperatura. Segundo os autores a ecotoxicidade aquática aguda não é modelada com caracterização espacial. A variação espacial na partição em equilíbrio para o ar da água ou solo para químicos semi-voláteis pode ser modelado baseado na média anual de temperatura;
- Dispersão - para emissões diretas ao solo, a dispersão é muito pequena. Assim, variações espaciais são negligenciadas na modelagem.
- Adsorção e imobilização - esta questão é tratada no processo de biodegradação ou outros mecanismos de degradação no fator de caracterização genérico;
- Biodegradação.

Segundo Potting e Hauschild (2005a), é impossível incorporar informações locais dependentes sobre *background* dos poluentes no ecossistema exposto na caracterização de ecotoxicidade, ou seja, não são considerados pelo método.

Na caracterização espacial, trata-se o ar, exclusivamente, como um meio de dispersão. Nas emissões para a água, realiza-se uma distinção entre efeitos ecotóxicos agudos e crônicos. Nas emissões para o solo, são consideradas: dispersão e diluição, evaporação, adsorção, biodegradação e outras transformações (POTTING e HAUSCHILD, 2005a).

No método são realizadas as seguintes considerações (POTTING e HAUSCHILD, 2005 a):

- emissões para o ar
  - a localização do ponto de emissão determina a fração da emissão depositada que expõe ecossistemas no solo e na água;
- emissões para água
  - remoção por evaporação;
  - remoção por sorção, seguida de sedimentação (somente para EDIP 2003);
  - remoção por biodegradação;
- emissões para o solo
  - remoção por biodegradação.

O EDIP 97 calcula o fator de caracterização para ecotoxicidade crônica em um compartimento ambiental  $n$ , a partir da emissão de uma substância  $i$  para um compartimento  $m$ , da seguinte forma (POTTING e HAUSCHILD, 2005b):



$$CF(etnc)_i^m = f^{mn} BIO_i \frac{1}{PNEC_{i,n}} \quad (6)$$

sendo:

$f^{mn}$  – fração da emissão que atinge o compartimento final  $n$ ;

$BIO$  – potencial de biodegradação;

$1/PNEC$  – toxicidade da substância no ambiente  $n$ .

Nesta fórmula adiciona-se um fator local  $SFp$  como modificador do fator de caracterização com o propósito de realizar uma diferenciação espacial. O fator local é interpretado como a probabilidade de todo o impacto ocorrer, ou seja, ele varia entre 0 e 1 (POTTING e HAUSCHILD, 2005a).

No EDIP2003, na obtenção dos fatores de exposição para ecotoxicidade, a diferenciação geográfica é obtida pela multiplicação do fator de caracterização local-genérico e um fator de exposição, visto como um modificador que expressa o grau em que a exposição realmente ocorre. Este fator ( $EEF$ ) depende tanto das propriedades da substância, como das características espaciais do processo. O  $EEF$  é expresso como um produto das seguintes variáveis (POTTING e HAUSCHILD, 2005b):

- $SFem$  – variação espacial dos parâmetros da emissão;
- $SFbio$  – variação espacial da biodegradação e outros parâmetros de transformação;
- $SFsed$  – variação espacial de parâmetros de sorção e sedimentação.

De acordo com Potting e Hauschild, (2005b), há considerável incerteza nos fatores de exposição desenvolvidos para ecotoxicidade e, estas incertezas podem exceder a variação dada pelos fatores.

De acordo com Potting e Hauschild (2005b), entre as emissões transportadas pela água e pelo ar, os fatores existentes no EDIP97 são somente para metais. Acreditam os autores, serem os metais os maiores contribuintes para ecotoxicidade na água e no solo.

### 2.3.1.3. IMPACT 2002+

O método IMPACT 2002+ classifica os resultados do inventário em 14 categorias de impacto de ponto médio. Em seguida, tais categorias podem ser agrupadas em 4 categorias de dano (ponto final) (JOLLIET *et al.*, 2003).

No IMPACT 2002+ os fatores de caracterização de ponto médio são baseados em princípios de equivalência. Para toxicidade humana (carcinogênico e não-carcinogênico) a substância de referência é o cloroetileno no ar e, para ecotoxicidade (terrestre e aquática) a

substância é o trietileno glicol em água. Os efeitos de longo prazo das substâncias são considerados de acordo com o horizonte de tempo – infinito ou, algumas vezes, por 500 anos (JOLLIET *et al.*, 2003).

Para gerar os fatores de caracterização de toxicidade humana e ecotoxicidade, o referido método utiliza o modelo IMPACT 2002. Este é um modelo de destinos multi-meios e múltiplos caminhos de exposição e efeitos (HUMBERT *et al.*, 2012).

Para metais pesados, o modelo considera somente aqueles emitidos na forma dissolvida (íons) (JOLLIET *et al.*, 2003).

#### 2.3.1.3.1. Toxicidade humana

Dentro da categoria Toxicidade Humana, o IMPACT 2002 representa todos os efeitos de uma substância na saúde humana, com exceção para os efeitos respiratórios causados por substâncias inorgânicas, efeitos de radiação ionizante e efeitos da depleção da camada de ozônio. Estes são considerados separadamente (HUMBERT *et al.*, 2012).

O mesmo modelo considera caminhos de exposição múltiplos que ligam a concentração das substâncias na atmosfera, no solo, na superfície da água ou na vegetação à ingestão humana, através da inalação ou ingestão. Via ingestão, o método considera, entre outros, a ingestão de produtos agrícolas. Desenvolvimentos mais recentes também incluem o cálculo de resíduo de pesticida nos alimentos, via emissão difusa. Os autores concordam que o dano causado pelo pesticida via alimento tratado é, em geral, muito maior que a emissão difusa, porém citam não ter meios de quantificar tal emissão. (HUMBERT *et al.*, 2012).

O IMPACT 2002 calcula fatores de caracterização genéricos, em escala continental, sendo que os dados são baseados na Europa Ocidental. Os compartimentos considerados pelo modelo são: ar, água, solo e solo agrícola (HUMBERT *et al.*, 2012).

Os fatores de caracterização para efeitos toxicológicos crônicos na saúde humana, denominados Potencial de Toxicidade Humana (HTP – para ponto médio) e Fator de Dano Humano (HDF – ponto final), proveem estimativa do risco toxicológico acumulado e o impacto potencial associado a uma quantidade (kg) de substância química emitida no ambiente (JOLLIET *et al.*, 2003).

De acordo com Humbert *et al.* (2012), os fatores de dano em solos usados para agricultura são maiores que os fatores de dano para emissões ligadas ao solo não especificado.

Isto porque, de acordo com os autores, uma ingestão via produtos agrícolas é 4,6 vezes maior que uma ingestão via emissões por solo não especificado.

No modelo, para o cálculo dos fatores de efeito para toxicidade humana, são considerados dados de respostas significativas (HUMBERT *et al.*, 2012).

O IMPACT 2002, para calcular os fatores de caracterização em ponto médio, toma como base o Fator de Dano Humano. Este fator, para uma substância  $i$ , é calculado por (JOLLIET *et al.*, 2003):

$$HDF_i = iF_I \cdot EF_i = iF_I \cdot \beta_i \cdot D_i \quad (7)$$

$$\beta = \frac{1}{BW \cdot LTh \cdot N_{365}} \quad (8)$$

sendo:

$iF$  – fração mássica da substância emitida ao ambiente que atinge a população humana pela contaminação dos alimentos, inalação ou exposição da pele ( $\text{kg}_{\text{intake}}$  por  $\text{kg}_{\text{emitido}}$ );

$EF$  – fator de efeito;

$\beta$  – fator da curva concentração-efeito (risco de incidência por  $\text{kg}_{\text{intake}}$ );

$D$  – severidade (DALY por incidência)

$BW$  – peso médio da população considerada;

$LTh$  – tempo de vida médio da população em anos;

$N_{365}$  – número de dias por ano.

De acordo com Jolliet *et al.* (2003), na modelagem das emissões para o ar, considera-se o caráter intermitente da chuva em um modelo de estado estacionário.

Para obter os fatores de caracterização de ponto médio o modelo divide o  $HDF_i$  por aquele da substância de referência (JOLLIET *et al.*, 2003):

$$HTP_i = HDF_i / HDF_{\text{cloroetileno}} \quad (9)$$

#### 2.3.1.3.2. Ecotoxicidade aquática e terrestre

No modelo IMPACT 2002, os fatores de caracterização de ecotoxicidade aquática consideram emissões no ar, água e solo, sendo os efeitos da ecotoxicidade quantificados em água doce. Vale ressaltar a inexistência de fatores de caracterização disponíveis para emissões em água subterrânea, estratosfera e oceanos (HUMBERT *et al.*, 2012).

No mesmo modelo, para o cálculo dos fatores de efeito de ecotoxicidade são considerados dados de respostas significativas (HUMBERT *et al.*, 2012).

Para ecossistemas aquáticos de água doce a Fração Potencialmente Afetada (APAF em PAF m<sup>3</sup>yr.kg<sup>-1</sup>) das espécies, por unidade de emissão, baseia-se no fator de destino ( $F \cdot \theta$  em anos) e no fator de efeito ( $\beta$  em PAF.m<sup>3</sup>.kg<sup>-1</sup>) (JOLLIET *et al.*, 2003):

$$APAF_i = F_i^{mw} \cdot \theta_i^w \cdot \beta_i \quad (10)$$

sendo:

$F_i^{mw}$  – fração adimensional da emissão da substância  $i$  no compartimento  $m$  transferido para água doce;

$\theta_i^w$  – tempo de residência equivalente da substância  $i$  na água, que pode ser o inverso da constante da taxa global de decaimento na água ( $k$ );

De acordo com Jolliet *et al.* (2003), considera-se no tempo de residência o volume de água que recebe a emissão. Dessa forma, poluir todos os lagos da Europa não é equivalente a poluir um pequeno lago.

O fator de efeito  $\beta$  é a mudança na Fração Potencialmente Afetada das espécies que sofrem devido mudança na concentração do contaminante, sendo encontrado por (JOLLIET *et al.*, 2003):

$$\beta_i = 0,5/HC50_i^w \quad (11)$$

sendo:

$HC50_i^w$  – concentração perigosa média que afeta 50% das espécies presentes no ecossistema.

Para calcular o Potencial de Ecotoxicidade Aquática ( $AEP_i$  em kg<sub>eq</sub> de trietileno glicol em água por kg<sub>i</sub>) – impacto no ecossistema aquático de ponto médio – é necessário dividir o APAF da substância  $i$  pelo APAF da substância de referência (trietileno glicol em água):

$$AEP_i = \frac{APAF_i}{APAF_{\text{trietileno glicol}}} \quad (12)$$

Os fatores de caracterização em ponto médio da categoria Ecotoxicidade Terrestre são expressos em kg de trietileno glicol em solo.

Calcula-se o Potencial de Ecotoxicidade Terrestre com base no  $HC50^s$  terrestre (JOLLIET *et al.*, 2003):

$$HC50_i^s = HC50_i^w (K_{di} \cdot \rho^s + f^w) \quad (13)$$

sendo:

$K_{di}$  – coeficiente de adsorção da substância  $i$  (m<sup>3</sup>.kg<sup>-1</sup>);

$\rho$  – densidade do solo (kg.m<sup>-3</sup>);

$f$  – conteúdo volumétrico de água no solo (adimensional).

O fator caracterização em ponto médio é obtido de forma análoga ao fator de caracterização da ecotoxicidade aquática (HUMBERT *et al.*, 2012).

#### 2.3.1.4. ReCiPe (GOEDKOOOP *et al.*, 2009)

ReCiPe consiste num método para Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV), sucessor dos métodos Eco-Indicator 99 e o CML-IA. O ReCiPe oferece a possibilidade de realizar as avaliações do impacto, tanto em ponto médio, quanto em ponto final.

Este método é construído com base em informação da Europa Ocidental.

Os mecanismos ambientais e os modelos de dano são fontes de incertezas. Neste método as incertezas foram incorporadas na forma de diferentes perspectivas, com o objetivo de agrupar tipos similares de suposições e escolhas, sendo elas:

- Individualista (I) - baseada em interesses de curto prazo, tipos de impactos que são indiscutíveis;
- Hierárquico (H) - baseada nos princípios mais comuns em relação a horizontes de tempo e outras questões;
- Igualitário (E) – consiste na perspectiva com maior precaução, levando em consideração horizontes de longo prazo, tipos de impactos que ainda não são totalmente estabelecidos, porém disponíveis por alguns indicadores, etc.

De acordo com Goedkoop *et al.*, (2009), as categorias de ponto médio incluídas no ReCiPe são:

- |                                     |  |
|-------------------------------------|--|
| • Mudança climática;                | • Ecotoxicidade de água doce;          |
| • Depleção de ozônio;               | • Ecotoxicidade marinha;               |
| • Acidificação terrestre;           | • Radiação ionizante;                  |
| • Eutrofização de água doce;        | • Ocupação de terras para agricultura; |
| • Eutrofização de água marinha;     | • Ocupação de terra para área urbana;  |
| • Toxicidade humana;                | • Transformação natural da terra;      |
| • Formação de oxidante fotoquímico; | • Depleção de água;                    |
| • Formação de material particulado; | • Depleção de recursos minerais;       |
| • Ecotoxicidade terrestre;          | • Depleção de recursos fósseis.        |

Para ponto final, as categorias de impacto consideradas são:

- Dano à saúde humana;
- Dano à diversidade do ecossistema;
- Dano à disponibilidade de recursos.

O método ReCiPe tem validade para regiões de clima temperado. Segundo Goedkoop *et al.* (2009), diferenças nas condições climáticas podem influenciar os parâmetros do modelo

de destino. Outro fator passível de causar alteração consiste nas diferenças de densidade populacional.

Para Goedkoop *et al.* (2009) mecanismos ambientais importantes não foram incluídos no método, como alguns problemas relacionados ao uso da terra, tais como: erosão, salinização e depleção de solo.

Para as categorias de impacto Toxicidade Humana, e aquelas referentes à Ecotoxicidade, a avaliação do impacto realiza-se com referência à substância 1,4-diclorobenzeno.

O fator de caracterização de toxicidade humana e ecotoxicidade leva em conta características da substância química como: persistência no ambiente (destino), acumulação na cadeia alimentar humana (exposição) e a toxicidade (efeito). Os fatores de destino e exposição são passíveis de cálculo através de modelos multi-meios e, fatores de efeito podem ser derivados de dados de toxicidade em seres humanos e animais de laboratório.

No ReCiPe, para avaliar a qualidade do ecossistema, os autores se baseiam em informação sobre espécies. Isto significa dizer que a suposição de diversidade de espécies representa uma forma adequada de avaliar a qualidade do ecossistema.

Uma consideração importante feita pelos autores para avaliar a diversidade das espécies consiste em que a extinção completa de uma espécie geralmente ocorre como resultado de muitos e diferentes fatores. Esta suposição implica em que um único ciclo de vida não é responsável pela extinção, mas que todos os ciclos de vida de produtos, conjuntamente, podem ser responsáveis pela total extinção de uma espécie.

Baseado neste raciocínio, modelou-se no método a perda de espécies durante um certo tempo, em uma certa área, como base para o indicador de ponto final.

#### 2.3.1.4.1. Fator de exposição e destino

O fator de destino é considerado como a mudança marginal da concentração de uma substância, em estado estacionário, em um compartimento ambiental, devido a uma mudança na emissão.

Na Tabela 2, estão relacionados os compartimentos de emissão e as rotas de exposição humana considerados pelo ReCiPe.

**Tabela 2.** Compartimentos ambientais e rotas de exposição consideradas pelo ReCiPe.

| <b>Compartimento emissor</b> | <b>Rotas de exposição humana</b>      |
|------------------------------|---------------------------------------|
| Ar urbano                    | Inalação                              |
| Ar rural                     | Ingestão via tubérculos               |
| Água doce                    | Ingestão via vegetais foliares        |
| Água do mar                  | Ingestão via produtos à base de carne |
| Solo agrícola                | Ingestão via produtos lácteos         |
| Solo industrial              | Ingestão via ovos                     |
| Solo natural                 | Ingestão via peixe de água doce       |
|                              | Ingestão via peixe de água salgada    |
|                              | Ingestão via água para consumo humano |

**Fonte:** (GOEDKOOPE *et al.*, 2009)

Para modelar as consequências de destino e exposição em áreas com elevada e baixa densidade populacional, dividiu-se a escala continental em escala urbana e escala rural. A escala urbana possui dois compartimentos: ar e solo urbano. A escala rural inclui os seguintes compartimentos: ar, água doce, sedimento em água doce, água salgada, sedimento em água salgada, solo natural, solo agrícola e solo industrial. Nos cálculos de destino e exposição, as emissões para o ar são especificadas para ar urbano e rural, respectivamente.

Considerou-se no método a redução teórica esperada da concentração das substâncias no solo de acordo com a profundidade. Processos relacionados ao solo, como volatilização, lixiviação, escoamento, drenagem e transpiração vegetal são modelados com concentrações do solo específicas em relação a sua profundidade.

Outras considerações implementadas no método são:

- a concentração média nos 20 cm superiores do solo é incluída no cálculo dos fatores de destino terrestres, assumindo que espécies terrestres são expostas a contaminantes somente nos 20 cm superiores do solo;
- as mudanças na concentração ambiental e ingestão humana são calculados em condições - com e sem chuva;
- considera-se que a água para consumo humano, proveniente do subsolo, vem de solo agrícola, solo natural e solo industrial. Para avaliação da exposição humana, as concentrações em água subterrânea são calculadas com 1 metro de profundidade;
- o método realiza considerações sobre as taxas de degradação em água doce, salgada, na vegetação e no solo;

Para obter o fator de destino o ReCiPe emprega a seguinte equação:

$$F_{j,i,x} = \frac{\partial C_{j,x}}{\partial M_{i,x}} \quad (14)$$

sendo:

$F_{j,i,x}$  – fator de destino que considera o transporte da substância  $x$  do compartimento  $i$  para o compartimento  $j$ ;

$C_{j,x}$  – a mudança marginal da concentração dissolvida em estado estacionário da substância  $x$  no compartimento  $j$ ;

$M_{i,x}$  – mudança da emissão da substância  $x$  para o compartimento  $i$ .

#### 2.3.1.4.2. Fator de efeito ecotoxicológico

Para ecotoxicidade, cálculos dos efeitos ecotoxicológicos combinados de misturas de substâncias químicas em um grupo de espécies assumem independência das diferentes formas de ação tóxicas.

O fator de efeito ecotoxicológico da substância  $x$  é quantificado pela equação:

$$\frac{\partial PDF_{tox}}{\partial C_x} = \frac{\partial PDF_{tox}}{\partial TU_k} \cdot \frac{\partial TU_k}{\partial C_x} \quad (15)$$

sendo:

$TU_k$  – toxicidade efetiva de um grupo de poluentes com o mesmo modo de ação;

$PDF$  – fração de espécies potencialmente afetadas;

$C_x$  – mudança marginal da concentração da substância  $x$ .

#### 2.3.1.4.3. Efeito toxicológico humano e fator de dano

Os fatores de dano foram obtidos a partir da extensa carga de doenças e estatísticas de saúde, em nível mundial, para o ano 1990. Foram aplicados pesos equivalentes para a importância de 1 ano de perda de vida para todas as idades e sem descontos para futuros danos.

O fator de efeito é função do dano à população, causado por um número de doenças, pela probabilidade de ocorrência da doença, pela toxicidade efetiva da substância  $x$  e por sua ingestão, obtido então por:

$$\frac{\partial DALY_{ov}}{\partial I_x} = \frac{\partial DALY_{ov}}{\partial R_e} \cdot \frac{\partial R_e}{\partial TU_e} \cdot \frac{\partial TU_e}{\partial I_x} \quad (16)$$

sendo:

$DALY_{ov}$  – dano à população causado por um número de doenças;

$R_e$  – probabilidade de ocorrência da doença  $e$ ;

$TU_e$  – toxicidade efetiva;

$I_x$  – ingestão da substância  $x$ .



#### 2.3.1.4.4. Fator de caracterização de ponto final

O fator de caracterização para o ecossistema consiste em um fator de destino ( $F$ ) e um fator de efeito ( $E$ ):

$$CF_{j,i,x} = F_{j,i,x} \cdot E_{j,x} \quad (17)$$

Sendo um componente  $x$ , emitido ao compartimento  $i$  e transportado ao compartimento  $j$ .

Em um segundo passo, os fatores de caracterização são agregados com base no volume e área do compartimento para um fator de caracterização para ambiente marinho e terrestre.

$$CF_{q,i,x} = SD_q \cdot \sum_q CF_{q,i,x} \cdot W_{j \in q} \quad (18)$$

sendo:

$CF_{q,i,x}$  - fator de caracterização para a substância  $x$  emitida ao compartimento  $i$  causando efeitos no compartimento  $q$ .

$W_j$  - área ou volume do compartimento  $j$  no ambiente  $q$

$SD_q$  - densidade da espécie no ambiente  $q$ .

O fator de caracterização humano consiste em um fator de destino ( $F$ ) e um fator combinado de efeito e dano ( $E$ ):

$$CF_{r,i,x,g,c/nc} = F_{r,i,x,g} \cdot E_{r,x,c/nc} \quad (19)$$

sendo:

$CF_{r,i,x,g,c/nc}$  - fator de caracterização humano para efeitos cancerígenos e não cancerígenos, em escala  $g$  que considera o transporte da substância  $x$ , via rota de ingestão  $r$ , para emissões ao compartimento  $i$ .

#### 2.3.1.4.5. Fator de caracterização de ponto médio

O fator de caracterização de ponto médio para ecotoxicidade inclui o fator de destino e o fator de efeito. O método considera que a mudança marginal na fração de espécies desaparecidas,  $\partial PDF / \partial TU$ , modelou-se como uma constante (0,55) devido à falta de dados. Isto significa dizer que o método considera que não há diferenças nas substâncias químicas e no ecossistema. Dessa forma, o fator de caracterização é dado por:

$$CF = \frac{\partial C_{n,x}}{\partial M_{m,x}} \cdot \frac{\partial TU_k}{\partial C_x} \cdot 0,55 \quad (20)$$

sendo:

$\partial C_{n,x}$  - mudança marginal na concentração da substância  $x$  no compartimento final  $n$ ;

$\partial M_{m,x}$  - mudança da emissão da substância  $x$  para o compartimento  $m$ ;

$\partial TU_k$  – toxicidade efetiva de um grupo de poluentes.

O fator de caracterização de ponto médio para toxicidade humana inclui: o fator de destino, de exposição, o fator de efeito toxicológico humano e o fator de dano. O componente referente à perda de anos de vida, ajustados por incapacidade (*DALY*), modelou-se como constante (1,9), devido à falta de dados sobre substância química. Dessa forma, o fator de caracterização é calculado por:

$$CF = \frac{\partial I_{n,x}}{\partial M_{m,x}} \cdot \frac{\partial TU_x}{\partial I_x} \cdot 1,9 \quad (21)$$

#### 2.3.1.5. USEtox

USEtox vem a ser um método para caracterização de impactos tóxicos humanos e em ecossistemas dentro da Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida (AICV). Este modelo tem por objetivo descrever destino, exposição e efeitos das substâncias tóxicas (HUIJBREGTS et al, 2010, ROSENBAUM et al, 2008).

Este método oferece fatores de caracterização para toxicidade, usando uma metodologia simples o suficiente para ser aplicada em nível global para um grande número de substâncias e com amplo consenso científico (ROSENBAUM et al, 2008).

Uma vantagem apresentada pelo USEtox é a possibilidade de o usuário calcular novos fatores de caracterização (HENDERSON et al, 2011).

Para o desenvolvimento do USEtox foi conduzida uma comparação quantitativa em sete modelos de AICV com vistas a identificar os parâmetros de maior influência, bem como as razões para as diferenças entre os modelos. Os modelos que compuseram a comparação foram (ROSENBAUM et al, 2008):

- CalTOX;
- IMPACT 2002;
- USES-LCA;
- BERT;
- EDIP;
- WATSON, e;
- EcoSense.

Realizaram-se as comparações com 45 substâncias orgânicas, cobrindo uma ampla faixa de combinações de propriedades de acordo com os seguintes critérios: particionamento

ambiental; rotas de exposição; persistência; transporte pelo ar de longo alcance; importância do retorno entre meios; e hidrofobicidade extrema (ROSENBAUM et al, 2008).

O USEtox foi desenvolvido seguindo os seguintes princípios (ROSENBAUM et al, 2008):

- Parcimônia: tão simples quanto possível, tão complexo quanto necessário;
- Mimético - não se difere mais dos modelos originais do que estes se diferem entre si;
- Avaliado: concentrar conhecimento pela avaliação de um conjunto amplo de modelos existentes;
- Transparente: ser bem documentado, incluindo as razões das escolhas do modelo.

O USEtox abrange duas escalas espaciais: continental e global. A escala continental consiste em seis compartimentos ambientais - ar urbano, ar rural, solo agrícola, solo industrial, água doce e água marinha costal. A escala global tem a mesma estrutura da escala continental, porém sem ar urbano e considera impactos fora da escala continental, (ROSENBAUM et al, 2008). A escala continental está incluída dentro da escala global e as substâncias químicas podem ser transportadas de uma escala para uma mais elevada e vice versa (da continental para global, ou o contrário) (HUIJBREGTS et al, 2010).

Para avaliar a toxicidade, os primeiros modelos criados empregavam métricas baseadas em padrões regulatórios, como doses de referência (RfD), ou ingestão diária aceitável baseadas em suposições para que estes padrões refletissem níveis similares de risco. No entanto, tais padrões podem incorporar níveis diferentes de segurança. O USEtox propõe que os indicadores de efeito toxicológicos sejam baseados em medidas comparativas do risco: medidas comparativas de efeito devem ser usadas como forma de ordenar as toxicidades relativas das substâncias, ao invés de usar medidas como Nível de Efeito Adverso Não Observado (NOEL), Nível de Efeito Adverso Mínimo Observado (LOEL) ou RfD (ROSENBAUM et al, 2011).

Medidas comparativas incluem: TD<sub>50S</sub> – dose que origina uma resposta tóxica em 50% da população em estudo; ED<sub>10</sub> e ED<sub>50</sub> – doses que resultam em efeitos tóxicos efetivos em 10% ou 50% da população exposta, respectivamente (ROSENBAUM et al, 2011).

A base de dados das substâncias químicas do USEtox inclui três tipos de informações sobre as substâncias: propriedades físico-químicas; dados de efeito toxicológicos em animais de laboratório e dados de efeito ecotoxicológicos para organismos de água doce (ROSENBAUM et al, 2008).

Para os dados de propriedades físico-químicas foram identificados: fatores de bioconcentração para peixes; fatores de biotransferência para leite e carne; e tempos de degradação de meia vida (ROSENBAUM et al, 2008).

Para gerar os fatores de caracterização, considerando destino, exposição, efeito e, baseado na cadeia causa e efeito, o modelo adota os princípios de balanço de massa entre diferentes meios, simulando o comportamento das substâncias químicas liberadas da tecnosfera para o ambiente, ou seja, um fluxo de massa entre compartimentos considerados homogêneos. Os balanços de massa considerados procuram descrever processos de degradação e transferência entre os compartimentos (HENDERSON et al, 2011, HUIJBREGTS et al, 2010).

Para calcular os fatores de caracterização, o modelo emprega a seguinte equação:

$$\overline{CF} = \overline{EF} \times \overline{XF} \times \overline{FF} = \overline{EF} \times i\overline{F} \quad (22)$$

sendo:

$CF$  – fator de caracterização, em casos.kg<sup>-1</sup> de substância emitida;

$FF$  – fator de destino, em dias;

$XF$  – fator de exposição, em dias<sup>-1</sup> (somente para toxicidade humana);

$FF$  – fator de efeito em casos.kg<sup>-1</sup> de substância ingerida para toxicidade humana e PAF m<sup>3</sup>.kg<sup>-1</sup> para ecotoxicidade.

Para toxicidade humana, os fatores de destino e exposição são combinados para refletir a fração ingerida ( $iF$ ) de uma substância, representando a fração mássica da substância que atinge a população (HUIJBREGTS et al, 2010, ROSENBAUM et al, 2008).

O fator de caracterização humano expressa-se em unidades comparativas tóxicas (CTUh), o que representa uma estimativa do aumento da morbidade na população humana total, por unidade de massa da substância emitida (casos por quilograma) (ROSENBAUM et al, 2008).

Os fatores de caracterização para ecotoxicidade aquática expressam-se em unidades tóxicas comparativas (CTUe), ou seja, significam uma estimativa da fração de espécies potencialmente afetadas (PAF) por unidade de massa da substância emitida (PAF m<sup>3</sup>.dia.kg<sup>-1</sup>) (HENDERSON et al, 2011).

Como exposto, os fatores de caracterização do USEtox não são normalizados a uma substância de referência, mas sim expressos em unidades tóxicas comparativas.

Com os fatores de caracterização pode-se obter o impacto total, calculado pela soma ponderada da emissão de poluentes por um sistema de produto com os fatores de caracterização (HUIJBREGTS et al, 2010):

$$IS = \sum_i \sum_x CF_{x,i} \cdot M_{x,i} \quad (23)$$

sendo:

$IS$  – potencial impacto;

$CF$  – fator de caracterização da substância  $x$  emitida ao compartimento  $i$ ;

$M$  – emissão de  $x$  ao compartimento  $i$ .

Na modelagem construída para representar os elementos da cadeia de causa e efeito, identificaram-se alguns elementos chave, a saber (ROSENBAUM et al, 2008):

- no destino há inclusão do compartimento Ar Urbano, o que permite avaliar a ocorrência de maiores impactos, via inalação, em áreas com alta densidade populacional. O USEtox considera que as substâncias provenientes do compartimento Ar Urbano são transferidas para o Ar Rural por advecção; para solo rural por deposição e, para água superficial rural por escoamento superficial, considerando 100% pavimentado, ou removido por degradação;
- inclusão, no destino, de uma zona global, o que permite a avaliação de impactos em escala global para substâncias que podem ser transportadas por longas distâncias;
- no fator de destino, a chuva é considerada como um evento intermitente. Muitos modelos de destino consideram a chuva em estado estacionário. Isto resulta em uma sobre-estimativa da transferência de substâncias da atmosfera para a superfície pela chuva porque assumem condições de chuva constante;
- no destino há distinção de tipos de solo. Com o uso de dois tipos de solo, agrícola e natural, é possível considerar impactos fracionados relacionados somente a solo agrícola, como por exemplo, para uso de defensivos;
- no destino o compartimento solo é considerado uma camada única, homogênea, com profundidade de 10 cm;
- para o compartimento marinho, no fator de destino, a exposição e os impactos são modelados somente para águas costeais;
- no fator de exposição humana, leva-se em conta um modelo de absorção das substâncias pelas plantas. O USEtox elege um único compartimento simplificado, apropriado para considerar exposição às substâncias químicas. Isto limita o fator de concentração nas raízes e distingue superfícies foliares do restante dos tecidos da planta, abaixo do solo, para calcular o coeficiente de partição planta-ar;
- o modelo, no fator de exposição humana, considera a biotransferência de substâncias químicas para carne e leite.

A precisão dos fatores de caracterização no USEtox corresponde a 2 a 3 ordens de magnitude para saúde humana e, de 1 a 2 ordens de magnitude para ecotoxicidade em água

doce. Importantes fontes de incerteza e variabilidade no USEtox derivam de (ROSENBAUM et al, 2008):

- falta de acurácia na estimativa das propriedades das substâncias, como taxas de transferência para carne e leite;
- dados limitados de fatores de bioconcentração para peixes;
- falta de informações sobre taxas de degradação química;
- grandes incertezas relacionadas aos dados tanto para saúde humana, quanto para efeitos ecotóxicos;
- consideração de compartimentos homogêneos, como o solo e a água;
- o modelo que descreve a vegetação, usado no fator de exposição, não inclui nenhum processo de degradação devido à indisponibilidade de dados;

No USEtox realiza-se uma distinção entre fatores de caracterização recomendados e interino. Esta diferenciação reflete o grau de confiabilidade dos mesmos (ROSENBAUM et al, 2008):

- recomendados: fatores de caracterização considerados apropriados e os dados da substância são de qualidade suficiente para suportar uma recomendação;
- interino: fatores de caracterização empregados quando há incerteza relativamente alta referente a destino, exposição e/ou efeito de uma substância química.

Os fatores de caracterização recomendados para ecotoxicidade aquática baseiam-se em dados de efeito de ao menos três diferentes espécies cobrindo, no mínimo três diferentes níveis tróficos, para garantir uma variabilidade mínima das respostas biológicas (ROSENBAUM et al, 2008).

Para efeitos na saúde humana, os fatores de caracterização recomendados são baseados em dados de efeitos crônicos ou subcrônicos (ROSENBAUM et al, 2008).

As suposições consideradas pelo USEtox, e que devem ser levadas em conta quando da interpretação dos fatores de caracterização, gerados por este modelo, são (ROSENBAUM et al, 2011):

- densidade populacional considerada - escala urbana 8,333 pessoas.km<sup>-2</sup>; escala continental 111 pessoas.km<sup>-2</sup>; escala global 43 pessoas.km<sup>-2</sup>;
- um volume de 13 m<sup>3</sup>.dia<sup>-1</sup> para inalação do ar;
- ingestão de água de 1,4 l.dia<sup>-1</sup> por pessoa;
- composição do consumo de carne pela população considerada - 39% carne de porco; 24% carne de gado; 30% carne de aves; 5% carne de carneiro; 2% outras carnes.

- considera-se o consumo de peixes;
- para a rota inalação, analisa-se a exposição urbana separada da exposição rural para melhor estimar o maior  $iF$  para emissões em áreas com maiores densidades populacionais;
- o modelo inclui tanto componentes da planta que estão acima do solo, quanto aqueles que estão abaixo;
- nenhuma distinção é realizada entre sub-populações (grupos de idade ou gênero), aplica-se uma média para toda a população;
- O fator de bioacumulação para exposição direta é igual a um, considera-se que nenhuma modelagem de transferência entre o meio e o alimento é significativa;
- para rotas de exposição relacionadas à concentração de peixes ou água marinha, somente a fração dissolvida é considerada;
- considera-se a ingestão de produtos agrícolas;
- os dados de entrada, modelados e medidos, representam estado estacionário;
- o modelo considera que a ingestão ocorre no local onde se produz o alimento e não, necessariamente, onde a população vive;
- rotas de exposição relevantes apenas para uma pequena fração da população, ou que tenham sido demonstradas como contribuinte mínimo, são negligenciadas.

#### 2.3.1.5.1. Fator de destino

O fator de destino, tanto para toxicidade humana como para ecotoxicidade, são similares. Este fator representa a persistência de uma substância no ambiente (HUIJBREGTS et al, 2010).

O tempo de residência das substâncias, considerado no USEtox, depende (HUIJBREGTS et al, 2010):

- das propriedades da substância;
- do compartimento de emissão (ar urbano por exemplo);
- do compartimento de recepção (água doce em escala continental por exemplo).

Para obter o fator de destino, o modelo USEtox considera (HUIJBREGTS et al, 2010):

- processos de remoção – biodegradação por micro-organismos, transporte de substâncias para sedimentos, lixiviação para águas subterrâneas e escape para estratosfera;
- processos de transporte inter-meios das substâncias químicas no ambiente – movimentação das substâncias de um compartimento a outro.

Existem dois tipos de transporte inter-meios (HUIJBREGTS et al, 2010):

- advecção - a substância se move junto com um meio, de um compartimento a outro (transporte somente em um sentido);
- difusão - transporte entre dois compartimentos, passivo a dois sentidos.

Para o compartimento água, o modelo considera quatro processos que interferem na massa dissolvida de uma substância em água (HENDERSON et al, 2011):

- adsorção/sedimentação;
- volatilização;
- degradação;
- transporte advectivo para fora do compartimento água.

O USEtox considera alguns mecanismos de remoção que irão interferir na quantidade de substância transferida do solo para água superficial (HENDERSON et al, 2011):

- degradação;
- volatilização;
- lixiviação para camadas profundas do solo;
- escoamento para água superficial.

A quantidade transferida do ar para o solo é determinada pela competição entre três principais mecanismos de remoção no compartimento ar (HENDERSON et al, 2011):

- degradação no ar;
- advecção para o ar na escala global;
- deposição no solo ou em água superficial e água marinha.

O USEtox considera que as substâncias químicas no ar urbano são removidas por degradação, ou transferidas para ar rural via advecção, para solo rural via deposição e para água superficial rural via deposição ou escoamento superficial (considerando 100% pavimentado).

Dessa forma, o modelo de destino, implementado no USEtox, calcula o aumento de massa (kg) em um determinado meio devido a um fluxo de emissão (kg.dia<sup>-1</sup>). No cálculo do fator de destino consideram-se os transportes inter-meios e processos de remoção/degradação (ROSENBAUM et al, 2008). Resolve-se este fator por balanço de massa, sob condições de estado estacionário, ou seja, a concentração não varia no tempo no compartimento considerado, onde há uma taxa de emissão constante (HUIJBREGTS et al, 2010).



### 2.3.1.5.2. Fatores de exposição para o ambiente

O fator de exposição no USEtox representa a biodisponibilidade de uma substância em um determinado meio, representada pela fração dissolvida da substância (HUIJBREGTS et al, 2010).

O modelo calcula a fração dissolvida em água doce da seguinte forma (HUIJBREGTS et al, 2010):

$$FR_{w.w} = \frac{1}{1+(Kp \cdot SUSP + K_{doc} \cdot DOC + BCF_{fish} \cdot BIOMass)/1.10^6} \quad (24)$$

sendo:

$Kp$  – coeficiente de partição entre água e sólidos suspensos ( $l \cdot kg^{-1}$ );

$SUSP$  – concentração de material em suspensão em água doce ( $15 \text{ mg} \cdot l^{-1}$  no USEtox);

$K_{doc}$  – coeficiente de partição entre carbono orgânico dissolvido e água;

$DOC$  – concentração de carbono orgânico dissolvido em água doce ( $5 \text{ mg} \cdot l^{-1}$  no USEtox);

$BCF_{fish}$  – fator de bioconcentração em peixes ( $l \cdot kg^{-1}$ );

$BIOMass$  – concentração da biota em água ( $1 \text{ mg} \cdot l^{-1}$  no USEtox).

### 2.3.1.5.3. Fatores de exposição humana

O modelo para exposição humana quantifica o aumento na quantidade de um componente transferido para a população humana, baseado no aumento da concentração em diferentes meios. Os fatores de exposição humana incluem: exposição através da inalação de ar (urbano e rural); ingestão de água potável (água doce superficial não tratada); folhas comestíveis (produção exposta); raízes comestíveis (produção não exposta); carne; leite; peixe de água doce e compartimentos aquáticos marinhos para a população humana total (ROSENBAUM et al, 2008, HUIJBREGTS et al, 2010). Cada caminho de exposição representa o mecanismo de transporte de um contaminante de um compartimento ambiental para a população humana (ROSENBAUM et al, 2011).

Para o USEtox, a fração ingerida representa uma função de vários mecanismos, incluindo: destino em água doce, sorção e bioacumulação em plantas, bioconcentração em peixes, carne e produtos lácteos (ROSENBAUM et al, 2011). Porém, de acordo com os autores, as rotas mais importantes de ingestão são a produção acima do solo e peixes (ROSENBAUM et al, 2011). A fração de ingestão por produção acima do solo é produto da bioacumulação no compartimento, a massa no compartimento ar e o consumo pela população desta produção (ROSENBAUM et al, 2011).

Os autores ressaltam a existência no modelo de um componente que considera a exposição por produção agrícola. Esta desempenha um importante papel, visto que a produção acima do solo é considerada a rota de exposição dominante para a maioria das substâncias emitidas ao ar (ROSENBAUM et al, 2011).

Para inalação, a densidade populacional constitui-se o fator chave, exceto para substâncias muito persistentes e de fácil transferência, que são ingeridas pela população global independentemente do local de emissão (ROSENBAUM et al, 2011).

Visto a importância da rota de exposição por inalação faz-se necessário diferenciar emissões entre áreas urbanas e áreas rurais. Maiores densidades populacionais em áreas urbanas e um menor volume de diluição resultam em maior ingestão pela população (ROSENBAUM et al, 2011).

Para a maioria das substâncias no USEtox, inalação, produção acima do solo e peixe são as principais rotas de exposição, sendo influenciadas por (ROSENBAUM et al, 2011):

- compartimento e local da emissão;
- particionamento;
- degradação;
- bioacumulação e bioconcentração;
- hábitos alimentares da população.

Segundo os autores, o fator de exposição humano de uma substância depende (HUIJBREGTS et al, 2010):

- das propriedades da substância;
- do compartimento receptor;
- dos caminhos de exposição.

Para exposição via inalação do ar, o fator de exposição é calculado por (HUIJBREGTS et al, 2010):

$$XF_{inh} = INH \cdot POP / VOLUME_{air} \quad (25)$$

sendo:

$INH$  – taxa média de inalação de uma pessoa;

$POP$  – número da população;

$VOLUME_{air}$  – volume do compartimento ar.

O fator de exposição para um alimento específico, ou água para consumo, em uma escala específica é igual a (HUIJBREGTS et al, 2010):

$$XF_{i,r} = BAF_{i,r} \cdot PROD_i \cdot POP / MASS_r \quad (26)$$

sendo:

$BAF_{i,r}$  – fator de bioacumulação da substância pelo caminho de exposição  $i$ , via compartimento  $r$  ( $\text{kg.kg}^{-1}$ );

$PROD_i$  – a produção, por pessoa, do item  $i$  no caminho de exposição ( $\text{kg.dia}^{-1}.\text{pessoa}^{-1}$ );

$MASS_r$  – massa do compartimento  $r$ .

Os fatores de exposição humana, correspondentes a rotas específicas, podem ser distinguidos em fatores de exposição diretos (água para beber ou inalação do ar) e indiretos (carne, produtos lácteos, vegetais e peixe), assim expressos (ROSENBAUM et al, 2011):

$$XF_{xp,i}^{direct} = \frac{IR_{xp,i} \cdot P}{\rho_i \cdot V_i} \quad (27)$$

$$XF_{xp,i}^{indirect} = \frac{BAF_{xp,i} \cdot IR_{xp} \cdot P}{\rho_i \cdot V_i} \quad (28)$$

sendo:

$IR_{xp,i}$  – taxa de ingestão direta de um meio  $i$  pela população total via um caminho de exposição  $xp$  ( $\text{kg.dia}^{-1}$ );

$\rho_i$  – densidade do meio  $i$  ( $\text{kg.m}^{-3}$ );

$V_i$  – volume do meio  $i$  ( $\text{m}^3$ );

$IR_{xp}$  – taxa de ingestão individual de um alimento, correspondente à rota de exposição  $xp$  ( $\text{kg.dia}^{-1}$ );

$P$  – população;

$BAF_{xp,i}$  – fator de bioacumulação ( $\text{kg}_{xp}.\text{kg}_i^{-1}$ ).

Interpreta-se o fator de exposição humana indireto como a taxa de ingestão equivalente por um meio  $i$ , via um alimento correspondente à rota de exposição  $xp$ . Cada fator de exposição representa o aumento na exposição humana via rota  $xp$ , devido a um aumento na concentração no compartimento  $i$  (ROSENBAUM et al, 2011).

#### 2.3.1.5.4. Fator de efeito ecotoxicológico

O fator de efeito ecotoxicológico reflete a mudança na Fração de Espécies Potencialmente Afetada (PAF), devido a uma mudança na concentração de uma substância (PAF  $\text{m}^3.\text{kg}^{-1}$ ) (HUIJBREGTS et al, 2010). Em outras palavras, Henderson et al (2011) define o fator de efeito como a habilidade de uma substância em causar efeitos tóxicos aos ecossistemas aquáticos expostos. Cita ainda que este fator está relacionado com a concentração da substância dissolvida no compartimento água doce e a resposta das espécies expostas.

No USEtox, o fator de efeito ecotoxicológico determina-se pela curva linear ao longo da relação concentração-resposta, acima do ponto onde a fração de espécies potencialmente afetadas é 0,5 (HUIJBREGTS et al, 2010).

O cálculo do fator de efeito ecotoxicológico de uma substância, com base na concentração de risco é (HUIJBREGTS et al, 2010, ROSENBAUM et al, 2008):

$$\overline{EF} = \frac{0,5}{HC_{50}} \quad (29)$$

sendo:

$HC_{50}$  – concentração de risco na qual 50% das espécies são expostas abaixo do seu  $EC_{50}$  (concentração efetiva na qual 50% da população apresenta algum efeito).

A concentração de risco ( $HC_{50}$ ) pode ser calculada com base na concentração efetiva ( $EC_{50}$ ) (HUIJBREGTS et al, 2010):

$$\log HC_{50} = \alpha = \frac{1}{n_s} \cdot \sum_s \log EC_{50_s} \quad (30)$$

sendo:

$n_s$  – número de espécies.

#### 2.3.1.5.5. Fatores de efeito humano

Os fatores de efeito refletem a probabilidade da ocorrência de doenças devido a uma mudança na ingestão de um poluente. O USEtox, para fatores de efeito humano, relaciona a quantidade de uma substância que atinge a população, via ingestão e/ou inalação, à probabilidade de efeitos adversos (ou risco potencial) nas pessoas. Isto se baseia em dados de toxicidade para efeitos cancerígenos e não cancerígenos derivados de estudos em laboratórios. (HUIJBREGTS et al, 2010, ROSENBAUM et al, 2008).

Considerando uma função dose-resposta linear, o fator de efeito humano é calculado com base na dose média efetiva (ROSENBAUM et al, 2008, HUIJBREGTS et al, 2010):

$$\overline{EF} = \frac{0,5}{ED_{50}} \quad (31)$$

sendo:

$ED_{50}$  – dose média efetiva que resulta numa probabilidade de efeito de 0,5.

Para efeitos cancerígenos e não cancerígenos,  $ED_{50}$  para humanos relacionados à inalação ou exposição oral calcula-se da seguinte forma (ROSENBAUM et al, 2011):

$$ED_{50_{h,j}} = \frac{ED_{50_{a,t,j}} \cdot BW \cdot LT \cdot N}{AF_a \cdot AF_t \cdot 10^6} \quad (32)$$

sendo:

$ED50_{a,t,j}$  – dose média efetiva para animal  $a$ , por um tempo de duração  $t$ , por massa corpórea que causa uma probabilidade da doença de 50% via rota de exposição  $j$  ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{dia}^{-1}$ );

$AF_a$  – fator de extrapolação para diferenças interespecies;

$AF_t$  – fator de extrapolação para diferenças nos tempos de exposição;

$BW$  – massa corpórea média de humanos (70kg);

$LT$  – tempos médio de vida humana (70 anos);

$N$  – número de dias no ano ( $365 \text{ dias}\cdot\text{ano}^{-1}$ ).

Se  $ED50$  de inalação é dado como concentração no ar ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), então o  $ED50$  equivalente para o humano pode ser estimado por (ROSENBAUM et al, 2011):

$$ED50_{h,inh} = \frac{ED50_{a,t,inh} \cdot INH \cdot LT \cdot N}{AF_a \cdot AF_t \cdot 10^6} \quad (33)$$

sendo:

$INH$  – taxa de inalação média dos humanos.

Para efeitos carcinogênicos,  $ED50$  pode também ser estimado por:

$$ED50_{a,t,j} = \frac{1}{q_{a,t,j}} \cdot AF_q \quad (34)$$

sendo:

$q_{a,t,j}$  – fator da curva, de baixa dose, para a substância carcinogênica para um animal  $a$  por rota de exposição  $j$ ;

$AF_q$  – fator de extrapolação para  $ED50$  (0,8).

Para efeitos não carcinogênicos,  $ED50$  é passível de estimativa pelo nível de efeito adverso não observado ( $NOAEL$ ), pelo fator de extrapolação  $NOAEL$  para  $ED50$ :

$$ED50_{a,t,j} = NOAEL_{a,t,j} \cdot AF_N \quad (35)$$

sendo:

$NOAEL_{a,t,j}$  – dose diária, por kg de massa corpórea ou concentração para animal  $a$ , em uma duração de tempo  $t$ , que causa efeitos adversos não observados pela rota de exposição  $j$  ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{dia}^{-1}$  ou  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ );

$AF_N$  – fator de extrapolação de  $NOAEL$  para  $ED50$  (9).

#### 2.3.1.6. Considerações sobre os métodos

Para melhor compreensão das diferenças entre o CML-IA, EDIP, IMPACT 2002+, ReCiPe e USEtox, EC-JRC (2010) definiu critérios avaliativos, por exemplo: completudeza de escopo; relevância ambiental; robustez científica e nível de certeza; documentação,

transparência e reprodutibilidade; aplicabilidade; base científica e aceitação dos interessados. Tais critérios são apresentados nas seções 2.3.1.6.1 e 2.3.1.6.2.

#### 2.3.1.6.1. Categoria toxicidade humana

O ReCiPe, IMPACT 2002+ e USEtox baseiam-se em modelos similares. Os últimos apresentam modelagem de destino, exposição e efeito de substâncias químicas e, opcionalmente, severidade. CML-IA também tem base em modelo similar, porém os indicadores de efeito e severidade apresentam diferenças na forma que são calculados e em seu escopo. O EDIP configura-se uma abordagem simplificada, com modelagem de alguns processos da cadeia causa e efeito, todavia sem uma descrição completa desses processos (EC-JRC, 2011).

Para comparação mais eficiente entre os métodos, referentes à categoria de impacto Toxicidade Humana, listaram-se suas características seguindo alguns critérios determinados por EC-JRC (2010), apresentadas na Tabela 3.

**Tabela 3.** Comparação entre os métodos na categoria de impacto Toxicidade Humana.

| <b>Critério</b>                               | <b>USEtox</b>  | <b>ReCiPe</b>   | <b>IMPACT 2002+</b>  | <b>EDIP 2003</b>   | <b>CML-IA</b>  |
|---|--|---|--|--|--|
| <b>Completeza de Escopo</b>                   | Avaliação comparativa do risco de substâncias tóxicas em escala global e Europeia. Nenhuma diferenciação espacial além da global e continental.  | Avaliação de substâncias tóxicas em escala europeia. Não há parâmetros para outro continente.   | Avaliação comparativa do risco de substâncias tóxicas em escala europeia. Parametrização disponível para todos os compartimentos.              | Avaliação de substâncias tóxicas em escala europeia, mas a cadeia de causa e efeito é parcial.   | Avaliação de substâncias tóxicas em escala europeia. Alguns parâmetros para outros continentes.  |
| <b>Relevância Ambiental</b>                   | Alta relevância para todas as rotas ambientais. Melhor base para calcular TD50, substâncias não cancerígenas e extrapolação entre rotas. Não é válido para aplicação direta de defensivos. | Alta relevância ambiental. Não é válido para aplicação direta de defensivos. Melhor base para estimar severidade para substâncias não cancerígenas.       | Alta relevância ambiental. Melhor base para aplicação direta de defensivos. Inclui chuva intermitente. Suposições básicas para severidade.     | Relevância ambiental boa para todas as rotas ambientais.   | Boa relevância ambiental. Não é válido para aplicação direta de defensivos.  |
| <b>Robustez científica e nível de certeza</b> | Dados de entrada das substâncias checados e componentes do modelo extensivamente revisados. Incerteza do modelo avaliada, porém não há parâmetros disponíveis. A                           | Maioria dos dados oriundos de base de dados revisada. Componentes do modelo extensivamente revisados e estimativas de incerteza disponíveis. A questão de | Componentes do modelo extensivamente revisados e estimativas de incerteza disponíveis, porém nem todos os dados das substâncias são revisados. | Maioria dos dados oriundos de base de dados revisada. Modelo publicado em livro revisado por pares. Não há disponível a incerteza ou verificação experimental. | Maioria dos dados oriundo de base de dados revisada. Componentes do modelo extensivamente revisados e estimativas de incerteza disponíveis, todavia nem todos os |

*(continua...)*

**Tabela 3. Comparação entre os métodos na categoria de impacto Toxicidade Humana (continuação).**

|  |   |   |   |  |   |
|--|---|---|---|--|---|
| <b>Robustez científica e nível de certeza</b>          | questão de defensivos para toxicidade humana requer melhoramentos.  | defensivos para toxicidade humana requer melhoramentos.                                     |   |  | dados das substâncias são revisados. A questão de defensivos para toxicidade humana requer melhoramentos. |
| <b>Documentação, Transparência e Reprodutibilidade</b> | Documentação publicada e disponível e o modelo pode ser facilmente utilizado para calcular novos fatores de caracterização. | Documentação publicada.   | Documentação publicada, porém detalhes dos processos não disponíveis. | Documentação publicada.  | Documentação publicada.   |
| <b>Aplicabilidade</b>                                  | Mais de 1250 fatores de caracterização disponíveis.   | Mais de 1000 fatores de caracterização disponíveis.   | Mais de 800 fatores de caracterização disponíveis.                    | Mais de 180 fatores de caracterização disponíveis.   | Mais de 850 fatores de caracterização disponíveis.  |
| <b>Base científica</b>                                 | Elementos do modelo apresentam base científica, exceto para aplicação direta de defensivos.                                 | Elementos do modelo apresentam base científica, exceto para aplicação direta de defensivos. | Elementos do modelo apresentam base científica.                       | Parte do efeito apresenta base científica, exceto para aplicação direta de defensivo. Destino muito simplificado | Elementos do modelo apresentam base científica, exceto para aplicação direta de defensivos.               |
| <b>Aceitação dos interessados</b>                      | Endossado pela UNEP.  | Versão LCA não endossada.   | Modelo não endossado.   | Modelo não endossado.  | Versão LCA não endossada.   |

Fonte: EC-JRC (2011)



Dos cinco modelos considerados, no que concerne ao critério base científica o USEtox apresenta observância quase completa, o IMPACT 2002+ e ReCiPe apresentam aspectos essenciais e o EDIP 2003 e CML-IA somente em alguns aspectos (EC-JRC, 2011).

O USEtox constitui-se em recente consenso de melhor aplicabilidade entre os modeladores dos métodos considerados. Este modelo foca no destino e no transporte de longo alcance dos contaminantes. Reflete o mais recente conhecimento e dados de fatores de efeito relacionados ao câncer (EC-JRC, 2011).

As incertezas do USEtox são similares às dos outros modelos: taxa de degradação de meia vida, responsável pela incerteza no destino e extrapolação de baixa dose e modelagem de dose-resposta no que se refere ao efeito (EC-JRC, 2011). Entretanto o nível de incerteza no USEtox é menor do que nos outros modelos, em torno de 2 a 3 ordens de magnitude.

#### 2.3.1.6.2. Categoria ecotoxicidade

Para as categorias relacionadas à Ecotoxicidade, os métodos USEtox, IMPACT 2002+ e ReCiPe apresentam modelagem de destino multimeios completa. Já o EDIP apresenta modelagem de destino parcial.

Para melhor comparação entre os métodos, referentes às categorias de impacto Ecotoxicidade, foram listadas suas características seguindo alguns critérios determinados por EC-JRC (2010), apresentadas na Tabela 4.

**Tabela 4.** Comparação entre os métodos para a categoria Ecotoxicidade.

| <b>Critério</b>  | <b>USEtox</b>   | <b>ReCiPe</b>  | <b>IMPACT 2002+</b>   | <b>EDIP 2003</b>   |
|--|---|--|---|--|
| <b>Completeza de Escopo</b>                            | Modelo para avaliação genérica.   | Modelo para avaliação genérica, mas parametrizado para circunstâncias europeias.   | Modelo para avaliação genérica, porém parametrizado para circunstâncias europeias.  | Modelo para avaliação genérica.  |
| <b>Relevância Ambiental</b>                            | Alta relevância ambiental para ecotoxicidade em água doce.  | Alta relevância ambiental, embora os dados de ecotoxicidade sejam baseados em EC50 agudo e ecotoxicidade terrestre em dados aquáticos. | Alta relevância ambiental, embora ecotoxicidade terrestre seja baseada em dados aquáticos.  | Alta relevância ambiental, embora compartimento marinho e processos de destino tenham sido excluídos.  |
| <b>Robustez científica e nível de certeza</b>          | Dados de entrada de substâncias e componentes do modelo extensamente revisados, todavia não há disponível estimativas de incerteza. | Componentes do modelo extensivamente revisados e há disponível estimativas de incerteza. Dados de substâncias nem sempre revisados.    | Componentes do modelo extensivamente revisados e há disponível estimativas de incerteza. Dados de substâncias nem sempre revisados. | Avaliação de efeito apresenta robustez científica, contudo o transporte intermeios não é incluído de maneira compreensível, nem a verificação dos resultados do modelo e estimativas de incerteza. |
| <b>Documentação, Transparência e Reprodutibilidade</b> | Documentação publicada.   | Documentação publicada.  | Documentação publicada.   | Documentação publicada.  |
| <b>Aplicabilidade</b>                                  | Mais de 2000 fatores de caracterização para ecotoxicidade de água doce.   | Mais de 2000 fatores de caracterização para ecotoxicidade.   | Mais de 400 fatores de caracterização para ecotoxicidade.   | Mais de 100 fatores de caracterização para ecotoxicidade.  |
| <b>Base científica</b>                                 | Modelo apresenta base científica para ecotoxicidade em água doce.   | Modelo apresenta base científica para ambientes terrestre, marinho e de água doce.   | Modelo apresenta base científica para ambientes terrestre, marinho e de água doce.  | Modelo apresenta base científica para ambiente terrestre e de água doce, porém muito simplificada a avaliação de destino.  |
| <b>Aceitação dos interessados</b>                      | Endossado pela UNEP.  | Versão LCA não endossada.  | Modelo não endossado.   | Modelo não endossado.  |

Nota: visto que o ReCiPe é uma atualização do CML-IA, somente o primeiro foi avaliado.

Fonte: EC-JRC (2011)

Os métodos USEtox, ReCiPe e IMPACT 2002+ apresentam observância em todos os aspectos essenciais para o critério base científica. Já o EDIP apresenta observância somente em alguns aspectos devido a simplicidade na avaliação de destino (EC-JRC, 2011).

Nos métodos apresentados a incerteza nos fatores de caracterização estão presentes nos fatores de destino e efeito. Nos fatores de destino de substâncias orgânicas a incerteza é devido as taxas de degradação. No fator de efeito, incerteza decorre principalmente da falta de informações sobre toxicidade para espécies em vários níveis tróficos (EC-JRC, 2011).

#### 2.3.1.7. Escolha do método

A simulação do inventário de um sistema de produto, com diferentes métodos, mostra-se válida para situações em que não se dispõe de um método representativo daquela determinada região. Posto que, com os resultados dos diferentes métodos, torna-se possível a existência de convergência dos resultados para um ponto específico, por exemplo, um processo específico dentro do sistema de produto.

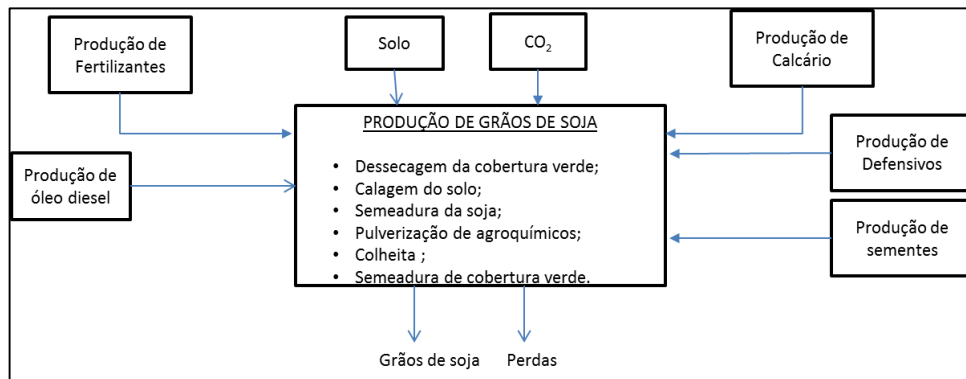
No entanto, nesta pesquisa, para realizar a avaliação do impacto ambiental, o método mais apropriado configurou-se como sendo o USEtox. A assertiva se justifica pelos seguintes fatores:

- este método se constitui consenso científico para avaliar toxicidade;
- apresenta incerteza menor, em relação aos outros métodos;
- é endossado pela UNEP;
- apresenta maior base de dados de substância orgânicas;
- baseia-se em avaliação comparativa dos riscos;
- considera os processos de remoção e transporte entre os compartimentos no fator de destino;
- em especial e, muito importante para esta pesquisa, o USEtox possibilita a customização do modelo para calcular novos fatores de caracterização.

Pelo exposto, utilizou-se o USEtox como ferramenta para calcular novos fatores de caracterização adaptados para o contexto brasileiro. Os citados fatores são apresentados na seção 4.6.

### 3. MÉTODO

Neste estudo, o sistema de produto considerado é a soja. A produção ocorre em um hectare de terra, na região Oeste do Paraná, onde se aplica sistema de manejo de Plantio Direto e aplicação de técnicas de agricultura de precisão para aplicação de fertilizantes. A safra considerada para a pesquisa foi a de 2012/13. Este sistema é observado na Figura 2.



**Figura 2.** Sistema de produto da Soja.

Neste sistema considerou-se como entradas conhecidas da natureza:

- transformação da terra;
- dióxido de carbono.

As entradas conhecidas da esfera tecnológica são:

- produção de diesel;
- produção de fertilizantes;
- produção de calcário;
- produção de defensivos e;
- produção de sementes.

O produto gerado pelo sistema é 3366,63 kg de soja. Este pode ser utilizado para produção de proteína, óleo comestível ou biodiesel. Por este motivo não foi definido qual a função do produto. Há também a consideração das perdas do sistema como efluentes líquidos, emissões atmosféricas e resíduos sólidos.

Para realizar a Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida do Sistema Agrícola Produção de Soja, recorreu-se a cinco métodos disponíveis no software SimaPro, a saber:

- CML-IA (baseline);
- EDIP 2003;
- IMPACT 2002+;
- ReCiPe;
- USEtox.

Cada um destes métodos apresentam uma seleção de categorias de impacto pré-definidas. Dessa forma, o perfil ambiental do sistema em avaliação delineou-se para todas as categorias de impacto selecionadas por cada método.

Posteriormente, selecionaram-se as categorias de impacto relacionadas à Toxicidade com o objetivo de alcançar uma avaliação de impacto mais detalhada.

Por conseguinte, para obter o perfil ambiental do sistema agrícola, procedeu-se à obtenção dos dados de entrada e saída, organização e lapidação dos mesmos, modelagem dos dados no software SimaPro e interpretação dos resultados.

### 3.1. COLETA DE DADOS

Para o desenvolvimento desta pesquisa, a necessidade inicial percebida foi da posse das quantidades de insumos aplicados para a produção da soja. Para tanto, iniciaram-se os contatos em quatro estados brasileiros: Goiás; Mato Grosso; São Paulo e Paraná. Nos três primeiros estados, as empresas contatadas não demonstraram interesse na oferta de dados necessários para o desenvolvimento da pesquisa. Somente uma empresa, no Oeste do Paraná, dispôs-se a fornecer relatórios com tais informações, todavia solicitou manter-se no anonimato.

A empresa presta auxílio técnico aos seus clientes. Dentre seus serviços, sobressai a aplicação da agricultura de precisão para aplicação de fertilizantes.

Pelo já dito, os dados então coletados são representativos da região Oeste do Paraná e correspondem à safra 2012/13. Da região em foco, coletou-se dados de 14 fazendas, localizadas nos seguintes municípios:

- Cascavel;
- Cafelândia;
- Toledo;
- São Pedro do Iguçu;
- Ouro Verde do Oeste;
- Assis Chateaubriand e,
- Brasilândia do Sul.

Todas as fazendas consideradas neste estudo aplicam o sistema de Manejo Plantio Direto e a Agricultura de Precisão na aplicação de fertilizantes.

Para a coleta de dados, a Empresa disponibilizou seus relatórios com as seguintes informações:

- produto utilizado;
- quantidade do produto aplicada;
- unidade;

- data de aplicação;
- operação realizada;
- porção de terra, em hectares, em que o produto foi aplicado.

Os dados brutos obtidos foram então organizados em planilha de Excel com a seguinte estrutura:

**Tabela 5.** Informações sobre a fazenda e as quantidades de insumos aplicados.

|        | Nome       |      |     |      | Prod.     |     | Fator conv. qtde/tn soja |           |              |             |              |
|--------|------------|------|-----|------|-----------|-----|--------------------------|-----------|--------------|-------------|--------------|
|        | Nome prod. | Qtde | und | i.a. | Qtde i.a. | und | total área aplicada (ha) | área (ha) | Qtde i.a./ha | Qtde/t soja | forma aplic. |
| Fung.  |            |      |     |      |           |     |                          |           |              |             |              |
| Inset. |            |      |     |      |           |     |                          |           |              |             |              |
| Herb.  |            |      |     |      |           |     |                          |           |              |             |              |
| Fert.  |            |      |     |      |           |     |                          |           |              |             |              |
| Sem.   |            |      |     |      |           |     |                          |           |              |             |              |

**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Na primeira linha da Tabela 5 foram colocadas as seguintes informações:

- nome da fazenda;
- total de área plantada com soja;
- produtividade obtida na safra;
- fator de conversão da quantidade de insumo aplicado por hectare para por tonelada de soja, considerando a produtividade.

Nas colunas da Tabela 5 foram inseridas as seguintes informações:

- 1º coluna – tipo do produto aplicado – fungicida, inseticida, herbicida, fertilizante, e semente;
- 2º coluna – nome do produto aplicado;
- 3º coluna – quantidade do produto aplicado;
- 4º coluna – unidade empregada para quantificar o produto (quilos ou litros);
- 5º coluna – ingrediente ativo presente no produto;
- 6º coluna – quantidade de ingrediente ativo aplicado;
- 7º coluna – unidade de medida empregada para quantificar o ingrediente ativo;
- 8º coluna – total de área, em hectares, em que o produto foi aplicado. Neste campo pode ser que o total de área seja maior que a área plantada com soja, isso indica que o produto foi passado, no mesmo lugar, mais de uma vez. Essa informação possibilita determinar por quantos hectares o maquinário agrícola passou e, assim, calcular sua eficiência;

- 9º coluna – total de área, em hectares, em que o produto foi aplicado considerando o limite da área plantada com soja. Com esta informação é possível calcular qual a quantidade de ingrediente ativo aplicado por hectare;
- 10º - quantidade de ingrediente ativo por hectare;
- 11º - quantidade de ingrediente ativo por tonelada de soja;
- 12º - forma de aplicação.

Organizou-se as informações sobre os defensivos aplicados no plantio de soja em tabela separada, contendo as seguintes informações:

**Tabela 6.** Informações sobre os defensivos agrícolas aplicados na produção de soja.

| Produto    | Nome Comercial | Ingrediente Ativo |            |     |      | Classe | Gp. Quím <sup>1</sup> | Class. Tox. <sup>2</sup> | Class. Pot. Peric.Amb. <sup>3</sup> |
|------------|----------------|-------------------|------------|-----|------|--------|-----------------------|--------------------------|-------------------------------------|
|            |                | Nome Químico      | Nome Comum | g/l | g/kg |        |                       |                          |                                     |
| Fungicida  |                |                   |            |     |      |        |                       |                          |                                     |
| Inseticida |                |                   |            |     |      |        |                       |                          |                                     |
| Herbicida  |                |                   |            |     |      |        |                       |                          |                                     |

1 – Grupo químico; 2 – classificação toxicológica; 3 – classificação do potencial de periculosidade ambiental.

**Fonte:** Elaborado pelo autor.

As informações necessárias para a Tabela 6 foram obtidas na bula de cada um dos produtos utilizados.

Para quantificar a quantidade de diesel utilizado pelos maquinários, construiu-se a seguinte estrutura em Excel:

**Tabela 7.** Consumo de diesel para a produção de soja.

| Atividade                 | Densidade diesel (kg/l) |                 | qtde diesel (l) | total diesel (kg) | total diesel/ha | total diesel/tn soja |
|---------------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|-------------------|-----------------|----------------------|
|                           | Consumo diesel l/ha     | área percorrida |                 |                   |                 |                      |
| Pulverização defensivos   |                         |                 |                 |                   |                 |                      |
| Semeadura soja            |                         |                 |                 |                   |                 |                      |
| Colheita                  |                         |                 |                 |                   |                 |                      |
| Semeadura cobertura verde |                         |                 |                 |                   |                 |                      |
| Calagem                   |                         |                 |                 |                   |                 |                      |
| Total                     |                         |                 |                 |                   |                 |                      |

**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Para calcular a quantidade de diesel consumida no sistema agrícola, considerou-se o consumo de diesel por atividade realizada, obtidas com o pesquisador Henrique Debiassi da Embrapa Soja (comunicação via e-mail):

- pulverização de defensivos – 0,90 l.ha<sup>-1</sup>;
- semeadura da soja – 12 l.ha<sup>-1</sup>;
- colheita – 22 l.ha<sup>-1</sup>;
- semeadura cobertura verde – 7,5 l.ha<sup>-1</sup>;
- calagem – 2 l.ha<sup>-1</sup>.

Para obter o total de diesel, tanto por hectare como por tonelada de soja (considerando a produtividade), considerou-se a densidade de 0,84 kg.l<sup>-1</sup> (BEN, 2005).

Esses dados possibilitaram a construção do inventário da produção de soja.

### 3.2. CONSTRUÇÃO DO INVENTÁRIO DO SISTEMA AGRÍCOLA

Na pesquisa, construiu-se inventários individualizados por fazenda, com o intuito de observar a variação do impacto nessas fazendas, bem como, um inventário de toda a região Oeste do Paraná, tomando a média ponderada dos insumos aplicados nas 14 fazendas com sua respectiva produção.

Estruturou-se os dados de entrada e saída do sistema agrícola, conforme mostra a Tabela 8.

**Tabela 8.** Dados de entrada e saída dos produtos aplicados para a produção de soja.

| Produtos e substâncias | Prod 1tn grãos soja | Fertilizantes | Defensivos | Queima Diesel | Total (tn <sup>-1</sup> ) | Total (ha <sup>-1</sup> ) | Ref. |
|------------------------|---------------------|---------------|------------|---------------|---------------------------|---------------------------|------|
| Entradas               |                     |               |            |               |                           |                           |      |
| Saídas                 |                     |               |            |               |                           |                           |      |
| Efluentes Líquidos     |                     |               |            |               |                           |                           |      |
| Emissões Atmosféricas  |                     |               |            |               |                           |                           |      |
| Emissões para o solo   |                     |               |            |               |                           |                           |      |

**Fonte:** Elaborado pelo autor.



Reitere-se - os dados de entrada no sistema agrícola referem-se ao que realmente foi aplicado na safra 2012/13, considerados portanto, dados primários. No entanto, para a quantificação do sequestro de carbono da atmosfera e a quantidade de água, considerou-se:

- para o sequestro de carbono - uma produção de 4,6 t de matéria seca por hectare na produção de soja (PADUA, 2005), sendo que 45% da matéria seca é composta por carbono (EMBRAPA, 2011). De acordo com Superagro, para cada quilo de carbono na matéria seca são necessários 3,66 kg de CO<sub>2</sub> (EMBRAPA, 2011) da atmosfera;
- a quantidade de água considerada obteve-se através da Embrapa (2011).

Na quantidade de fertilizante utilizado considerou-se as seguintes proporções de nutrientes (dado fornecido pela Empresa):

- Fosfato super simples: 0,18% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>;
- Fosfato monoamônio: 0,48% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>;
- Superfosfato triplo: 0,44% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>;
- Cloreto de potássio: 0,60% de K<sub>2</sub>O;
- Calcário: 0,80% carbonato de cálcio.

As emissões do sistema agrícola foram divididas em: efluentes líquidos, emissões atmosféricas, e emissões para o solo.

Como efluente líquido foram identificadas emissões de nitrato, fósforo e de defensivos agrícolas.

Para quantificar a quantidade de nitrato lixiviado utilizou-se o modelo SQCB, como recomendado por Nemecek e Schnetzer (2011):

$$N = 21,37 + \frac{P}{c \cdot L} (0,0037 \cdot S + 0,0000601 \cdot N_{org} - 0,00362 \cdot U) \quad (36)$$

sendo:

$N$  – nitrato lixiviado (kg NO<sub>3</sub>.ha<sup>-1</sup>);

$P$  – precipitação (mm): 214,89 mm (INSTITUTO DE ÁGUAS DO PARANÁ, 2013);

$c$  – conteúdo de argila (%): 41,25% (INSTITUTO DE TERRAS, CARTOGRAFIA E GEOCIÊNCIAS, 2013);

$L$  – profundidade da raiz (m): 0,17 m (EMBRAPA, 2011);

$S$  – fertilização nitrogenada (kN.ha<sup>-1</sup>) - não houve aplicação de fertilizante nitrogenado;

$N_{org}$  – nitrogênio no solo (kg.ha<sup>-1</sup>) - 122,43 kg.ha<sup>-1</sup> (EMBRAPA, 2011);

$U$  – absorção de nitrogênio pela vegetação - 317,56 kg.ha<sup>-1</sup> (EMBRAPA, 2011).

Para quantificar a quantidade de fosfato perdida, também seguiu-se a recomendação de Nemecek e Schnetzer (2011):

$$P_{ro} = P_{rot} \cdot F_{ro} \quad (37)$$

sendo:

$P_{ro}$  – quantidade perdida de fósforo ( $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ );

$P_{rot}$  – quantidade média da perda de fósforo para uma categoria de uso da terra -  $0,175 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  para terra arável;

$F_{ro}$  – fator de correção para fertilização com fósforo.

$$F_{ro} = 1 + \frac{0,2}{80} \cdot P_2O_{5min} \quad (38)$$

sendo:

$P_2O_{5min}$  – quantidade de fósforo contido no fertilizante mineral.

Para as emissões atmosféricas, a quantificação de nitrato baseou-se na recomendação de Nemecek e Schnetzer (2011), de acordo com IPCC 1996/2001 vs. 2006:

$$N_2O = \frac{44}{28} \cdot \left( 0,01 \cdot (N_{tot} + N_{cr} + 0 \cdot N_{bf}) + 0,01 \cdot \frac{14}{17} \cdot NH_3 + 0,0075 \cdot \frac{14}{62} \cdot NO_3 \right) \quad (39)$$

sendo:

$N_2O$  – emissão de óxido nitroso ( $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ );

$N_{tot}$  – nitrogênio total ( $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) - valor utilizado  $339,47 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  (EMBRAPA, 2011);

$N_{cr}$  – nitrogênio nos resíduos culturais ( $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) - valor utilizado  $130,88 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  (EMBRAPA, 2011);

$N_{bf}$  – nitrogênio da fixação biológica;

$NH_3$  – volatilização de amônia – considerado como 0, pois não há aplicação de fertilizante à base de amônia;

$NO_3$  – nitrato lixiviado ( $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ ).

A quantificação do óxido nitroso seguiu a recomendação de Nemecek e Schnetzer (2011), como se segue:

$$NO_x = 0,21 \cdot N_2O \quad (40)$$

As emissões de  $CO_2$ , devido a oxidação da matéria orgânica, e  $O_2$ , pelo processo de fotossíntese, foram baseadas nas informações fornecidas por Cavalett (2010) –  $230 \text{ kg}$  de  $CO_2$  por hectare e  $1,07 \text{ kg}$  de  $O_2$  por  $\text{kg}$  de biomassa.

As emissões geradas pela queima de diesel foram coletadas de Sheehan *et al.* (1998):

**Tabela 9.** Emissões devido a queima de diesel.

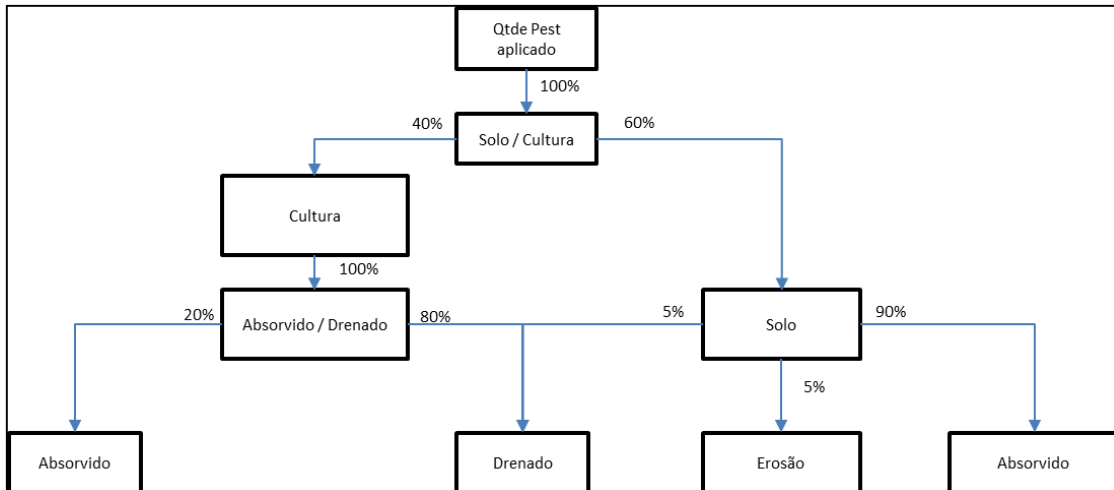
| <b>Substância</b>             | <b>Emissões (kg.kg<sup>-1</sup> de diesel queimado)</b> |
|-------------------------------|---|
| C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> | 3,59E-03  |
| CO                            | 1,35E-02  |
| NO <sub>x</sub>               | 3,76E-02  |
| Mat. Part.                    | 1,73E-03  |
| SO <sub>2</sub>               | 5,07E-03  |
| CH <sub>4</sub>               | 1,78E-04  |
| N <sub>2</sub> O              | 8,03E-05  |
| CO <sub>2</sub>               | 3,19E+00  |

**Fonte:** Sheehan *et al.* (1998)

Nesta pesquisa, optou-se por considerar a emissões de pesticidas para os compartimentos solo e água. Para atingir tal propósito, lançou-se mão de uma heurística proposta por Lewis, Newbold e Tzilivakis (1999). Esta heurística tem por objetivo determinar o destino dos pesticidas aplicados na agricultura. As regras são:

- da quantidade de pesticida aplicada, entre 46 e 80% destinam-se à cultura e ao solo e entre 20 e 54% é volatilizado;
- da quantidade de pesticida que permanece na cultura e no solo (regra 1): entre 2 e 50% atingem a cultura (dependendo do tamanho da folha e da cobertura); e entre 50 e 98% vão para o solo;
- da quantidade de pesticida que atinge a cultura (regra 2): entre 12 e 46% é volatilizado das folhas; entre 54 e 88% são perdidos por outras rotas como, adsorção pela cultura e drenagem para o solo;
- da quantidade perdida por outras rotas (regra 3): 20% é absorvido pela cultura; 80% é perdido através de drenagem, podendo atingir águas subterrâneas, dependendo das características químicas do solo;
- da quantidade que atinge o solo (regras 2 e 3): 5% é perdido por drenagem, podendo atingir águas subterrâneas e superficiais; 5% é perdido por erosão;
- caso o pesticida seja rapidamente incorporado ao solo, ainda existe uma volatilização de 5%, caso contrário, a volatilização pode variar de 5 a 44%.

Adaptou-se heurística de Lewis, Newbold e Tzilivakis (1999), considerando-se as seguintes frações de emissões dos agrotóxicos:



**Figura 3.** Frações dos defensivos aplicados que atingem o solo e a água.

Nesta pesquisa, com base nas conversas com o representante da Empresa, os agricultores realizam a aplicação de defensivos via pulverização.

Com os dados de entrada e saída do sistema agrícola, passou-se à modelagem dos mesmos no software para calcular os potenciais impactos e realizar a avaliação ambiental.

### 3.3. MODELAGEM DOS DADOS NO SIMAPRO

Realizou-se a modelagem dos dados no software SimaPro versão 8.0.3.14. As bases de dados disponíveis no software e utilizadas para auxiliar na modelagem dos processos foram: Ecoinvent versão 3 e Agri-footprint.

Das citadas bases de dados os seguintes processos foram selecionados:

- base de dados ecoinvent – Soybean (BR), production, Alloc Def, U;
- base de dados agri-footprint – Soybean, at farm/BR Mass.

Adicionou-se os dados de entradas e saídas do sistema agrícola no software, considerando-se a quantidade de produto por hectare.

Da quantidade de soja produzida por hectare, descontou-se 12% de umidade.

Nos dados de entradas conhecidas da natureza considerou-se:

- ocupação de terra arável – 1 ha;
- transformação de floresta (Agri-footprint, 2014);
- transformação de cultura permanente (Agri-footprint, 2014);
- transformação para terra arável (Agri-footprint, 2014);
- dióxido de carbono.

Nas entradas conhecidas da esfera tecnológica levou-se em conta os seguintes processos:

- energia pela queima de diesel em maquinários;
- fosfato (NPK 0-32-0);
- superfosfato simples (NPK 0-21-0);
- superfosfato triplo (NPK 0-48-0);
- cloreto de potássio (NPK 0-0-60);
- calcário
- componentes de benzimidazol;
- componentes de piretóide;
- componentes organofosforados;
- 2,4-diclorofenol;
- glifosato;
- componentes de bipiridílio;
- pesticida não especificado.

Dentre os processos que não constavam na base de dados e foram considerados como “não especificado” estão:

- |                        |                             |
|------------------------|-----------------------------|
| • Fosfato monoamônico; | • Imidacloprido;            |
| • Pyraclostrobina;     | • Tiodicarbe;               |
| • Epoxiconazol;        | • Clorimurom-etílico;       |
| • Carboxina;           | • Cloransulam-metílico;     |
| • Tiram;               | • Quizalofope-P-tefurílico; |
| • Clorfluazuron;       | • Carfentrazone etílica;    |
| • Diflubenzuron;       | • Cletodim.                 |
| • Metomil;             |                             |

Todos os processos foram selecionados considerando “para mercado”, com alocação padrão e “unit process”, processos elementares da base de dados do Ecoinvent.

Levou-se em conta as diferenças nas composições dos fertilizantes considerados nos processos do software e aquelas dos produtos utilizados nas fazendas, sendo os ajustes realizados.

Em princípio, fez-se seleção dos processos de produção dos defensivos pelo nome do produto. Caso o processo não constasse na base de dados, a seleção ocorreu de acordo com o

grupo químico. Os processos não encontrados foram adicionados como pesticida não especificado.

Na modelagem das saídas do sistema agrícola considerou-se as emissões de metais pesados para o solo e água, de acordo com a base de dados Agri-footprint.

No que se refere às emissões de defensivos para água, os ingredientes ativos, abaixo relacionados, não constavam na base de dados do software, por conta disso, a análise os considerou pesticidas não especificados:

- Clorfluazuron;
- Cloransulam metílico;
- Quizalofop-P-tefurílico;

No que concerne às emissões para o solo, os defensivos, abaixo relacionados, não foram encontrados na base de dados do software, considerados portanto, pesticidas não especificados:

- Clorfluazuron;
- Quizalofop-P-tefurílico;

No apêndice X encontra-se uma lista com todos os ingredientes ativos dos defensivos considerados assim como seu número CAS.

Com o intuito de comparar os resultados de potencial impacto, gerados com base nesta pesquisa, com os inventários propostos por Caveletti (2010) e Werf (2005), modelou-se também seus inventários, com as seguintes considerações adicionais:

- não houve distinção entre superfosfato simples e superfosfato triplo;
- a produção de defensivos, assim como as emissões para água e solo, foram consideradas como pesticida não especificado.

O inventário proposto por Mourad (2008) não foi simulado, visto a autora apresentar os dados de fertilizantes agregados, inviabilizando sua entrada no SimaPro.

Na base de dados do Agri-footprint e Ecoinvent, considerou-se os seguintes processos:

- grãos de soja, na fazenda, dados brasileiros, com alocação mássica (Soybean, at farm/BR Mass) – base de dados Agri-footprint;
- produção de grãos de soja, Brasil, alocação padrão, “unit” (Soybean {BR}/ production / Alloc Def, U) – base de dados Ecoinvent.

Com os inventários modelados, foi possível calcular o potencial impacto ambiental.

No apêndice 1 encontram-se listados os processos elementares (bases de dados do SimaPro) usados para representar os fluxos elementares dentro do sistema da Soja.

### 3.4. CÁLCULO DO POTENCIAL IMPACTO AMBIENTAL

Quantificou-se o potencial impacto ambiental do sistema agrícola Produção de Soja em ponto médio na cadeia de causa e efeito. Realizou-se o cálculo com o emprego dos seguintes métodos:

- CML-IA baseline versão 3.01 e emprego do conjunto de normalização e ponderação *World 2000*;
- EDIP 2003 versão 1.04 padrão;
- IMPACT 2002+ versão 2.11;
- ReCiPe, ponto médio, individualista, versão 1.10 e emprego do conjunto de normalização e ponderação *World*;
- USEtox *default* versão 1.03 e emprego do conjunto de normalização e ponderação Europa 2004.

Com o intuito de identificar qual processo é apontado pelo método como principal contribuinte ao potencial impacto ambiental, nove cenários foram modelados no SimaPro:

- Cenário Todas as Entradas e Saídas - neste cenário considera-se o inventário completo do sistema agrícola, com todas as entradas e saídas;
- Cenário Sem Transformação do Solo, Todas as Saídas - neste cenário retirou-se somente as entradas referentes à transformação do solo, para verificar se este processo contribui com o potencial impacto;
- Cenário Sem Transformação do Solo e Produção de Energia - neste cenário, além da transformação do solo, retirou-se também a produção de energia do inventário, não se realizou nenhuma alteração nos dados de saída;
- Cenário Sem Transformação do Solo, Produção de Energia e Produção de Fertilizante – retirou-se, neste cenário, as entradas dos processos referentes à transformação do solo, produção de energia e de fertilizantes, nenhuma alteração foi realizada nos dados de saída;
- Cenário Sem Entradas Todas as Saídas – excluiu-se, neste cenário, todas as entradas e mantiveram-se todas as saídas;
- Cenário Sem Entradas e Sem Emissões de Metais Pesados – excluiu-se, neste cenário, todas as entradas do sistema e as emissões de metais pesados do inventário;
- Cenário Sem Entradas e Sem Emissões de Fertilizantes – neste cenário, não se incluiu as entradas, as emissões de metais pesados e de fertilizantes apresentadas no inventário;

- Cenário Somente Emissão e Produção de Defensivos – manteve-se, neste cenário, somente os dados de entrada no sistema, relacionados com a produção de defensivos e os dados de saída, relacionados aos defensivos;
- Cenário Somente Emissão de Defensivos - neste último cenário, manteve-se no inventário somente os dados de saída relacionados com os defensivos.

Com os resultados dos cenários descritos acima, bem como suas comparações, almeja-se identificar o processo com maior contribuição ao potencial impacto ambiental.

Exportou-se os resultados calculados pelos métodos para planilhas de Excel para construção dos gráficos.

### 3.5. ADAPTAÇÃO DOS FATORES DE CARACTERIZAÇÃO

Procedeu-se à adaptação dos fatores de caracterização com a utilização do método USEtox. Esta adaptação foi possível pois os desenvolvedores do método o disponibilizam, em planilha do Excel, em seu site (disponível para download em <http://www.usetox.org/model/download>). A disposição do método, em planilha eletrônica, possibilita ao usuário ampliar a base de dados das substâncias, com os dados de suas características. Acrescente-se ainda, a opção de criar um cenário da região que irá receber a emissão.

As escalas geográficas consideradas pelo USEtox são: global e continental. A escala continental se refere à Europa. Dessa forma, para obter os fatores de caracterização, adaptados às características regionais brasileiras, criou-se um cenário brasileiro dentro do USEtox. Para a construção dele, adicionou-se informações na planilha denominada *Landscape data* nos campos destinados à região geográfica continental.

As informações adicionadas ao método foram:

- área (km<sup>2</sup>) – 8.515.767,049 km<sup>2</sup> (IBGE, 2010);
- área marinha (km<sup>2</sup>) – 167.230,9 km<sup>2</sup> (costa brasileira 7.367 km (IBGE, 2010), limite do Estado mar adentro 22,7 km);
- fração de área com água doce – 0,7% (PEGORARO, 2008);
- fração de área com solo natural – 80,3%;
- fração de área com solo agrícola – 19% (EMATER, 2014);
- outros solos – 1E-20 (USEtox, 2011);
- temperatura média – 22,57°C (INMET, 2014);



- velocidade do vento – 1,79 m.s<sup>-1</sup> (INMET, 2014);
- taxa de chuva – 1.761 mm.ano<sup>-1</sup> (ANA, 2013)
- profundidade de água doce – 2 m (PEGORARO, 2008);
- fração de escoamento superficial – 0,25 (USEtox, 2011);
- fração infiltrada – 0,25 (USEtox, 2011);
- erosão do solo – 0,03 mm.ano<sup>-1</sup> (USEtox, 2011);
- população total – 183.987.291 pessoas (IBGE, 2007);
- exposição, taxa de inalação e ingestão de água (USEtox, 2011);
- produção exposta – 0,56 kg.(dia.pessoa)<sup>-1</sup> (PEGORARO, 2008);
- produção não exposta – 1,141 kg.(dia.pessoa)<sup>-1</sup> (PEGORARO, 2008);
- consumo de carne – 0,241 kg.(dia.pessoa)<sup>-1</sup> (PEGORARO, 2008);
- consumo produtos lácteos – 0,319 kg.(dia.pessoa)<sup>-1</sup> (PEGORARO, 2008);
- consumo de peixe de água doce – 0,006 kg.(dia.pessoa)<sup>-1</sup> (PEGORARO, 2008);
- consumo de peixe de água marinha (USEtox, 2011).

As substâncias para as quais gerou-se fatores de caracterização com a informações regionais brasileiras foram aquelas apontadas pelo método, em sua forma padrão, como principais contribuintes para o potencial impacto ambiental. São elas:

- |                     |                      |
|---------------------|----------------------|
| • Benzeno;          | • Metil carbamato;   |
| • Formaldeído;      | • Lambda-cialotrina; |
| • Nitrobenzeno;     | • Cipermetrina;      |
| • Acefato;          | • Diflubenzuron;     |
| • Clorobenzeno;     | • Carbendazim.       |
| • 1,2 dicloroetano; |                      |

Os fatores de caracterização adaptados foram então adicionados no método USEtox, dentro do SimaPro. Obteve-se assim o método USEtox customizado para melhor representar o sistema agrícola Produção de Soja. Dessa forma, calculou-se novamente, o potencial impacto ambiental desse sistema, na tentativa de obter um resultado mais próximo da realidade.

## 4. RESULTADOS

Nesta seção, apresenta-se os insumos aplicados, nas 14 fazendas, localizadas na região Oeste do Paraná. Dessa forma, tornou-se possível estimar os potenciais impactos ambientais que o sistema agrícola de produção de soja, com a utilização de ferramentas da agricultura de precisão, pode causar ao ambiente.

### 4.1. INVENTÁRIO DA PRODUÇÃO DE SOJA

A Tabela 10 apresenta o inventário do sistema agrícola Produção de Soja. Apresenta-se neste inventário todos os insumos que entram no sistema (fertilizantes, agroquímicos, diesel, entre outros) e as potenciais emissões do sistema: efluentes líquidos; emissões atmosféricas; e emissões para o solo.

**Tabela 10.** Inventário da produção de soja na região oeste do Paraná.

|   | <b>Prod. 1tn<br/>grãos<br/>soja</b> | <b>Fert.</b> | <b>Agrotox</b> | <b>Diesel</b> | <b>Total<br/>(tn<sup>-1</sup>)</b> | <b>Total<br/>(ha<sup>-1</sup>)</b> | <b>Ref.</b>            |
|---|-------------------------------------|--------------|----------------|---------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------|
| <b>Entradas</b>                                 |                                     |              |                |               |                                    |                                    |                        |
| Transf. de floresta (m <sup>2</sup> )           | 180,03                              |              |                |               | -                                  | 180,03                             | (AGRI-FOOTPRINT, 2014) |
| Transf. de cultura permanente (m <sup>2</sup> ) | 12,07                               |              |                |               | -                                  | 12,07                              | (AGRI-FOOTPRINT, 2014) |
| Transf. de terra arável (m <sup>2</sup> )       | 66,72                               |              |                |               | -                                  | 66,72                              | (AGRI-FOOTPRINT, 2014) |
| Transf. para terra arável (m <sup>2</sup> )     | 258,83                              |              |                |               | -                                  | 258,83                             | (AGRI-FOOTPRINT, 2014) |
| Sementes (kg)                                   | 19,243                              |              |                |               | 19,243                             | 73,617                             | (DADOS DE CAMPO, 2013) |
| CO <sub>2</sub> (kg)                            | 1980,336                            |              |                |               | 1980,336                           | 7576,200                           | (PADUA, 2006)          |
| Calcário (kg)                                   |                                     | 176,396      |                |               | 176,396                            | 674,840                            | (DADOS DE CAMPO, 2013) |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Sup Simples (kg)  |                                     | 10,233       |                |               | 10,233                             | 39,150                             | (DADOS DE CAMPO, 2013) |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Mono (kg)         |                                     | 9,270        |                |               | 9,270                              | 35,466                             | (DADOS DE CAMPO, 2013) |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Triplo (kg)       |                                     | 13,555       |                |               | 13,555                             | 51,859                             | (DADOS DE CAMPO, 2013) |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (NPK) (kg)        |                                     | 2,401        |                |               | 2,401                              | 9,186                              | (DADOS DE CAMPO, 2013) |
| K <sub>2</sub> O (kg)                           |                                     | 28,741       |                |               | 28,741                             | 109,956                            | (DADOS DE CAMPO, 2013) |
| Água (kg)                                       | 1,63E+06                            |              |                |               | 1,634E+06                          | 6,250E+06                          | (EMBRAPA, 2011)        |
| Fungicida (kg)                                  |                                     |              | 0,139          |               | 0,139                              | 0,530                              | (DADOS DE CAMPO, 2013) |
| Inseticida (kg)                                 |                                     |              | 0,240          |               | 0,240                              | 0,917                              | (DADOS DE CAMPO, 2013) |
| Herbicida (kg)                                  |                                     |              | 2,387          |               | 2,387                              | 9,132                              | (DADOS DE CAMPO, 2013) |
| Óleo Diesel (kg)                                |                                     |              |                | 12,467        | 12,467                             | 47,695                             | (DADOS DE CAMPO, 2013) |

*Continua...*

**Tabela 10.** Inventário da produção de soja na região oeste do Paraná. (continuação)

| <b>Saídas</b>                         |       |        |       |  |
|---------------------------------------|-------|--------|-------|--|
| <b>Efluentes Líquidos</b>             |       |        |       |  |
| Nitrato (NO <sub>3</sub> ) (kg)       | 5,321 |        | 5,321 | 20,358 (NEMECEK <i>et al.</i> , 2011)                |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg)    |       | 0,061  | 0,061 | 0,233 (NEMECEK <i>et al.</i> , 2011)                 |
| Carbendazim (kg)                      |       | 0,030  | 0,030 | 0,115 (LEWIS <i>et al.</i> , 1999)                   |
| Pyraclostrobrina (kg)                 |       | 0,006  | 0,006 | 0,022 (LEWIS <i>et al.</i> , 1999)                   |
| Epoxiconazol (kg)                     |       | 0,004  | 0,004 | 0,016 (LEWIS <i>et al.</i> , 1999)                   |
| Carboxina (kg)                        |       | 0,003  | 0,003 | 0,010 (LEWIS <i>et al.</i> , 1999)                   |
| Tiram (kg)                            |       | 0,003  | 0,003 | 0,010 (LEWIS <i>et al.</i> , 1999)                   |
| Cipermetrina (kg)                     |       | 0,003  | 0,003 | 0,010 (LEWIS <i>et al.</i> , 1999)                   |
| Diflubenzuron (kg)                    |       | 0,005  | 0,005 | 0,018 (LEWIS <i>et al.</i> , 1999)                   |
| Metomil (kg)                          |       | 0,014  | 0,014 | 0,055 (LEWIS <i>et al.</i> , 1999)                   |
| Acefato (kg)                          |       | 0,043  | 0,043 | 0,163 (LEWIS <i>et al.</i> , 1999)                   |
| Tiametoxam (kg)                       |       | 0,005  | 0,005 | 0,021 (LEWIS <i>et al.</i> , 1999)                   |
| Lambda-cialotrina (kg)                |       | 0,004  | 0,004 | 0,016 (LEWIS <i>et al.</i> , 1999)                   |
| Imidacloprido (kg)                    |       | 0,001  | 0,001 | 0,005 (LEWIS <i>et al.</i> , 1999)                   |
| Tiodicarbe (kg)                       |       | 0,001  | 0,001 | 0,002 (LEWIS <i>et al.</i> , 1999)                   |
| Parationa metílica (kg)               |       | 0,002  | 0,002 | 0,006 (LEWIS <i>et al.</i> , 1999)                   |
| 2,4-D (kg)                            |       | 0,124  | 0,124 | 0,475 (LEWIS <i>et al.</i> , 1999)                   |
| Clorimurrometílico (kg)               |       | 0,002  | 0,002 | 0,007 (LEWIS <i>et al.</i> , 1999)                   |
| Glifosato (kg)                        |       | 0,327  | 0,327 | 1,252 (LEWIS <i>et al.</i> , 1999)                   |
| Paraquat (kg)                         |       | 0,006  | 0,006 | 0,023 (LEWIS <i>et al.</i> , 1999)                   |
| Carfentrazona etílica (kg)            |       | 0,000  | 0,000 | 0,000 (LEWIS <i>et al.</i> , 1999)                   |
| Cletodim (kg)                         |       | 0,001  | 0,001 | 0,004 (LEWIS <i>et al.</i> , 1999)                   |
| Zinco (g)                             |       | 27,6   |       | (AGRI-FOOTPRINT, 2014)                               |
| Cádmio (mg)                           |       | 36,71  |       | (AGRI-FOOTPRINT, 2014)                               |
| Mercúrio (mg)                         |       | 0,87   |       | (AGRI-FOOTPRINT, 2014)                               |
| Chumbo (mg)                           |       | 178,24 |       | (AGRI-FOOTPRINT, 2014)                               |
| Cobre (g)                             |       | 3,55   |       | (AGRI-FOOTPRINT, 2014)                               |
| Cromo (g)                             |       | 18,96  |       | (AGRI-FOOTPRINT, 2014)                               |
| <b>Emissões Atmosféricas</b>          |       |        |       |  |
| Óxido nitroso (N <sub>2</sub> O) (kg) | 1,807 | 0,001  | 1,808 | 6,918 (NEMECEK <i>et al.</i> , 2011)/(SHEEHAN, 1998) |
| NO <sub>x</sub> (kg)                  | 0,380 | 0,469  | 0,848 | 3,245 (NEMECEK <i>et al.</i> , 2011)/(SHEEHAN, 1998) |
| C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> (kg)    |       | 0,045  | 0,045 | 0,171 (SHEEHAN, 1998)                                |

Continua...

**Tabela 10.** Inventário da produção de soja na região oeste do Paraná. (continuação)

|                             |          |        |          |          |                                  |
|-----------------------------|----------|--------|----------|----------|----------------------------------|
| CO (kg)                     |          | 0,168  | 0,168    | 0,644    | (SHEEHAN, 1998)                  |
| SO <sub>2</sub> (kg)        |          | 0,063  | 0,063    | 0,242    | (SHEEHAN, 1998)                  |
| CH <sub>4</sub> (kg)        |          | 0,002  | 0,002    | 0,008    | (SHEEHAN, 1998)                  |
| CO <sub>2</sub> (kg)        | 60,119   | 39,769 | 99,889   | 382,146  | (CAVALETT, 2009)/(SHEEHAN, 1998) |
| O <sub>2</sub> (kg)         | 2196,057 |        | 2196,057 | 8401,487 | (CAVALETT, 2009)                 |
| Mat. Part. (kg)             |          | 0,022  | 0,022    | 0,083    | (SHEEHAN, 1998)                  |
| <b>Emissões para o solo</b> |          |        |          |          |                                  |
| Carbendazim (kg)            |          | 0,049  | 0,049    | 0,188    | (LEWIS <i>et al.</i> , 1999)     |
| Pyraclostrobina (kg)        |          | 0,009  | 0,009    | 0,035    | (LEWIS <i>et al.</i> , 1999)     |
| Epoxiconazol (kg)           |          | 0,007  | 0,007    | 0,026    | (LEWIS <i>et al.</i> , 1999)     |
| Carboxina (kg)              |          | 0,004  | 0,004    | 0,016    | (LEWIS <i>et al.</i> , 1999)     |
| Tiram (kg)                  |          | 0,004  | 0,004    | 0,016    | (LEWIS <i>et al.</i> , 1999)     |
| Cipermetrina (kg)           |          | 0,004  | 0,004    | 0,016    | (LEWIS <i>et al.</i> , 1999)     |
| Diflubenzuron (kg)          |          | 0,008  | 0,008    | 0,030    | (LEWIS <i>et al.</i> , 1999)     |
| Metomil (kg)                |          | 0,023  | 0,023    | 0,089    | (LEWIS <i>et al.</i> , 1999)     |
| Acefato (kg)                |          | 0,069  | 0,069    | 0,265    | (LEWIS <i>et al.</i> , 1999)     |
| Tiametoxam (kg)             |          | 0,009  | 0,009    | 0,034    | (LEWIS <i>et al.</i> , 1999)     |
| Lambda-cialotrina (kg)      |          | 0,007  | 0,007    | 0,026    | (LEWIS <i>et al.</i> , 1999)     |
| Imidacloprido (kg)          |          | 0,002  | 0,002    | 0,008    | (LEWIS <i>et al.</i> , 1999)     |
| Tiodicarbe (kg)             |          | 0,001  | 0,001    | 0,003    | (LEWIS <i>et al.</i> , 1999)     |
| Parationa metílica kg       |          | 0,003  | 0,003    | 0,011    | (LEWIS <i>et al.</i> , 1999)     |
| 2,4-D (kg)                  |          | 0,202  | 0,202    | 0,774    | (LEWIS <i>et al.</i> , 1999)     |
| Clorimurrometílico (kg)     |          | 0,003  | 0,003    | 0,011    | (LEWIS <i>et al.</i> , 1999)     |
| Glifosato (kg)              |          | 0,533  | 0,533    | 2,039    | (LEWIS <i>et al.</i> , 1999)     |
| Paraquat (kg)               |          | 0,010  | 0,010    | 0,037    | (LEWIS <i>et al.</i> , 1999)     |
| Cloransulam metílico (kg)   |          | 0,002  | 0,002    | 0,009    | (LEWIS <i>et al.</i> , 1999)     |
| Carfentrazona etílica (kg)  |          | 0,000  | 0,000    | 0,0003   | (LEWIS <i>et al.</i> , 1999)     |
| Cletodim (kg)               |          | 0,002  | 0,002    | 0,007    | (LEWIS <i>et al.</i> , 1999)     |
| Zinco (g)                   | 388,96   |        |          |          | (AGRI-FOOTPRINT, 2014)           |
| Cádmio (g)                  | 1,80     |        |          |          | (AGRI-FOOTPRINT, 2014)           |
| Mercúrio (mg)               | 86,79    |        |          |          | (AGRI-FOOTPRINT, 2014)           |
| Chumbo (g)                  | 7,50     |        |          |          | (AGRI-FOOTPRINT, 2014)           |
| Cobre (g)                   | 179,53   |        |          |          | (AGRI-FOOTPRINT, 2014)           |
| Cromo (g)                   | 9,70     |        |          |          | (AGRI-FOOTPRINT, 2014)           |
| Níquel (g)                  | 9,20     |        |          |          | (AGRI-FOOTPRINT, 2014)           |

Na Tabela 10 observa-se que para a produção de soja, por hectare, na região Oeste do Paraná, há um fluxo material total de 1052,35 kg de produtos por hectare. Desse fluxo, os fertilizantes representam maior parcela: majoritariamente têm-se o calcário com 64,13% dos recursos, em seguida o fósforo com 12,89% e o potássio com 10,45%.

Os agroquímicos utilizados no sistema agrícola não apresentam a mesma proporção dos fertilizantes, os primeiros representam apenas 1% do fluxo de entrada no sistema. Porém seu potencial de toxicidade humana e perigo ao ambiente é bastante alto. Este fato impõe a necessidade de considerar estes produtos na avaliação do potencial impacto ambiental causado pelo sistema agrícola.

De acordo com convenções internacionais, como a Convenção de Estocolmo, a Convenção de Rotterdam, o Protocolo de Montreal, a Organização Mundial da Saúde, o GHS (*Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals*), e listas internacionais, como PAN (*Pesticide Action Network*), US EPA (*United States Environmental Protection Agency*) e a Lista de Pesticidas banidos, ou severamente restritos, na União Europeia, observa-se que alguns dos defensivos aplicados na produção de soja estão proibidos, severamente restritos ou em observação, devido ao seu elevado potencial tóxico. Esses defensivos são:

- Acefato;
- Parationa metílica;
- Paraquat;
- Tiodicarbe;
- Carbendazim;
- Epoxiconazol;
- Lambda-cialotrina;
- Metomil;
- Quizalofope-p-tefurílico;
- Tiram;
- Imidacloprido;
- Tiametoxan.

Esse fato impõe a necessidade de avaliar com cuidado o potencial de toxicidade que o sistema agrícola pode causar, tanto ao homem, quanto aos ecossistemas expostos.

O sistema agrícola apresenta emissões líquidas e gasosas para o solo (Tabela 10). As emissões líquidas somam um total de 22,84 kg de produtos por hectare. O contribuinte majoritário para tais emissões é o nitrato, responsável por 89,14% delas. Os agroquímicos representam uma parcela de 9,84% das emissões, em especial, os herbicidas glifosato (5,48%) e o 2,4-D (2,08%).

As emissões atmosféricas totalizam 393,46 kg por hectare. Essa emissão ocorre, principalmente, devido à queima de diesel no sistema. A emissão de CO<sub>2</sub> predomina, correspondente a 97,13% do total das emissões atmosféricas. Neste caso, o processo de

produção da soja apresenta um ponto positivo, pois apesar da quantidade emitida de CO<sub>2</sub>, o processo de fotossíntese da soja consome uma quantidade muito maior de CO<sub>2</sub> do que aquela emitida, com um saldo positivo de 7194,05 kg de CO<sub>2</sub>. Observa-se ainda nas emissões atmosféricas as emissões dos gases, incluindo gases com efeito estufa: NO<sub>x</sub>; C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>; CO; SO<sub>2</sub>; CH<sub>4</sub>.

As emissões para o solo são decorrentes da aplicação de defensivos, com um total de 3,67 kg de ingrediente ativo. As substâncias que apresentam maior parcela na emissão são os herbicidas glifosato (55,57%) e 2,4-D (21,09%).

Na Tabela 10, observa-se grande quantidade de diferentes defensivos para realizar o controle de pragas na produção de soja. Dentre esses ingredientes ativos, destaca-se aqueles com classificação mais perigosa:

- Piraclostrobina, epoxiconazol, carboxina, tiran, clorfluazuron, cipermetrina, diflubenzuron, metomil, 2,4-D, paraquat, cletodim - são ingredientes ativos classificados como extremamente tóxicos;
- Tiametoxam, lambda-cialotrina e cipermetrina - classificados como altamente perigosos ao meio ambiente.

Essas substâncias, empregadas para o controle de pragas, impõe a necessidade de avaliar os impactos tóxicos que podem causar aos seres humanos e também aos ecossistemas.

Autores como Cavalett e Ortega (2010), Mourad (2008), Van der Werf, Petit e Sanders (2005) e a base de dados Agri-footprint e Ecoinvent (ambos disponível no software SimaPro) apresentam dados das quantidades de insumos aplicados para produção de soja, apresentados na Tabela 11.

**Tabela 11.** Dados de entrada de insumos para produção de soja apresentados em outros estudos (kg.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>).

| Insumo                  | Cavalett e Ortega (2010) | Mourad (2008) | Van der Werf, Petit e Sanders (2005) | Agri-footprint (SimaPro) | Ecoinvent |
|-------------------------|--------------------------|---------------|--------------------------------------|--------------------------|-----------|
| Herbicidas              | 4,80                     |               |                                      | -                        |           |
| Inseticidas e Fungicida | 3,20                     | 5,15          | 1,5                                  | -                        | 0,82      |
| Semente                 | 69,00                    | 74,24         | -                                    | -                        | 106,09    |
| Calcário                | 375,00                   |               | 150                                  | 400                      | -         |
| Fósforo                 | 33,80                    | 233,71        | 32                                   | 147,88                   | 30,02     |
| Potássio                | 65,40                    |               | 39                                   | -                        | 30,02     |

*Continua...*

**Tabela 11.** Dados de entrada de insumos para produção de soja apresentados em outros estudos ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ ). (*continuação...*)

| Insumo               | Cavalett e Ortega (2010) | Mourad (2008) | Van der Werf, Petit e Sanders (2005) | Agri-footprint (SimaPro) | Ecoinvent |
|----------------------|--------------------------|---------------|--------------------------------------|--------------------------|-----------|
| Componentes de ureia | -                        | -             | -                                    | -                        | 0,65      |
| Esterco              | -                        | -             | -                                    | 5774,65                  | -         |
| Diesel               | 54,60                    | 29,70         | 79                                   | 81,62                    | 16,15     |

Os dados apresentados por Cavalett e Ortega (2010) representam o sistema agrícola para produção de soja com escopo nacional, sendo que para a obtenção dos dados de produção considerou-se uma média aritmética ponderada entre as regiões Sul (responde por 25% da produção de soja) e Centro-Oeste (responde por 75% da produção de soja). No citado trabalho não há menção da quantidade de propriedades constantes na sua amostra. O ano de referência apresentado por Cavalett Ortega (2010) corresponde a 2003/04.

Mourad (2008) coletou dados em cinco propriedades agrícolas do estado de São Paulo. Quatro delas em Itapeva e uma em Casa Branca. Seus dados são referentes ao ano 2006/07.

Van der Werf, Petit e Sanders (2005) também apresentam dados de inventário com escopo nacional. Novamente, não há menção de população na amostra.

Na base de dados Agri-Footprint, de acordo com a documentação do processo apresentada, os dados de produtividade representam uma média entre os anos de 2005 a 2009.

Os dados apresentados pelo Ecoinvent são dados secundários, coletados de publicações referentes ao Brasil, porém alguns dados citados têm origem na Europa, especificadamente na Suíça. Os dados de inventário foram extrapolados do ano 2006 para o ano de 2013, momento de compilação do inventário.

Em contrapartida, para a realização da pesquisa, os dados apresentados correspondem a 14 fazendas localizadas na região oeste do Paraná, referente à safra 2012/13.

A comparação entre a quantidade de insumo aplicada na região Oeste do Paraná (Tabela 10), com quantidades apresentadas em outras pesquisas (Tabela 11) mostra que há diferença nas quantidades aplicadas de fertilizantes, como se segue:

- Calcário: neste trabalho foi obtido um valor de entrada de  $674,84 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Em comparação com o valor apresentado pelo Agri-footprint, há uma diferença de  $284,74 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , ou seja, nessa região aplica-se 68,71% a mais de calcário, por hectare, do que o considerado no inventário do Agri-footprint. Essa diferença aumenta se comparado com o valor apresentado

por Van der Werf, Petit e Sanders (2005), com uma diferença de 349,89% para o insumo considerado. Já no inventário apresentado pelo Ecoinvent não consta a entrada de calcário;

- Fósforo: a quantidade aplicada de fósforo apresenta similaridade com aquela apresentada por Agri-footprint, mas se comparada com os valores apresentados por Van der Werf, Petit e Sanders (2005); Cavalett e Ortega (2010) e Ecoinvent observa-se uma diferença média de 102,76 kg de fósforo, por hectare, aplicados a mais na região Oeste do Paraná;
- Potássio: este insumo também apresenta quantidade superior àquelas apresentadas pelos autores e nas bases de dados citadas. Em relação a Cavalett e Ortega (2010) há uma diferença de 68,14%, em comparação a Van der Werf, Petit e Sanders (2005) esta diferença cresce para 181,95%. Diferença ainda maior é observada em relação ao valor deste insumo em comparação ao inventário do Ecoinvent – um diferencial de 266,28%.

Mourad (2008) apresenta dados agregados de fertilizantes aplicados nas propriedades consideradas em seu estudo. A comparação de seus dados com a somatória da quantidade de fertilizante aplicados na região Oeste do Paraná revela uma diferença bastante grande - de 686,75 kg.ha<sup>-1</sup>.

Na Tabela 11, considera-se, no inventário apresentado por Agri-Footprint, o emprego de adubo orgânico (esterco), em quantidade bastante elevada (5774,65 kg.ha<sup>-1</sup>) e não se leva em conta a aplicação de potássio. Somente no inventário do Ecoinvent considera-se a aplicação de fertilizante nitrogenado. Obtém-se o nitrogênio, no sistema agrícola, através da fixação biológica, por meio de bactérias *Bradyrizobium*. Estas informações não condizem com a realidade da região Oeste do Paraná. Esses pontos não são convergentes com as pesquisas apresentadas na Tabela 11.

Observa-se; pela comparação dos dados de aplicação de fertilizantes, apresentados neste estudo (com agricultura de precisão) e aqueles aplicados de forma homogênea (aplicação tradicional), que estes últimos demonstram quantidades inferiores daqueles apresentados neste estudo. A diferença justifica-se pelos diferentes tipos de solo encontrados nas regiões brasileiras, o que resulta em diferentes demandas de fertilizantes. Esse resultado aponta a necessidade de construir inventários regionalizados para a produção de soja.

No entanto, se for avaliado um dos objetivos levantados pela agricultura de precisão, o aumento de produtividade é alcançado na região Oeste do Paraná, com produtividade de 3826 kg.ha<sup>-1</sup> em contraste com 2830 kg.ha<sup>-1</sup> (CAVALETT e ORTEGA, 2010), 3228 kg.ha<sup>-1</sup> (MOURAD, 2008), 2008 kg.ha<sup>-1</sup> (VAN der WERF, PETIT e SANDERS, 2005), 2440 kg.ha<sup>-1</sup> (AGRI-FOOTPRINT, 2014) e 2544 kg.ha<sup>-1</sup> (ECOINVENT, 2013).



Dos autores e bases de dados citados (Cavalett e Ortega (2010); Mourad (2008); Van der Werf, Pettit e Sanders (2005); Agri-Footprint; e Ecoinvent) somente os dois últimos apresentam as emissões geradas pelo processo de produção da soja. As emissões desse sistema são apresentadas na Tabela 12.

**Tabela 12.** Emissões geradas pelo sistema agrícola apresentadas pelo inventário Agri-Footprint e Ecoinvent.

| <b>Substâncias</b>          | <b>Unidade</b> | <b>Agri-Footprint</b> | <b>Ecoinvent</b> |
|-----------------------------|----------------|-----------------------|------------------|
| <b>Emissões para o Ar</b>   |                |                       |                  |
| Monóxido de Dinitrogênio    | kg             | 2,152                 | 1,71             |
| Óxidos de Nitrogênio        | kg             |                       | 0,36             |
| Amônia                      | kg             | 23,34                 |                  |
| Dióxido de Carbono, fóssil  | kg             | 186,79                |                  |
| <b>Emissões para a água</b> |                |                       |                  |
| Nitrato                     | kg             | 127,65                | 113,15           |
| Cádmio                      | mg             | 36,71                 |                  |
| Cromo                       | mg             | 18967,57              |                  |
| Cobre                       | mg             | 3555,48               |                  |
| Mercúrio                    | mg             | 0,865                 |                  |
| Níquel                      | mg             | 0                     |                  |
| Chumbo                      | mg             | 178,24                |                  |
| Zinco                       | mg             | 27598,07              |                  |
| Fósforo                     | kg             |                       | 0,87             |
| <b>Emissões para o solo</b> |                |                       |                  |
| Esterco                     | kg             | 11,61                 |                  |
| Cádmio                      | g              | 1,76                  | 0,95             |
| Cromo                       | g              | 9,72                  | 5,80             |
| Cobre                       | g              | 179,53                | -30,78           |
| Mercúrio                    | mg             | 86,79                 |                  |
| Níquel                      | g              | 9,23                  | -9,36            |
| Chumbo                      | g              | 7,45                  | 5,32             |
| Zinco                       | kg             | 0,39                  | -0,09            |
| Fertilizante                | kg             | 18,33                 |                  |
| Monocrotofós                | kg             |                       | 0,07             |
| Endosulfan                  | kg             |                       | 0,11             |
| Glifosato                   | kg             | 5,84                  | 0,01             |
| Diflubenzuron               | kg             |                       | 0,54             |
| Paraquat                    | kg             | 0,537                 |                  |
| Diuron                      | kg             | 0,339                 |                  |
| Chlorimuron-etílico         | kg             | 0,23                  |                  |
| 2,4-D                       | kg             | 1,26                  | 0,75             |

**Fonte:** base de dados Agri-Footprint disponível no software SimaPro.

Na Tabela 12 observa-se que as emissões para os compartimentos ar, água e solo são decorrentes dos seguintes insumos:

- emissões atmosféricas - amônia devido à utilização de fertilizante orgânico, inorgânico e restos culturais; dióxido de carbono, pela utilização de fertilizantes e transformação da terra;

monóxido de dinitrogênio devido aos restos culturais, uso de fertilizantes inorgânicos, uso da terra e mineralização de nitrogênio;

- emissões para água - nitrato, devido ao uso de fertilizante orgânico, inorgânico e restos culturais, fósforo pelo uso de fertilizante inorgânico e metais pesados pelo uso de fertilizantes inorgânicos;
- emissões para o solo – fósforo, pelo uso de fertilizante orgânico e inorgânico, metais pesados pelo uso de fertilizantes inorgânicos e, emissões devido ao uso de defensivos agrícolas.

Entre as Tabela 10 e Tabela 12 observa-se diferença na quantidade de nitrato emitido: 20,358 kg.ha<sup>-1</sup> para a região Oeste do Paraná e 127,650 e 113,15 kg.ha<sup>-1</sup> considerados por Agri-Footprint e Ecoinvent respectivamente.

Um ponto interessante a ser observado, na Tabela 12, consiste em que todos os defensivos são emitidos ao solo, ou seja, não são considerados defensivos emitidos para a água. O total de defensivos emitidos para o solo é 8,21 kg.ha<sup>-1</sup> (Agri-Footprint) e 1,48 kg.ha<sup>-1</sup> (Ecoinvent). Nesta pesquisa, com o emprego da heurística proposta por Lewis, Newbold e Tzilivakis (1999) a totalização foi de 3,67 kg.ha<sup>-1</sup> emitidos para o solo e 2,23 kg.ha<sup>-1</sup> para a água, gerando uma emissão de 5,9 kg.ha<sup>-1</sup>. Observa-se que o valor aplicado nesta pesquisa está entre os dois valores apresentados, com uma diferença, para menos, de 71,86% proposto por Agri-Footprint e uma diferença, para mais, de 25,08% da emissão proposta pelo Ecoinvent.

Ressalta-se ainda, nos dados de emissão apresentados pelo Ecoinvent, a remoção de alguns metais pesados do solo, tais como: cobre (30,78 g), zinco (0,09 g) e níquel (9,36 g). Esta consideração se baseia nas necessidades de micronutrientes da planta.

Urge a necessidade de as novas pesquisas, sobre o sistema agrícola de produção de soja, retratarem a realidade com mais precisão, ou seja, que consigam se aproximar, cada vez mais, do impacto real causado pelo sistema. O inventário proposto neste estudo apresenta as seguintes vantagens:

- considera dados primários de 14 fazendas da região Oeste do Paraná, com intenção de reduzir a amplitude de variação entre os dados, bem como, reduzir a incerteza embutida em dados médios de grandes áreas geográficas;
- considera a emissão de defensivos para os compartimentos solo e água;
- considera, durante a modelagem dos dados no SimaPro, os impactos causados pelo processo de produção de alguns defensivos, presentes na base de dados do software, tais como:
  - componentes de benzimidazol, que se referem ao fungicida carbendazim;

- componentes de piretóide, que se referem aos inseticidas cipermetrina, tiametoxan e lambda-cialotrina;
- componentes organofosforados que se referem aos inseticidas acefato e parationa metílica;
- herbicida 2,4-D;
- herbicida glifosato;
- componentes de bupiridílio, que se referem ao herbicida paraquat.

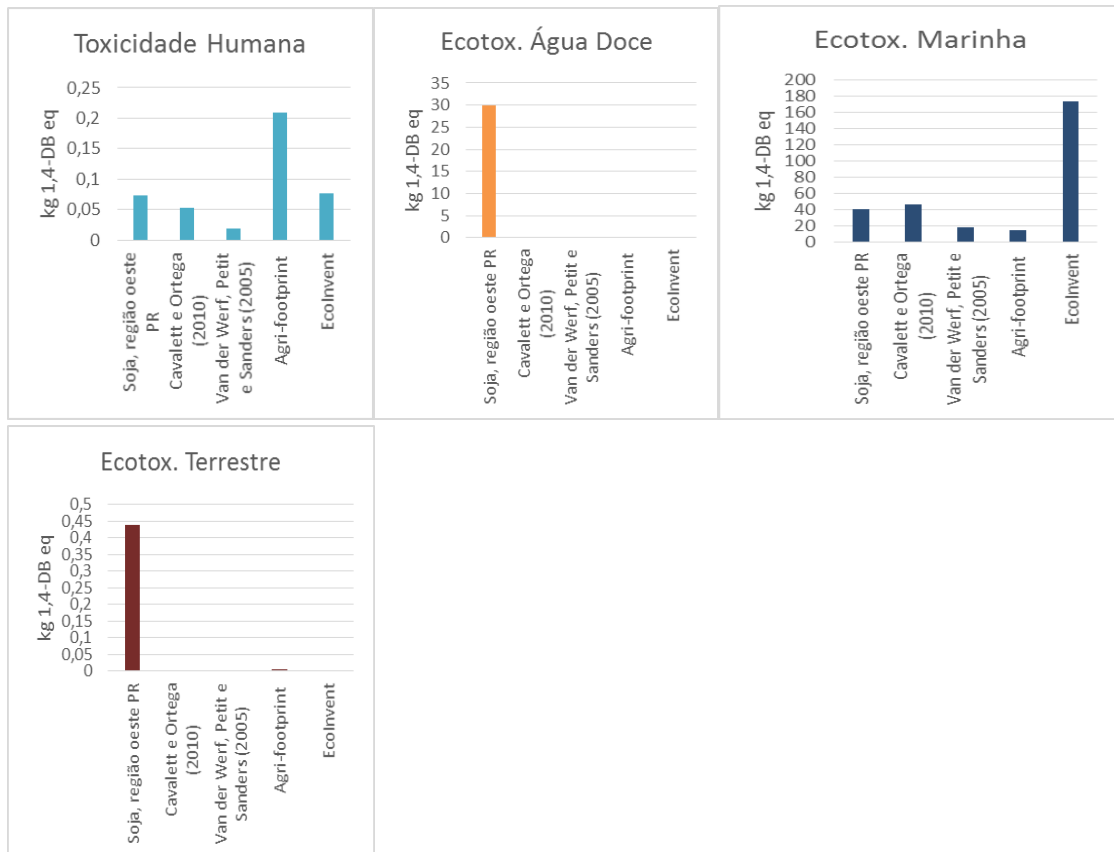
Com o intuito de observar as diferenças destacadas nos inventários, apresentados pelos autores anteriormente mencionados na seção 4.2, apresenta-se a avaliação do impacto de acordo com cada inventário.

#### 4.2. AVALIAÇÃO DO POTENCIAL IMPACTO AMBIENTAL CAUSADO PELO SISTEMA PRODUÇÃO DE SOJA

A avaliação do potencial impacto ambiental foi realizada através de cinco métodos diferentes: CML-IA; EDIP 2003; IMPACT 2002+; ReCiPe; e USEtox.

##### 4.2.1. Avaliação do Potencial Impacto Ambiental pelo método CML-IA

Para realizar a avaliação do potencial impacto ambiental causado pela produção de soja, o método CML-IA considera as seguintes categorias de impacto: depleção abiótica; depleção abiótica (combustíveis fósseis), aquecimento global; depleção da camada de ozônio; toxicidade humana; ecotoxicidade em água doce; ecotoxicidade em água marinha; ecotoxicidade terrestre; oxidação fotoquímica; acidificação; e eutrofização. Nesta seção serão apresentados os resultados da avaliação do potencial impacto ambiental para as categorias de toxicidade humana e ecotoxicidade (Figura 4). Os demais resultados, referentes as outras categorias de impacto, estão no apêndice 2.



**Figura 4.** Avaliação do potencial impacto ambiental do sistema agrícola – método CML-IA.

Nos resultados apresentados Figura 4 observa-se que para as categorias de ecotoxicidade em água doce e ecotoxicidade terrestre, o potencial impacto é superior aqueles apresentados por Cavalett e Ortega (2010), Werf, Petit e Sanders (2005), Agri-footprint e EcoInvent. Nesta pesquisa, na categoria de ecotoxicidade em água doce obteve-se um potencial impacto de 30 kg 1,4-DB eq., enquanto que para os autores e bases de dados selecionadas os resultados ficaram na faixa de 0,007 a 0,069 kg 1,4-DB eq. Para a categoria de ecotoxicidade terrestre, o resultado obtido nesta pesquisa foi de 0,44 kg 1,4-DB eq., superior aos resultados apresentados pelos citados autores e bases de dados, que apresentaram valores entre 1,41E-05 e 0,004 kg 1,4-DB eq.

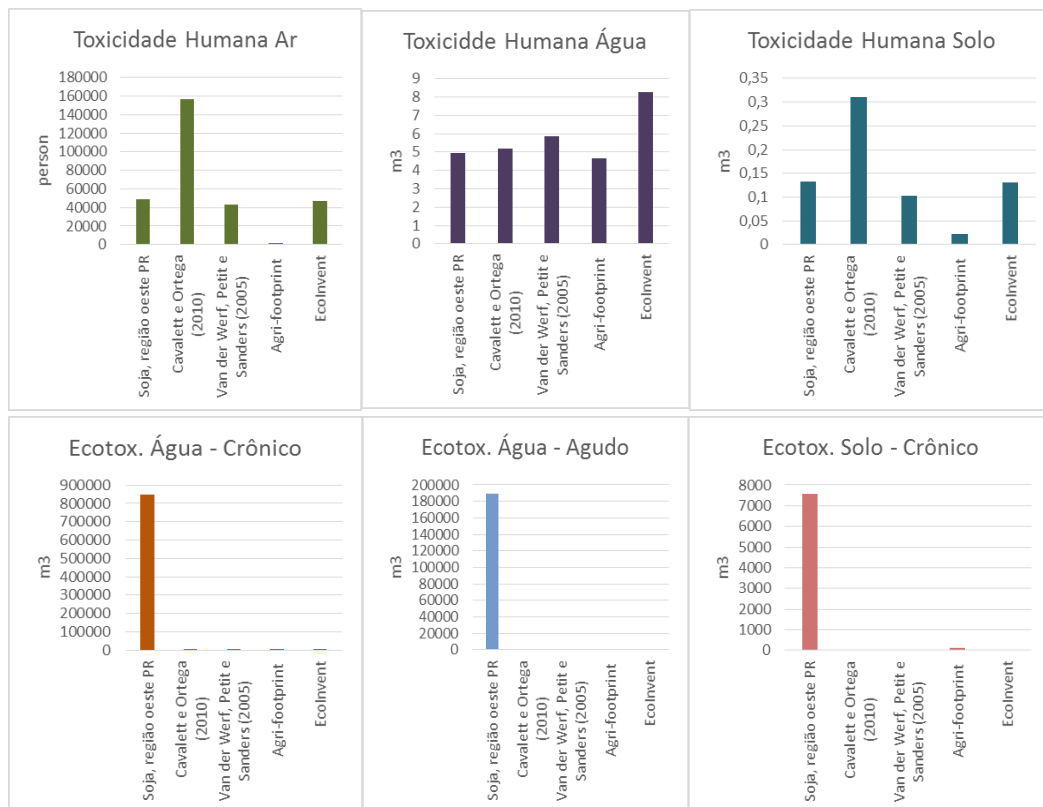
Para a categoria de toxicidade humana, o sistema da Soja na região oeste do Paraná apresentou um potencial impacto de 0,07 kg 1,4-DB eq. Como mostra a Figura 4, este resultado é similar aqueles apresentados por Cavalett e Ortega (2010) e ecoinvent. Já a base de dados agri-footprint apresenta o impacto mais elevado nesta categoria – 0,21 kg 1,4-DB eq.

Os resultados apresentados na Figura 4 para a categoria ecotoxicidade marinha devem ser interpretados com cautela, visto que o sistema de produto considerado está afastado da costa brasileira. Para a referida categoria, o resultado obtido foi de 40,72 kg 1,4-DB eq. Cavalett e

Ortega (2010), Werf, Petit e Sanders (2005), Agri-footprint apresentam valores próximos ao obtido nesta pesquisa. No entanto o potencial impacto calculado com os valores da base de dado ecoinvent apresentou um valor de 173,66 kg 1,4-DB eq.

#### 4.2.2. Avaliação do Potencial Impacto Ambiental pelo método EDIP 2003

Para realizar a avaliação do potencial impacto ambiental, oriundo da produção de soja, o método EDIP 2003 considera as seguintes categorias de impacto: aquecimento global; depleção de ozônio; formação de ozônio (vegetação); formação de ozônio (humano); acidificação; eutrofização terrestre; eutrofização aquática (nitrogênio); eutrofização aquática (fósforo); toxicidade humana ar; toxicidade humana água; toxicidade humana solo; ecotoxicidade água – efeito crônico; ecotoxicidade água – efeito agudo; ecotoxicidade solo – efeito crônico; lixo perigoso; cinzas; resíduos em massa; lixo radioativo e recursos. Nesta seção serão apresentados os resultados da avaliação do potencial impacto ambiental para as categorias de toxicidade humana e ecotoxicidade (Figura 5). Os demais resultados, referentes as outras categorias de impacto, estão no apêndice 3.



**Figura 5.** Avaliação do Impacto da produção de soja calculado pelo método EDIP 2003.

Os resultados apresentados na Figura 5, para a categoria toxicidade humana via ar mostram que o sistema da soja apresenta um impacto de 48 682 pessoas. Os resultados de Werf, Petit e Sanders (2005) e ecoinvent apresentam similaridades ao impacto mencionado anteriormente. Já o resultado obtido por Cavalett e Ortega (2010) apresenta um valor de 156 925 pessoas potencialmente impactadas pelo sistema da soja. Para a categoria toxicidade humana água o potencial impacto obtido nesta pesquisa e aqueles referentes a Cavalett e Ortega (2010), Werf, Petit e Sanders (2005), Agri-footprint e Ecoinvent são similares entre si, variando entre 4,67 m<sup>3</sup> (agri-footprint) a 8,29 m<sup>3</sup> (ecoinvent). Na categoria toxicidade humana solo o resultado do potencial impacto ambiental causado pela região oeste do Paraná foi de 0,13 m<sup>3</sup> de solo impactado. Ecoinvent e Werf, Petit e Sanders (2005) apresentam valores próximos, 0,13 e 0,11 m<sup>3</sup> respectivamente. O maior impacto foi apresentado por Cavalett e Ortega (2010), chegando a um potencial impacto de 0,31 m<sup>3</sup> de solo impactado.

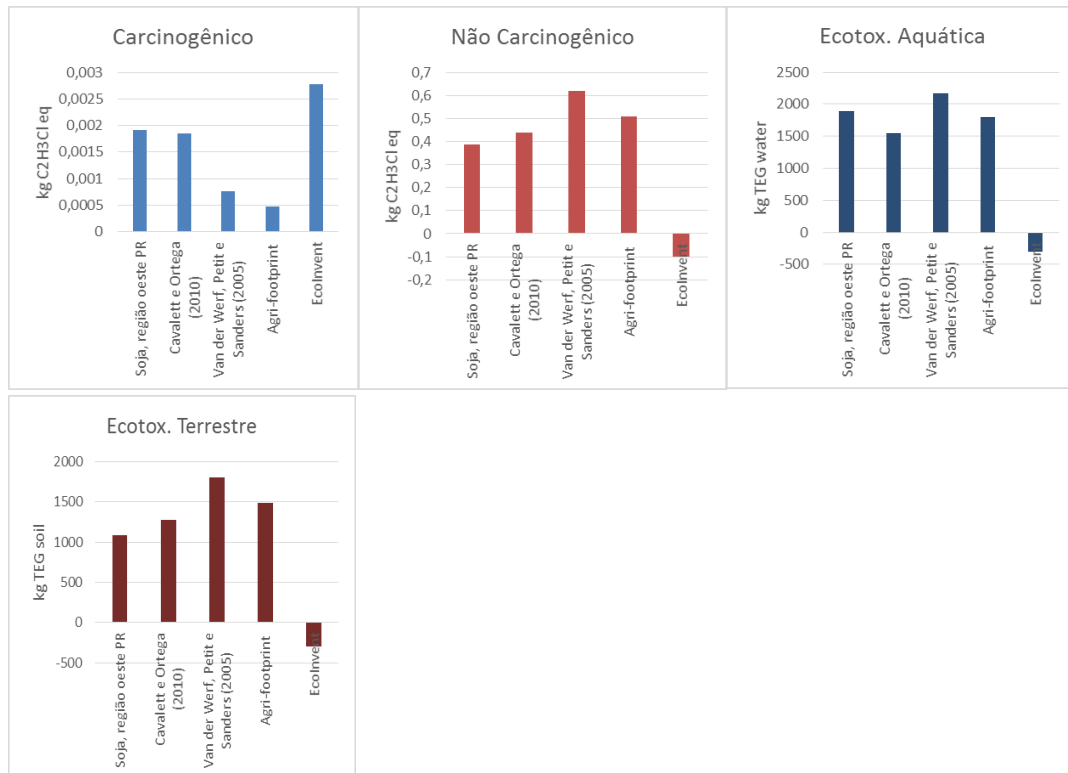
Nas categorias de ecotoxicidade os resultados obtidos para o potencial impacto ambiental devido a produção de soja na região oeste do Paraná foram mais elevados comparados aqueles obtidos por Cavalett e Ortega (2010), Werf, Petit e Sanders (2005), Agri-footprint e Ecoinvent:

- Ecotoxicidade em água com efeito crônico: nesta pesquisa observou-se um potencial impacto de 848 108,2 m<sup>3</sup> de água impactada, enquanto que nos autores em comparação apresentaram resultados na faixa de 45 a 165 m<sup>3</sup> de água impactada;
- Ecotoxicidade em água com efeito agudo: nesta pesquisa observou-se um impacto de 188 794,6 m<sup>3</sup> de água impactada. Para Cavalett e Ortega (2010), Werf, Petit e Sanders (2005), Agri-footprint e Ecoinvent este impacto ficou na faixa de 4 a 24 m<sup>3</sup> de água impactada;
- Ecotoxicidade em solo com efeito crônico: o potencial impacto causado pela produção de soja obtido nesta pesquisa foi de 7 581,51 m<sup>3</sup>, valor superior aqueles obtidos por Cavalett e Ortega (2010), Werf, Petit e Sanders (2005), Agri-footprint e Ecoinvent, que ficou na faixa de 0,1 m<sup>3</sup> até um máximo de 122,57 m<sup>3</sup>.

#### 4.2.3. Avaliação do Potencial Impacto Ambiental pelo Método IMPACT 2002+

Para realizar a avaliação do potencial impacto ambiental, causado pela produção de soja, o método IMPACT 2002+ considera as seguintes categorias de impacto: carcinogênico; não carcinogênico; respiratório – inorgânicos; radiação ionizante; depleção da camada de ozônio; respiratório – orgânicos; ecotoxicidade aquática; ecotoxicidade terrestre; acidificação

terrestre; ocupação do solo; acidificação aquática, eutrofização aquática; aquecimento global; energia não-renovável e extração mineral. Nesta seção serão apresentados os resultados da avaliação do potencial impacto ambiental para as categorias de toxicidade humana e ecotoxicidade (Figura 6). Os demais resultados, referentes as outras categorias de impacto, estão no apêndice 4.



**Figura 6.** Avaliação do impacto da produção de soja calculado pelo método IMPACT 2002+.

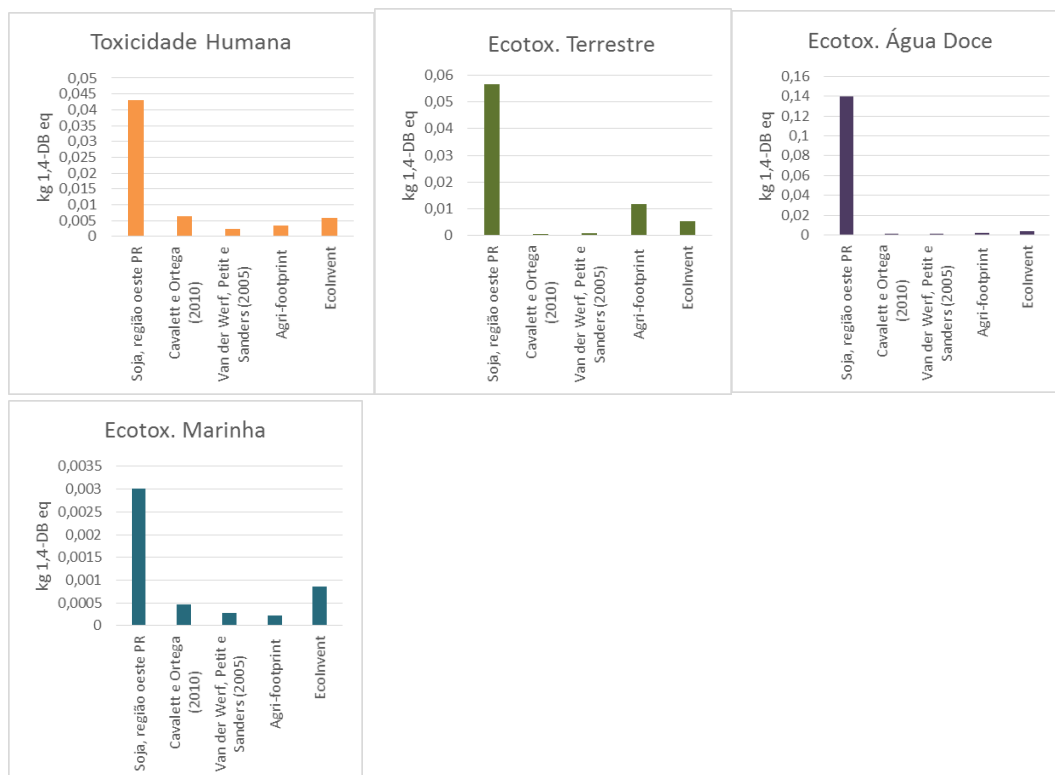
Observa-se na Figura 6, para as categorias de toxicidade humana com efeitos cancerígenos e não cancerígenos que os valores apresentados por Cavalett e Ortega (2010), Werf, Petit e Sanders (2005), Agri-footprint e EcoInvent são próximos entre si, estando na faixa de  $4,75E-04$  e  $2,78E-03$  kg de  $C_2H_3Cl$  para categoria carcinogênico e entre 0,38 e 0,62 kg de  $C_2H_3Cl$  para a categoria não carcinogênico, com exceção ao resultado apresentado pelo ecoInvent, que apresenta um resultado de -0,1 kg de  $C_2H_3Cl$ , ou seja, representa que este sistema apresenta um benefício ambiental dentro desta categoria.

Para as categorias referentes a ecotoxicidade os resultados obtidos nesta pesquisa e aqueles apresentados por Cavalett e Ortega (2010), Werf, Petit e Sanders (2005) e Agri-footprint se encontram entre 1 545,78 e 2 172,43 kg de TEG em água, para ecotoxicidade aquática, e entre 1 087,85 e 1 799,63 kg de TEG em solo, para categoria ecotoxicidade terrestre. Ressalta-se os resultados para estas mesmas categorias apresentados pelo ecoInvent: - 297,73

para ecotoxicidade aquática e – 300,25 para ecotoxicidade terrestre. Estes resultados indicam que o sistema de produção de soja contribui para a melhoria ambiental, ou seja, apresenta um resultado benéfico ao ambiente. Porém deve-se tomar cuidado com este resultado visto a elevada carga de defensivos agrícolas aplicada durante a produção de soja, sendo que muitos dos ingredientes ativos aplicados possuem elevado poder toxicológico.

#### 4.2.4. Avaliação do potencial impacto ambiental pelo método ReCiPe

Para realizar a avaliação do potencial impacto ambiental causado pela produção de soja, o método ReCiPe considera as seguintes categorias de impacto: mudança climática; depleção de ozônio; acidificação terrestre; eutrofização de água doce; eutrofização marinha; toxicidade humana; formação oxidante fotoquímica; formação de material particulado; ecotoxicidade terrestre; ecotoxicidade de água doce; ecotoxicidade marinha; radiação ionizante; ocupação do solo agrícola; ocupação de solo urbano e transformação de solo natural. Nesta seção serão apresentados os resultados da avaliação do potencial impacto ambiental para as categorias de toxicidade humana e ecotoxicidade (Figura 7). Os demais resultados, referentes as outras categorias de impacto, estão no apêndice 5.



**Figura 7.** Avaliação do impacto ambiental da produção de soja calculado pelo método ReCiPe.

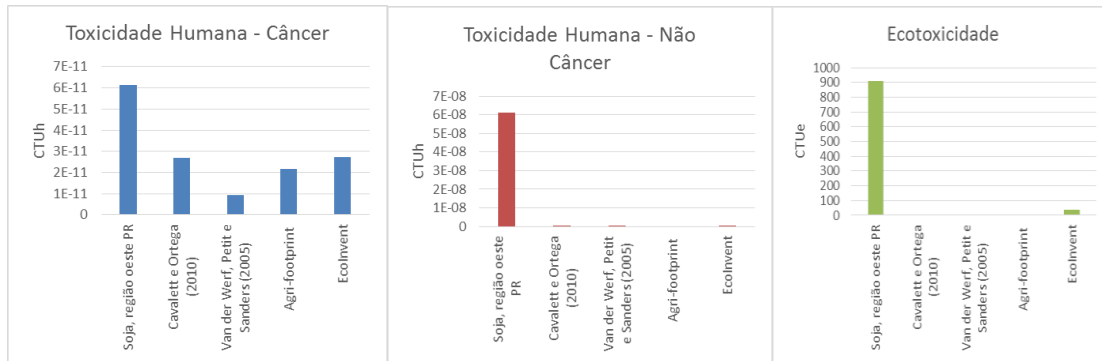


Os resultados apresentados na Figura 7 mostram que os valores obtidos nesta pesquisa para o potencial impacto ambiental causado pela produção de soja são superiores aqueles apresentados pelos autores Cavalett e Ortega (2010), Werf, Petit e Sanders (2005), Agri-footprint e Ecoinvent. Para a categoria de toxicidade humana, o sistema da soja estudado nesta pesquisa apresentou um impacto de 0,04 kg de 1,4-DB eq, enquanto que os referidos autores apresentaram valores de potencial impacto entre 0,002 e 0,006 kg de 1,4-DB eq.

Para a categoria ecotoxicidade terrestre o potencial impacto calculado para a região em foco nesta pesquisa foi 0,06 kg de 1,4-DB eq. Cavalett e Ortega (2010), Werf, Petit e Sanders (2005), Agri-footprint e Ecoinvent apresentaram valores inferiores, variando entre 0,0005 e 0,01 kg de 1,4-DB eq. Para ecotoxicidade em água doce o potencial de impacto calculado nesta pesquisa também apresentou ser maior do que aquele obtido pelos autores já citados: potencial impacto de 0,14 kg de 1,4-DB eq calculado nesta pesquisa e Cavalett e Ortega (2010), Werf, Petit e Sanders (2005), Agri-footprint e Ecoinvent apresentam valores na faixa de 0,0005 e 0,004 kg de 1,4-DB eq. Este padrão se repete para a categoria de ecotoxicidade marinha, com potencial impacto calculado nesta pesquisa de 0,003 kg de 1,4-DB eq., enquanto que os citados autores apresentam valores na faixa de 0,0002 e 0,0008 kg de 1,4-DB eq. Este resultado para ecotoxicidade marinha deve ser interpretado com cautela, visto a região em estudo estar afastada da costa marinha.

#### 4.2.5. Avaliação do Potencial Impacto pelo modelo USEtox

Para realizar a avaliação do potencial impacto ambiental, causado pela produção de soja, o USEtox (com seus fatores de caracterização padrão) considera as seguintes categorias de impacto: toxicidade humana – cancerígeno; toxicidade humana – não cancerígeno; e ecotoxicidade em água doce. Os resultados estão apresentados na Figura 8.



**Figura 8.** Avaliação do impacto causado pela produção de soja calculado pelo USEtox.

Os resultados, apresentados na Figura 8, mostram que para as categorias de impacto consideradas o inventário construído nesta pesquisa apresenta potencial impacto superior àquele calculado com base no inventário proposto pelos outros autores.

Visto as diferenças observadas nos resultados de potencial impacto entre os autores e esta pesquisa, principalmente no que se refere à Toxicidade, as categorias referentes à última serão avaliadas com maior profundidade.

#### 4.3. AVALIAÇÃO DO IMPACTO EM TOXICIDADE HUMANA

Para a categoria de impacto Toxicidade Humana, os modelos empregados para cálculo do potencial impacto apresentaram os resultados constantes na Tabela 13.

**Tabela 13.** Potencial impacto ambiental em Toxicidade Humana.

|  | Unidade                   | Potencial Impacto | Desvio Padrão |
|--|---------------------------|-------------------|---------------|
| <b>Método CML-IA</b>                                 |                           |                   |               |
| <b>Toxicidade Humana</b>                             | kg 1,4-DB eq <sup>1</sup> | 0,740             | 0,04          |
| <b>Método EDIP 2003</b>                              |                           |                   |               |
| <b>Toxicidade Humana</b> – pessoas                   |                           | 48681,22          | 18749,91      |
| <b>Ar</b>  |                           |                   |               |
| <b>Toxicidade Humana</b> – m <sup>3</sup>            |                           | 4,960             | 0,97          |
| <b>Água</b>  |                           |                   |               |
| <b>Método IMPACT 2002+</b>                           |                           |                   |               |
| <b>Toxicidade Humana</b> – kg C2H3Cl eq <sup>2</sup> |                           | 0,002             | 4,59E-06      |
| <b>Carcinogênico</b>                                 |                           |                   |               |
| <b>Toxicidade Humana</b> – kg C2H3Cl eq              |                           | 0,390             | 0,06          |
| <b>não Carcinogênico</b>                             |                           |                   |               |
| <b>Método ReCiPe</b>                                 |                           |                   |               |
| <b>Toxicidade Humana</b>                             | kg 1,4-DB eq <sup>1</sup> | 0,043             | 0,03          |

*Continua.*

Tabela 13. Potencial impacto ambiental em Toxicidade Humana (*continuação*).

| Unidade                                     | Potencial Impacto | Desvio Padrão |
|---|-------------------|---------------|
| <b>Método USEtox</b>                        |                   |               |
| <b>Toxicidade Humana – CTUh<sup>3</sup></b> | 6,14E-11          | 3,36E-11      |
| <b>Toxicidade Humana – CTUh</b>             | 6,12E-8           | 5,86E-08      |

1 – 1,4-diclorobenzeno equivalente; 2 – cloreto de vanila; 3 – unidade tóxica comparativa.

Os resultados, apresentados na Tabela 13, demonstram a dificuldade de se comparar o potencial impacto em toxicidade humana gerado pelos diferentes modelos considerados. Somente o CML-IA e o ReCiPe apresentaram unidades semelhantes, porém a diferença entre os resultados é expressiva: 0,74 e 0,043 kg de 1,4-DB eq. respectivamente.

O método EDIP 2003 subdivide a categoria Toxicidade Humana em Toxicidade Humana Ar e Água. Significa dizer - as pessoas podem ser expostas às substâncias por estas duas rotas. O potencial impacto para o sistema agrícola produção de soja, calculado pelo EDIP 2003, aponta um número bastante grande (aproximadamente 48.682 pessoas) de pessoas passíveis de ser intoxicadas devido às atividades do plantio de soja. O referido método considera que o impacto via água é de 4,96 m<sup>3</sup> de água atingida.

O método IMPACT 2002+, assim como o USEtox, subdividem a categoria Toxicidade humana em efeitos Carcinogênicos e não Carcinogênicos. O IMPACT 2002+ indica que a produção de soja apresenta maiores impactos, com efeitos não carcinogênicos (0,39 kg C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>Cl eq), do que aqueles carcinogênicos (0,002 C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>Cl eq). Já o modelo USEtox apresenta valores de potencial impacto na ordem de grandeza 10<sup>-11</sup> para efeitos carcinogênicos e de 10<sup>-8</sup> para efeitos não carcinogênicos.

No apêndice 7 é apresentado uma tabela com todos os defensivos agrícolas, um total de 23 substâncias, aplicados durante a produção de soja e os fatores de caracterização dessas substâncias considerados pelos métodos. Como foi observado, a base de dados dos métodos não possui fatores de caracterização para todas as substâncias, como se segue:

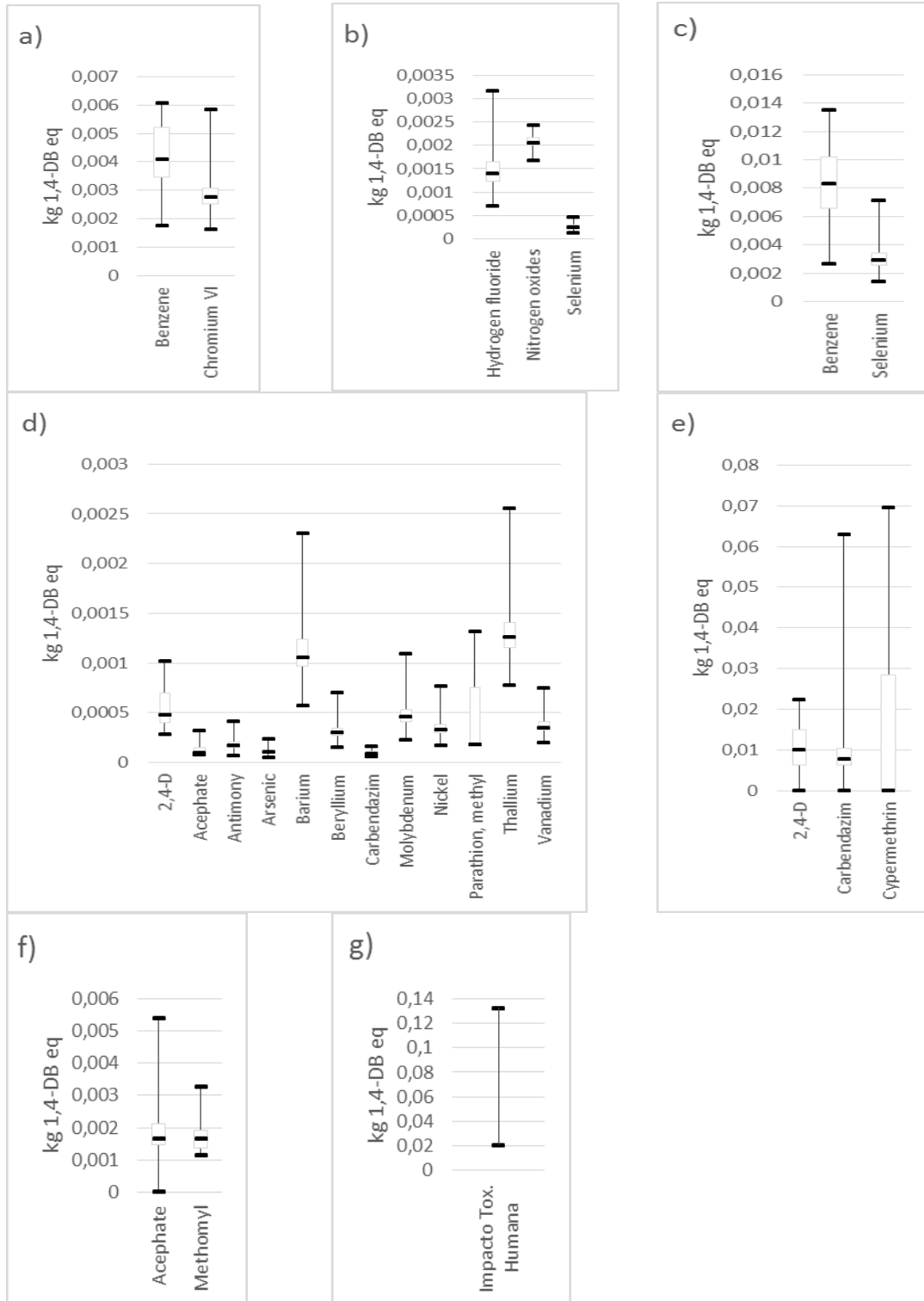
- o método CML-IA apresenta fatores de caracterização para 8 substâncias;
- o EDIP 2003 apresenta fatores de caracterização para somente 3 substâncias;
- o IMPACT 2002+, para a categoria Carcinogênico, apresenta fatores para somente 1 substância. Já para a categoria Não-Carcinogênico estão disponíveis fatores para 10 substâncias;

- o ReCiPe é o método que apresenta a maior quantidade de fatores disponíveis, um total de 13;
- o USEtox apresenta fator de caracterização para somente uma substância.

Além de conhecer os valores dos potenciais impactos ambientais, que a produção de soja causa na categoria de Toxicidade Humana, faz-se importante o conhecimento sobre quais as principais substâncias que os diferentes métodos estão considerando como contribuintes para esses impactos.

#### 4.3.1. Método CML-IA

O método CML-IA indica que o potencial impacto ambiental em Toxicidade Humana ocorre via compartimentos: ar; água e solo. Os referidos compartimentos apresentam as seguintes contribuições para o impacto total nesta categoria: 14,34%; 22,01%; e 62,48% respectivamente. A Figura 9, apresenta as principais substâncias promotoras do potencial impacto ambiental, indicadas pelo CML-IA, assim como a variação do impacto entre as 14 fazendas amostradas.



**Figura 9.** Variação do impacto ambiental nas fazendas amostradas e principais substâncias promotoras na categoria Toxicidade Humana via compartimentos: a) b) ar; c) d) água; e) f) solo. g) impacto máximo e mínimo entre as fazendas.

O potencial impacto ambiental, entre as fazendas, apresenta uma grande variação (Figura 9g), ou seja, enquanto uma fazenda apresenta um impacto mínimo de 0,02 kg 1,4-DB equivalente, outra fazenda, na mesma área considerada, apresenta potencial impacto seis vezes maior, chegando a 0,13 kg 1,4-DB equivalente.

Na Figura 9 *a e b*, observa-se que o método não aponta defensivos como contribuintes para o impacto via ar. Aponta o benzeno como principal substância contribuinte para o impacto. A Figura 9 *c e d*, revela que, para o compartimento água, os seguintes defensivos são responsáveis pelo impacto: 2,4-D (0,00049 kg de 1,4-DB eq); Acefato (0,0001 kg de 1,4-DB eq); Carbendazim (8,57E-05 kg de 1,4-DB eq); Parationa metílica (0,00018 kg de 1,4-DB eq). No entanto a substância com maior participação no impacto no compartimento água é o benzeno.

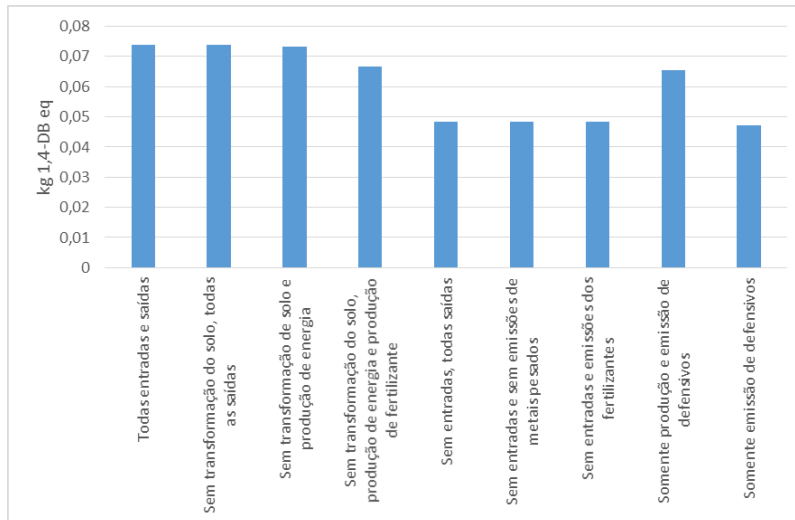
No compartimento solo, (Figura 9 *e e f*) também observa-se a presença de defensivos agrícolas responsáveis pelo o impacto, sendo eles: 2,4-D (0,0108 kg de 1,4-DB eq); carbendazim (0,00787 kg de 1,4-DB eq); cipermetrina (0,0247 kg de 1,4-DB eq); e metomil (0,00115 kg de 1,4-DB eq).

Na Figura 9 *e*, observa-se que as substâncias cipermetrina, carbendazim e 2,4-D são aquelas que apresentam maior variação do impacto ambiental na categoria toxicidade humana. Dessas substâncias, a cipermetrina corresponde a 33,39% do impacto ambiental total, na categoria Toxicidade Humana e, apresenta a maior variação entre as fazendas. Em seguida, observa-se o carbendazim, também com grande variação entre as fazendas, e com representação de 10,64% do impacto total. O 2,4-D não apresenta a ampla variação das substâncias retro citadas, porém, sua parcela no impacto total são significativos 14,6%.

Os agrotóxicos acefato, parationa metílica e metomil também são apontados pelo método CML-IA como colaboradores para o impacto ambiental em Toxicidade Humana, mas em menor parcela e não apresentam grande amplitude de variação quando comparados à cipermetrina, carbendazim e 2,4-D.

Com base nos resultados obtidos pelo CML-IA, observa-se que 63,64% do potencial impacto na categoria Toxicidade Humana ocorre devido aos defensivos agrícolas aplicados no plantio de soja, ou seja, mais da metade do impacto não tem origem no uso de fertilizantes, queima de diesel, ou dos processos de anteriores (processos de *background*), e sim, pelo uso intensivo de produtos altamente tóxicos.

A Figura 10, apresenta a simulação do potencial impacto ambiental, na categoria toxicidade humana, para avaliar a contribuição no impacto total de processos como produção e emissão de fertilizantes, transformação do solo, produção de energia, entre outros processos pertencentes, direta ou indiretamente, ao sistema Produção de Soja.



**Figura 10.** Cenários do sistema agrícola produção de soja com variações em suas entradas e saídas - método CML-IA; categoria de impacto Toxicidade Humana.

Os resultados apresentados, na Figura 10, apontam que:

- os processos de transformação do solo e produção de energia não estão contribuindo com o impacto calculado pelo CML-IA;
- a produção de fertilizantes responde por 9,89% do impacto total;
- a emissão de metais pesados não contribui com o impacto;
- a produção dos defensivos e suas emissões são os maiores responsáveis pelo impacto total do sistema, representando 88,52% de todo o impacto em Toxicidade Humana.

Vale ressaltar que este método considera somente as seguintes substâncias para calcular o potencial impacto na categoria:

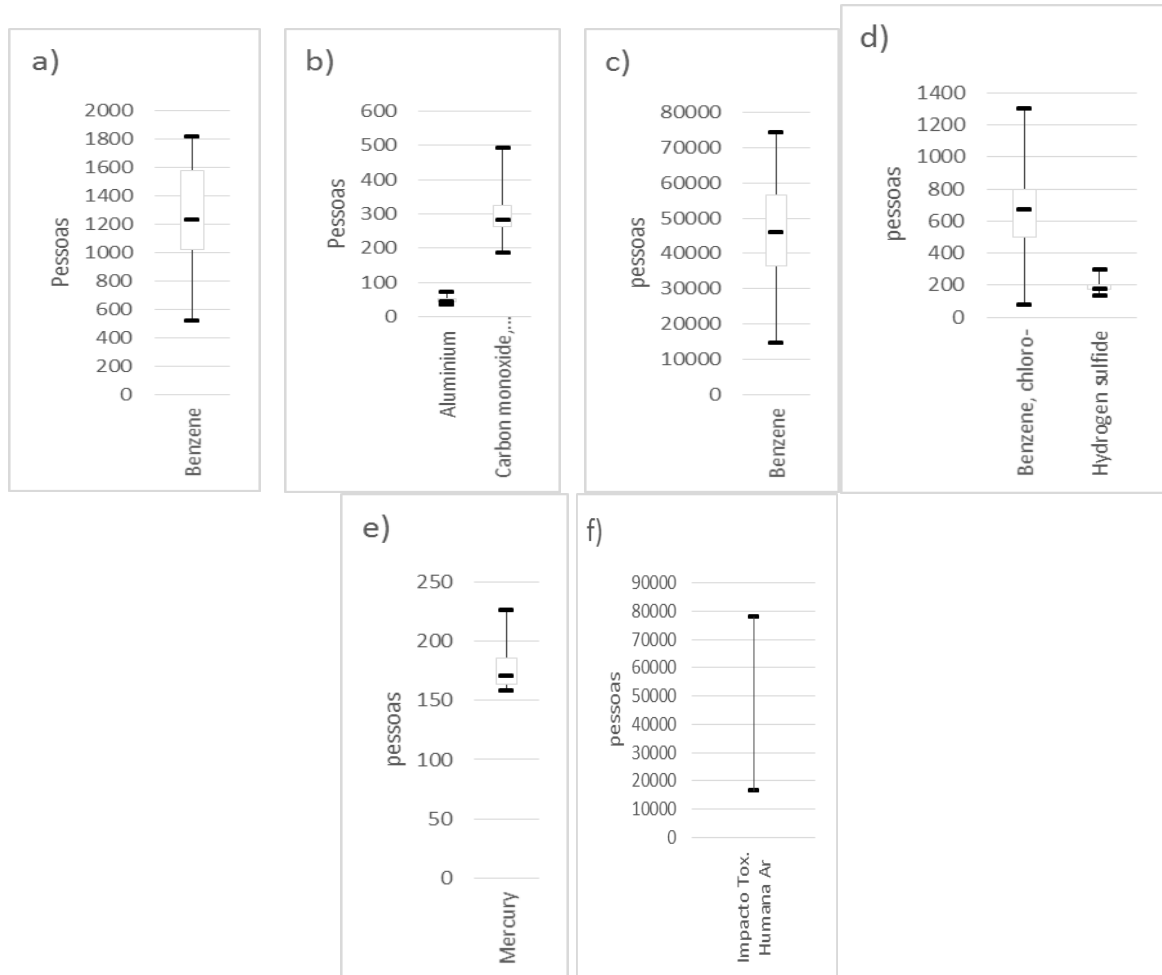
- |                 |                       |
|-----------------|-----------------------|
| • carbendazim;  | • acefato;            |
| • tiram;        | • parationa metílica; |
| • cipermetrina; | • 2,4-D;              |
| • metomil;      | • glifosato.          |

Não foram consideradas 15 diferentes defensivos agrícolas nesta estimativa do potencial impacto, o que poderia causar alterações neste resultado.

#### 4.3.2. Método EDIP 2003

O método EDIP 2003 apresenta impactos em Toxicidade Humana subdivididos em três categorias: Toxicidade Humana Ar; Toxicidade Humana Água e Toxicidade Humana Solo.

O impacto, na categoria Toxicidade Humana Ar, ocorre via compartimentos: ar; água e solo. Os compartimentos citados representam 3,21%, 96,11% e 0,35% do impacto total, respectivamente. A Figura 11 apresenta as principais substâncias apontadas pelo EDIP 2003 como principais contribuintes para o potencial impacto em Toxicidade Humana Ar, e também a variação desse impacto entre as fazendas avaliadas.



**Figura 11.** Variação do potencial impacto ambiental, entre as fazendas e principais substâncias promotoras, na categoria Toxicidade Humana – Ar via compartimentos: a) b) ar; c) d) água; e) solo. f) impacto máximo e mínimo entre as fazendas.

Para a categoria Toxicidade Humana – Ar o potencial impacto ambiental entre as fazendas apresenta uma amplitude de variação de aproximadamente 61.606 pessoas (Figura 11 f): há fazenda que apresenta um potencial impacto de 16.354 pessoas, enquanto outra um potencial impacto de 77.960 pessoas. Tal fato demonstra a grande variação do potencial impacto, entre as fazendas selecionadas, para a construção do inventário da produção de soja.

Os resultados de impacto calculado pelo EDIP 2003 (Figura 11) não apresentam nenhum defensivo agrícola como responsável pelo impacto. Esse resultado aponta o benzeno



(Figura 11 *c*) como a substância com contribuição mais significativa: um impacto potencial a aproximadamente 45.927 pessoas oriundo das atividades do sistema agrícola produção de soja.

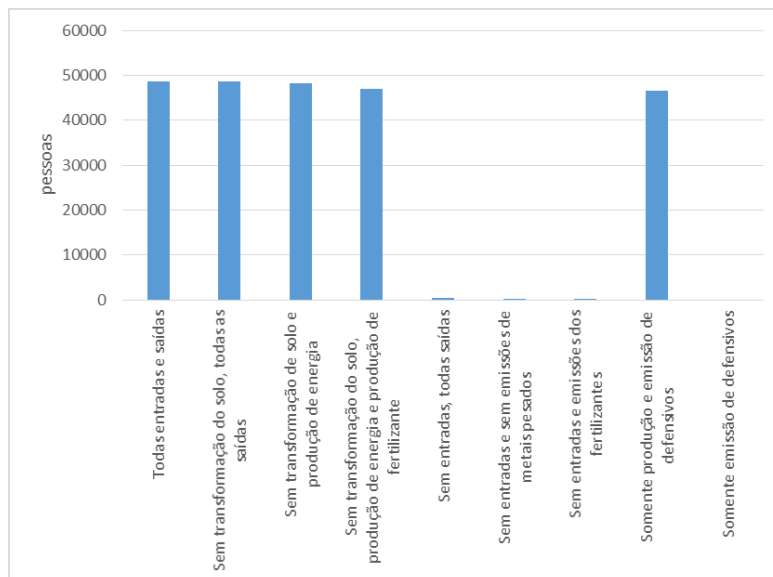
Na Figura 11, observa-se o benzeno como substância que apresenta maior variação, via compartimento água (Figura 11 *c*), com amplitude de variação de 59.443,27 pessoas. A substância em questão corresponde, majoritariamente, ao impacto na categoria Toxicidade Humana – Ar, correspondendo a 94,34% do impacto total.

As seguintes substâncias também apresentam grande variação no impacto entre as fazendas, alerte-se todavia, em parcela menor de impacto na categoria:

- o benzeno, via compartimento ar (Figura 11 *a*), apresenta amplitude de variação de 1295,69 pessoas e representa 2,53% do impacto;
- o cloro-benzeno, via compartimento água (Figura 11 *d*), tem amplitude de variação de 1228,05 pessoas e representa 1,39% do impacto.

Para a categoria Toxicidade Humana Ar, o método EDIP 2003 não considera nenhum impacto oriundo de emissões de defensivos agrícolas.

A Figura 12 apresenta a simulação do potencial impacto ambiental na categoria toxicidade humana - ar para avaliar a contribuição no impacto total de processos como produção e emissão de fertilizantes, transformação do solo, produção de energia, entre outros processos pertencentes, direta ou indiretamente, ao sistema Produção de Soja.



**Figura 12.** Cenários do sistema agrícola produção de soja com variações em suas entradas e saídas - método EDIP 2003; categoria de impacto Toxicidade Humana - Ar.

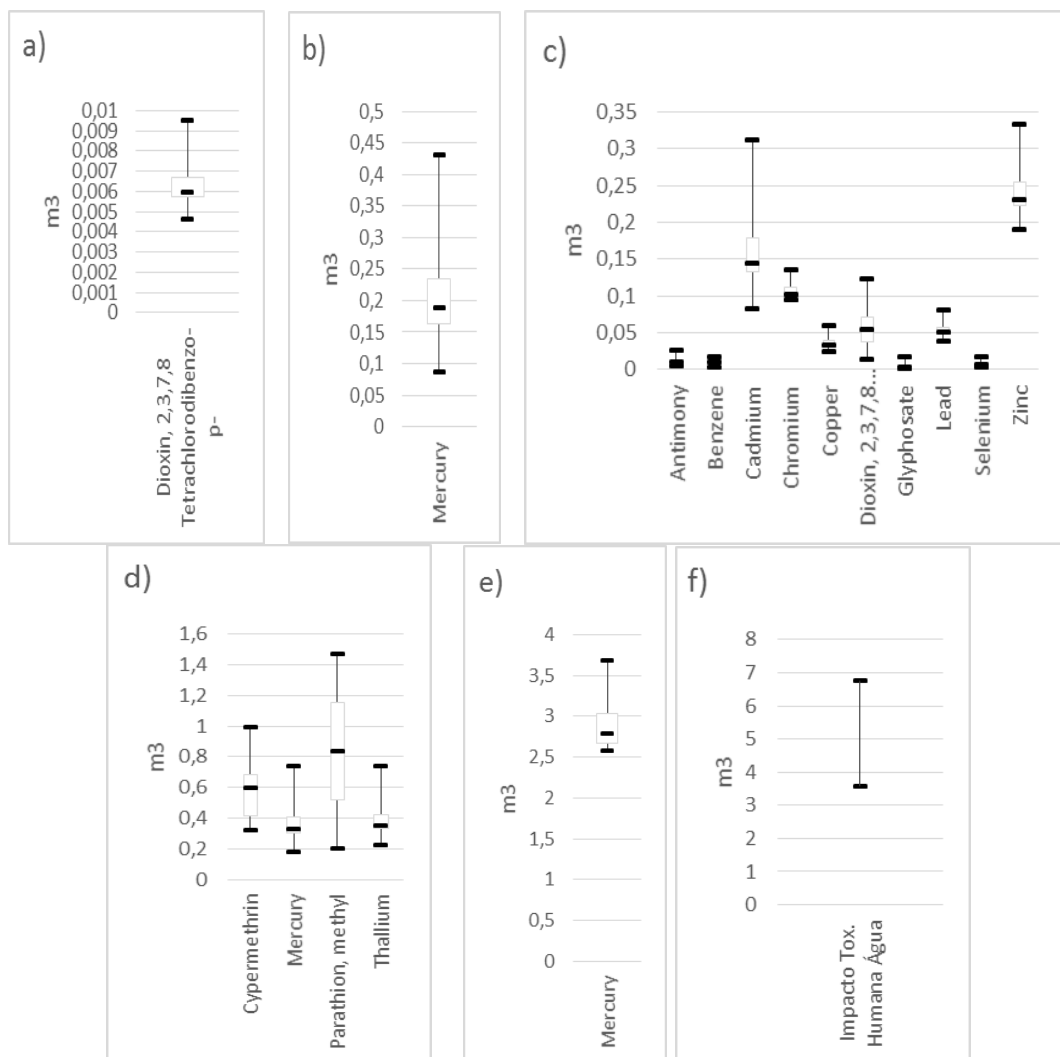
Os resultados apresentados na Figura 12 indicam que:

- os processos de transformação do solo e produção de energia não contribuem para o impacto total;

- as emissões geradas pelo sistema agrícola respondem apenas por 0,69% do impacto total;
- o processo com maior contribuição ao impacto é o processo de produção dos defensivos, respondendo a 95,75% do potencial impacto.

As emissões de defensivos calculadas por este método apresentaram valores baixos visto que este método considera somente a cipermetrina e o glifosato para calcular o potencial impacto nesta categoria.

O impacto, na categoria Toxicidade Humana Água ocorre, via compartimentos: ar, água e solo. Esses compartimentos representam 3,92%, 39,21% e 56,53% do impacto total, respectivamente. A Figura 13 apresenta as principais substâncias apontadas pelo método como responsáveis pelo potencial impacto ambiental, assim como sua variação, entre as fazendas avaliadas.



**Figura 13.** Variação do impacto ambiental na categoria Toxicidade Humana – Água via compartimentos: a) b) ar; c) d) água; e) solo. f) impacto máximo e mínimo entre as fazendas.

O potencial impacto ambiental na categoria Toxicidade Humana – Água apresenta uma variação entre as fazendas de 1,88 vezes, ou seja, varia de um potencial impacto mínimo de 3,58 m<sup>3</sup> até 6,75 m<sup>3</sup>.

De acordo com a Figura 13 e o mercúrio, atingindo a água via compartimento solo, é o maior impactante, com valor médio de 2,8 m<sup>3</sup> de água intoxicada, com representação de 56,53% do impacto total.

Os defensivos apontados pelo método como contribuintes para o impacto são:

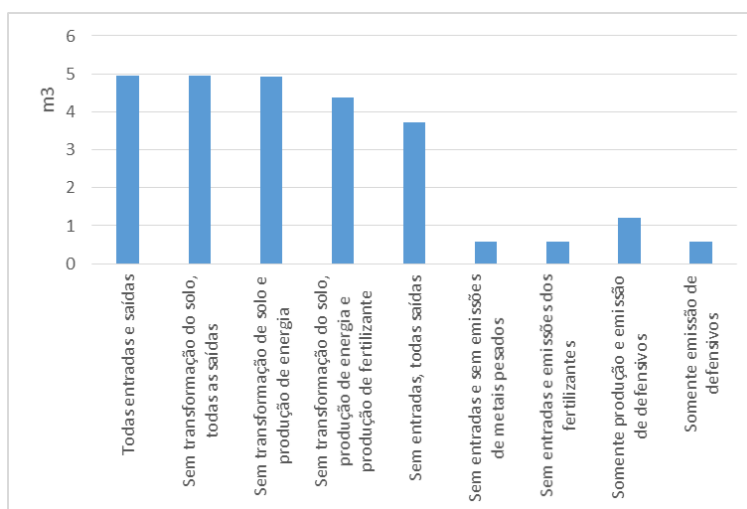
- cipermetrina – com impacto de 0,36 m<sup>3</sup> de água;
- parationa metílica – com impacto de 0,20 m<sup>3</sup> de água;
- glifosato – com impacto de 0,004 m<sup>3</sup> de água.

Em relação à variação do potencial impacto ambiental entre as fazendas (Figura 13), os defensivos que apresentam maior variação são:

- parationa metílica, via compartimento água, com amplitude de variação de 0,56 m<sup>3</sup>;
- cipermetrina, via compartimento água, com amplitude de variação de 0,67 m<sup>3</sup>;

O EDIP 2003, para Toxicidade Humana Água, considera que a grande parte do impacto não ocorre devido ao uso de defensivos. Este último representa 11,49% do impacto total nesta categoria.

A Figura 14 apresenta a simulação do potencial impacto ambiental na categoria toxicidade humana - água para avaliar a contribuição no impacto total de processos como produção e emissão de fertilizantes, transformação do solo, produção de energia, entre outros processos pertencentes, direta ou indiretamente, ao sistema Produção de Soja.



**Figura 14.** Cenários do sistema agrícola produção de soja com variações em suas entradas e saídas – método EDIP 2003; categoria de impacto Toxicidade Humana – Água.

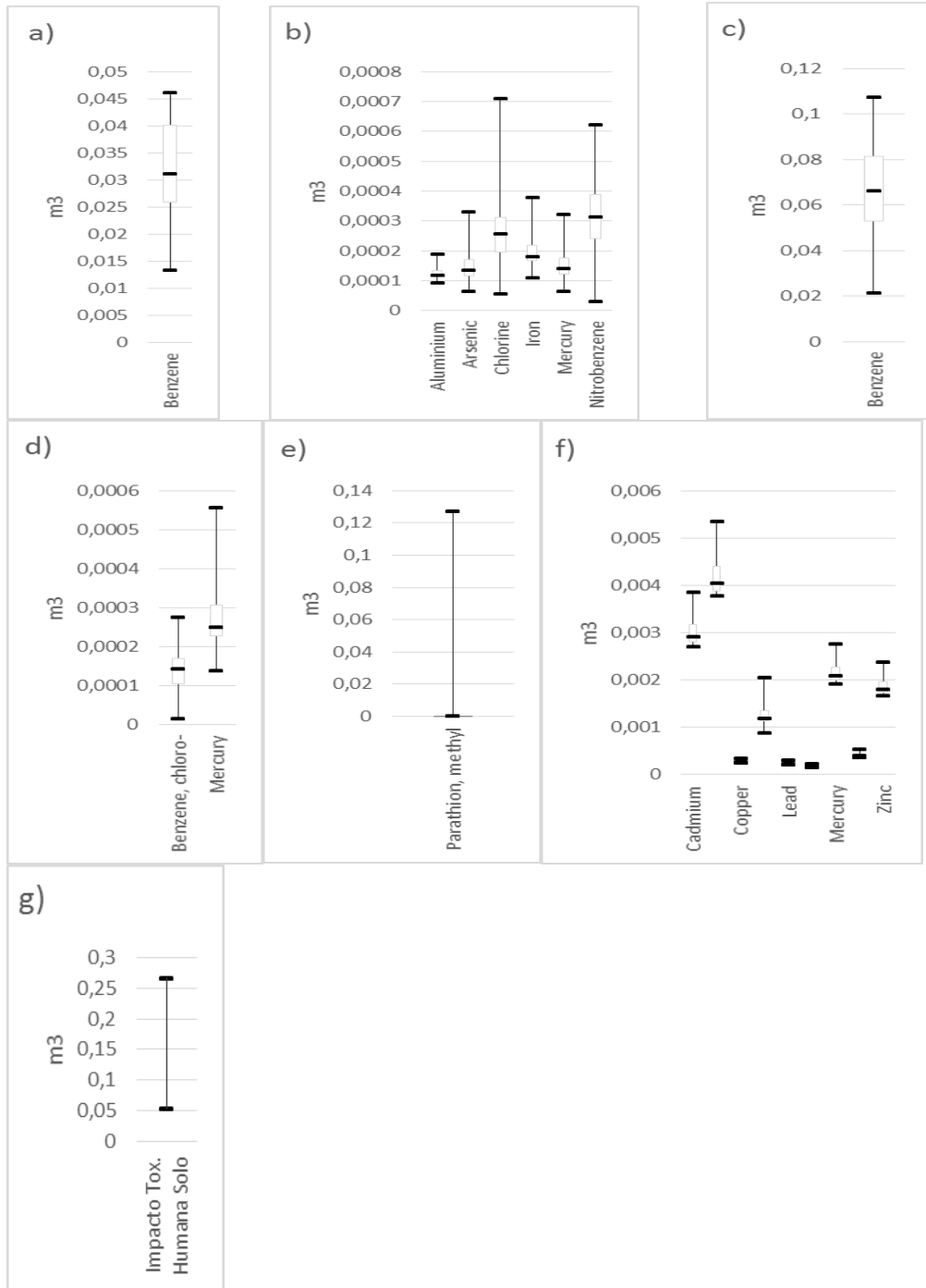
Os resultados apontados, na Figura 14, apresentam as seguintes situações:

- os processos de transformação do solo e produção de energia não contribuem ao potencial impacto;
- a produção de fertilizantes responde por 11,57% do potencial impacto;
- a emissão de metais pesados revela-se como a maior contribuinte ao potencial impacto com uma parcela de 63,83%;
- a produção e emissão de defensivos agrícolas representa 24,61% do potencial impacto total, sendo que a emissão dos defensivos responde por apenas 11,49%.

Nesta categoria (Toxicidade Humana - água) o método considera somente a parationa metílica e o glifosato para calcular o potencial impacto. Para todas as outras substâncias não há fatores de caracterização disponíveis. Caso esta base de dados fosse aprimorada, abrangendo todas as substâncias aplicadas no sistema, possivelmente o resultado seria diferente.

O impacto na categoria Toxicidade Humana Solo ocorre via compartimentos ar, água e solo. A representação de cada um dos compartimentos no impacto total é: 24,40%; 50,29%; e 24,83% respectivamente.

A Figura 15 apresenta as principais substâncias que contribuem para o potencial impacto e também sua variação entre as 14 fazendas amostradas.



**Figura 15.** Variação do impacto ambiental na categoria de Toxicidade Humana – Solo via compartimentos: a) b) ar; c) d) água; e) f) solo. g) impacto máximo e mínimo entre as fazendas.

O potencial impacto ambiental, entre as fazendas, apresenta uma grande variação (Figura 15g): há fazenda que apresenta impacto mínimo de  $0,05 \text{ m}^3$ , e fazenda, na mesma área considerada, com potencial impacto cinco vezes maior -  $0,26 \text{ m}^3$ .

Os resultados da avaliação do impacto apontam o benzeno (Figura 15 c) como o principal contribuinte, com impacto médio de  $0,066 \text{ m}^3$  de água intoxicada.

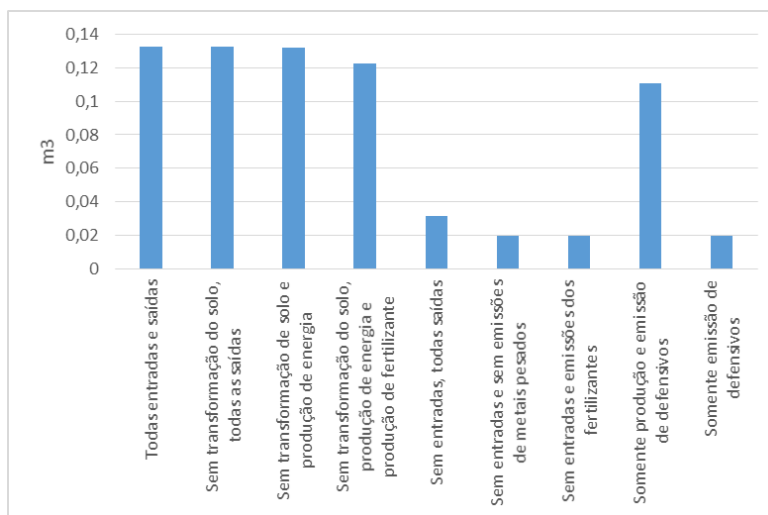
Esse método aponta somente um defensivo como contribuinte ao potencial impacto na categoria Toxicidade Humana Solo: a parationa metílica com impacto de 0,019 m<sup>3</sup> de solo (Figura 15 e).

Na Figura 15, observa-se que as maiores variações do potencial impacto ocorrem em substâncias emitidas via compartimentos água e solo.

Via compartimento solo, a substância que apresenta maior variação é a parationa metílica, com amplitude de variação de 0,127 m<sup>3</sup>. Esta substância, sozinha, corresponde a 14,88% do impacto total nessa categoria. Tendo em vista que, dentre os defensivos aplicados, somente a parationa metílica foi considerada impactante em Toxicidade Humana Solo, sua parcela de contribuição corresponde à porcentagem de participação dos defensivos no impacto desta categoria, ou seja, o defensivo agrícola responde por 14,88% do impacto total em Toxicidade Humana Solo.

Via compartimento água a substância com maior impacto corresponde ao benzeno, respondendo por 49,99% do impacto total. A amplitude de variação do impacto gerado por essa substância é de 0,086 m<sup>3</sup> de água intoxicada.

A Figura 16 apresenta a simulação do potencial impacto ambiental na categoria Toxicidade Humana – Solo com intuito de avaliar a contribuição no impacto total de processos como produção e emissão de fertilizantes, transformação do solo, produção de energia, entre outros processos pertencentes direta ou indiretamente ao sistema Produção de Soja.



**Figura 16.** Cenários do sistema agrícola produção de soja com variações em suas entradas e saídas - método EDIP 2003; categoria de impacto Toxicidade Humana – Solo.

Os resultados apresentados na Figura 16 apontam que:

- os processos de transformação do solo e produção de energia não contribuem com potencial impacto;

- o processo que contribui majoritariamente ao impacto corresponde à produção dos defensivos, com representação de 68,6% do potencial impacto;
- o potencial impacto em relação às saídas do sistema decorre das emissões de defensivos agrícolas, com parcela de 14,89% do potencial impacto total.

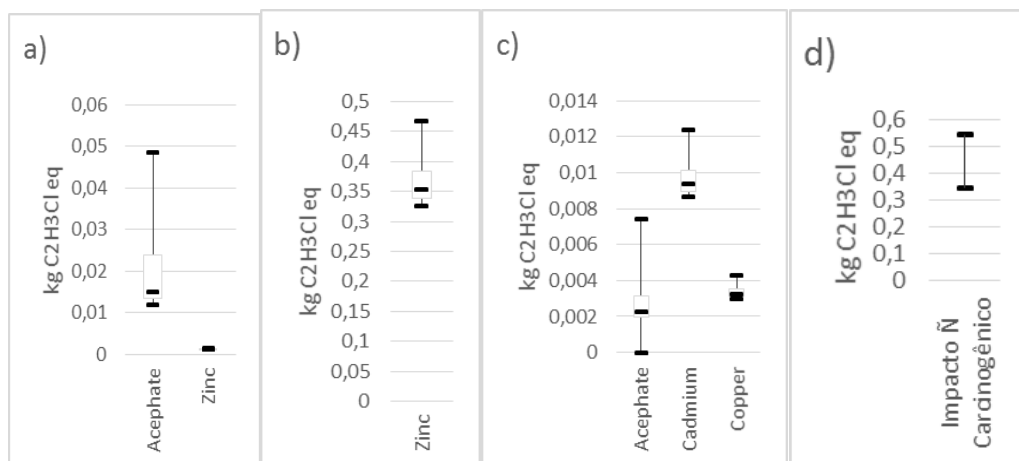
Nesta categoria o método apresenta fatores de caracterização somente para 3 substâncias: cipermetrina, parationa metílica e glifosato. Isto pode ser o motivo pelo qual as emissões de defensivos agrícolas apresentaram valores inferiores aos da produção dos mesmos.

#### 4.3.3. Método IMPACT 2002+

O método IMPACT 2002+ apresenta os potenciais impactos ambientais em Toxicidade Humana, divididos em duas subcategorias: Não Carcinogênico e Carcinogênico.

O potencial impacto na subcategoria Não Carcinogênico ocorre via compartimentos água e solo. Esses compartimentos correspondem a 4,25% e 95,25% do total do potencial impacto, respectivamente.

A Figura 17 apresenta as principais substâncias promotoras do impacto na subcategoria Não Carcinogênico, assim como sua variação entre as 14 fazendas amostradas.



**Figura 17.** Variação do impacto ambiental na categoria Não Carcinogênico entre as diversas fazendas amostradas via compartimentos: a) água; b) solo. d) impacto máximo e mínimo entre as fazendas.

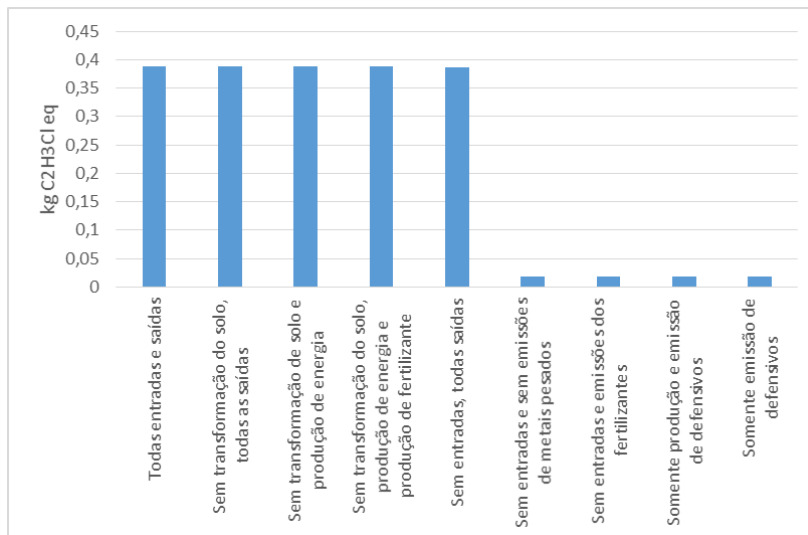
O potencial impacto ambiental entre as fazendas na categoria de impacto Não Carcinogênico apresentou uma variação de 0,19 kg C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>Cl eq. (Figura 17d): fazenda com impacto mínimo de 0,35 kg C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>Cl eq, até fazenda com impacto de 0,54 kg C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>Cl eq.

De acordo com a Figura 17, o único defensivo agrícola que contribui para o impacto na categoria Não Carcinogênico vem a ser o Acefato, com impacto de 0,015 kg C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>Cl equivalente, via compartimento água e 0,002 kg C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>Cl equivalente, via compartimento solo. A substância com maior impacto corresponde ao zinco, com 0,355 kg C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>Cl equivalente, via compartimento solo.

Na Figura 17, observa-se que a amplitude de variação do potencial impacto ambiental não é significativa. O zinco, via compartimento solo por exemplo, substância com maior impacto na subcategoria (representa 91,39% do impacto total), apresenta amplitude de variação de 0,14 kg C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>Cl equivalente. O acefato responde por 3,97% do impacto total na subcategoria e apresenta uma amplitude de variação de 0,037 kg C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>Cl equivalente.

O método IMPACT 2002+ considera que uma pequena parcela do impacto em toxicidade humana com efeitos não carcinogênicos, 4,57%, ocorre devido ao uso de fertilizantes.

A Figura 18 apresenta a simulação do potencial impacto ambiental na categoria Não Carcinogênico para avaliar a contribuição no impacto total de processos como produção e emissão de fertilizantes, transformação do solo, produção de energia, entre outros processos pertencentes, direta ou indiretamente, ao sistema Produção de Soja.



**Figura 18.** Cenários do sistema agrícola de produção de soja, com variações em suas entradas e saídas - método IMPACT 2002+; categoria de impacto Não Carcinogênico.

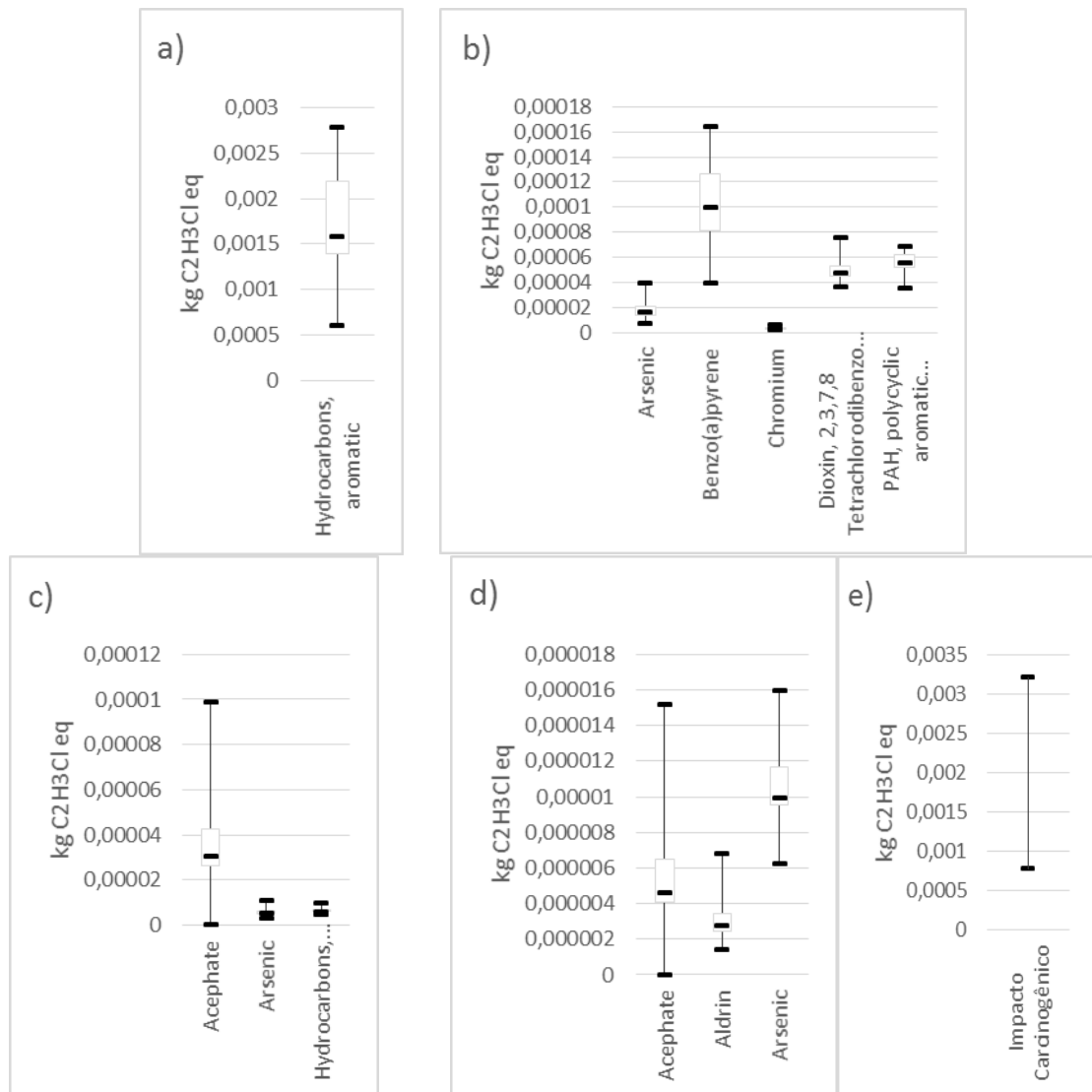
De acordo com a Figura 18, o potencial impacto decorre da emissão de metais pesados contidos nos fertilizantes inorgânicos. Essas emissões representam 95,04% do potencial impacto total. A emissão de defensivos agrícolas apresenta contribuição mínima de 4,76% do potencial impacto.



Para esta categoria o método considera um total de 10 defensivos agrícolas. No entanto, em sua grande maioria, o valor do fator de caracterização para cada substância é baixo.

O potencial impacto ambiental na categoria Carcinogênico ocorre via os compartimentos ar, água e solo. Os compartimentos citados representam 96,56%, 2,25% e 0,92% do impacto total na categoria.

A Figura 19 apresenta as principais substâncias promotoras do potencial impacto, assim como, sua variação entre as fazendas amostradas na categoria de impacto Carcinogênico.



**Figura 19.** Variação do impacto ambiental, nas fazendas amostradas, na categoria de impacto Carcinogênico via compartimento: a) b) ar; c) água; d) solo. e) impacto máximo e mínimo entre as fazendas.

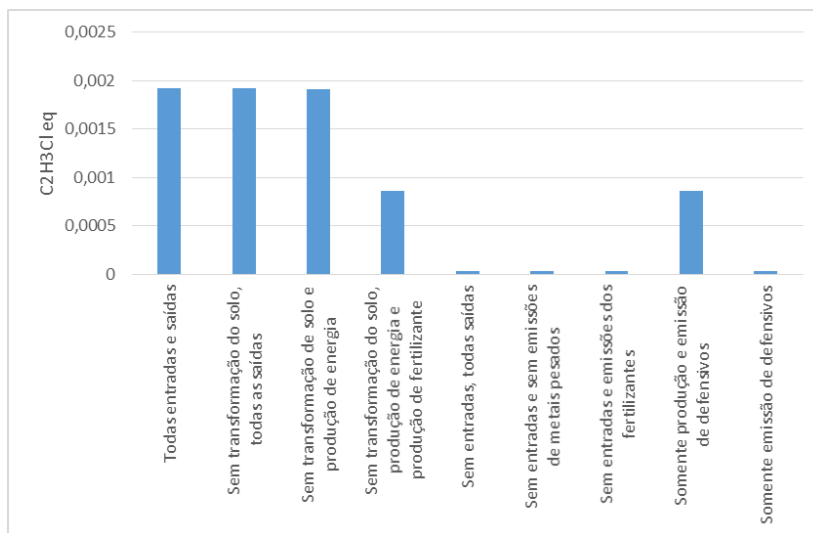
Para a categoria Carcinogênico, o potencial impacto ambiental, entre as fazendas, apresenta uma amplitude de variação de 0,002 kg C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>Cl equivalente (Figura 19 e): há fazenda que apresenta um potencial impacto de 0,0007 kg C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>Cl equivalente, enquanto outra apresenta um potencial impacto de 0,003 kg C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>Cl equivalente.

A avaliação do impacto, para efeitos carcinogênicos, não resultou em um impacto elevado. O método indica a contribuição do defensivo acefato como contribuinte para o efeito carcinogênico em uma quantidade de  $3,14E-05$ , via compartimento água e,  $4,79E-06$  via compartimento solo. As substâncias que apresentaram maior impacto (Figura 19 a) foram os hidrocarbonetos aromáticos, com  $0,0016$  kg  $C_2H_3Cl$  equivalente.

Tendo em vista que o impacto calculado pelo método apresentou baixo valor, a amplitude de variação do impacto entre as fazendas foi inexpressiva. Os hidrocarbonetos aromáticos, com parcela de 84,76% do impacto total, apresentaram amplitude de variação de  $0,0022$  kg  $C_2H_3Cl$  equivalente. O acefato, via compartimento água, representa uma parcela de 1,63% do impacto, com amplitude de  $9,91E-05$  kg  $C_2H_3Cl$  equivalente, e via compartimento solo, parcela de 0,25% do impacto, com amplitude de  $1,52E-05$  kg  $C_2H_3Cl$  equivalente.

Para a categoria Carcinogênico, o defensivo considerado impactante corresponde ao acefato, e sua contribuição ao impacto total é de somente 1,88%.

A Figura 20 apresenta a simulação do potencial impacto ambiental, na categoria Carcinogênico, com o objetivo de avaliar a contribuição no impacto total de processos como - produção e emissão de fertilizantes, transformação do solo, produção de energia, entre outros processos pertencentes direta ou indiretamente ao sistema Produção de Soja.



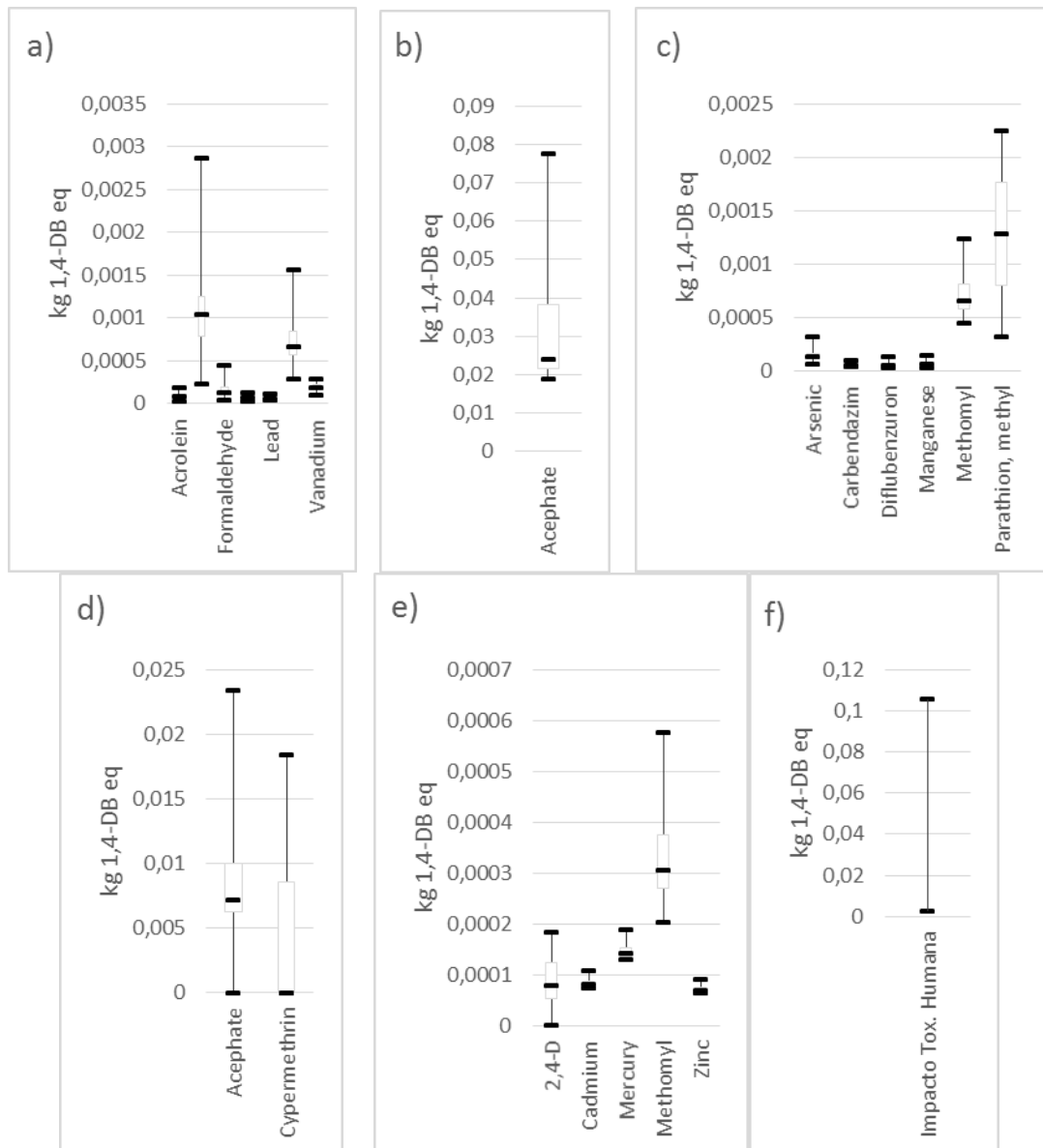
**Figura 20.** Cenários do sistema agrícola, produção de soja com variações em suas entradas e saídas - método IMPACT 2002+; categoria de impacto Carcinogênico.

De acordo com a Figura 20, os processos que mais contribuem com o potencial impacto são: o processo de produção de fertilizantes, com parcela de 54,60% do impacto; e o processo de produção dos defensivos, com parcela de 42,76% do impacto.

Note que somente uma substância foi considerada nas emissões de defensivos agrícolas. Se uma quantidade maior destas fosse considerada, possivelmente o resultado seria diferente.

#### 4.3.4. Método ReCiPe

O método ReCiPe apresenta potencial impacto ambiental em Toxicidade Humana via compartimentos ar, água e solo. A representação de cada compartimento no impacto total na categoria corresponde a: 5,24%; 59,69%; e 33,88% respectivamente. A Figura 21 apresenta as principais substâncias promotoras do potencial impacto ambiental, indicados pelo ReCiPe, assim como a variação do impacto entre as fazendas avaliadas.



**Figura 21.** Variação do impacto ambiental nas fazendas avaliadas e principais substâncias promotoras do impacto na categoria Toxicidade Humana, via compartimentos: a) ar; b) c) água; d) e) solo. f) impacto máximo e mínimo entre as fazendas.

Para a categoria de impacto Toxicidade Humana, o potencial impacto calculado para cada fazenda apresentou grande variação entre estas, chegando a fazendas apresentarem um impacto 39 vezes maior entre elas. O referido impacto entre as fazendas variou de 0,002 kg 1-4DB equivalente até 0,11 kg 1-4DB equivalente.

Na Figura 21 *b* e *c* observa-se que, via compartimento água, que representa maior potencial de impacto, os defensivos agrícolas contribuem para tanto, sendo expressiva, segundo o método, a presença de: acefato, com representação de 57,27% do impacto total; carbendazim; diflubenzuron; metomil; e parationa metílica.

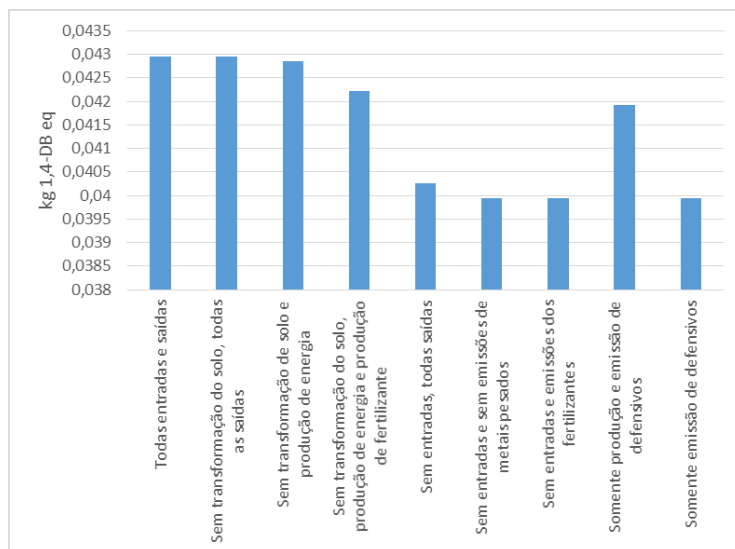
Via compartimento solo, o método indica os seguintes defensivos como contribuintes para o impacto: acefato, com contribuição de 17,25% do impacto total; cipermetrina, com representação de 15,27% do impacto total; 2,4-D; e metomil.

Em relação à variação do potencial impacto ambiental entre as fazendas avaliadas, na Figura 21, observa-se que as maiores variações ocorrem nos seguintes defensivos agrícolas:

- acefato, via compartimento água, com amplitude de variação de 0,059 kg 1-4DB equivalente;
- acefato, via compartimento solo, com amplitude de variação de 0,023 kg 1-4DB equivalente;
- cipermetrina, via compartimento solo, com amplitude de variação de 0,019 kg 1-4DB equivalente.

Com base nos resultados obtidos pelo ReCiPe, observa-se que 92,45% do potencial impacto na categoria Toxicidade Humana ocorre devido aos defensivos agrícolas aplicados no plantio de soja, ou seja, quase todo o impacto não é causado pelo uso de fertilizantes, queima de diesel, ou dos processos de anteriores (processos de *background*), e sim pelo uso intensivo de produtos altamente tóxicos.

A Figura 22 apresenta simulação do potencial impacto ambiental na categoria Toxicidade Humana com o objetivo de avaliar a contribuição no impacto total de processos, como produção e emissão de fertilizantes, transformação do solo, produção de energia, entre outros processos pertencentes, direta ou indiretamente ao sistema Produção de Soja.



**Figura 22.** Cenários do sistema agrícola produção de soja com variações em suas entradas e saídas – método ReCiPe; categoria de impacto Toxicidade Humana.

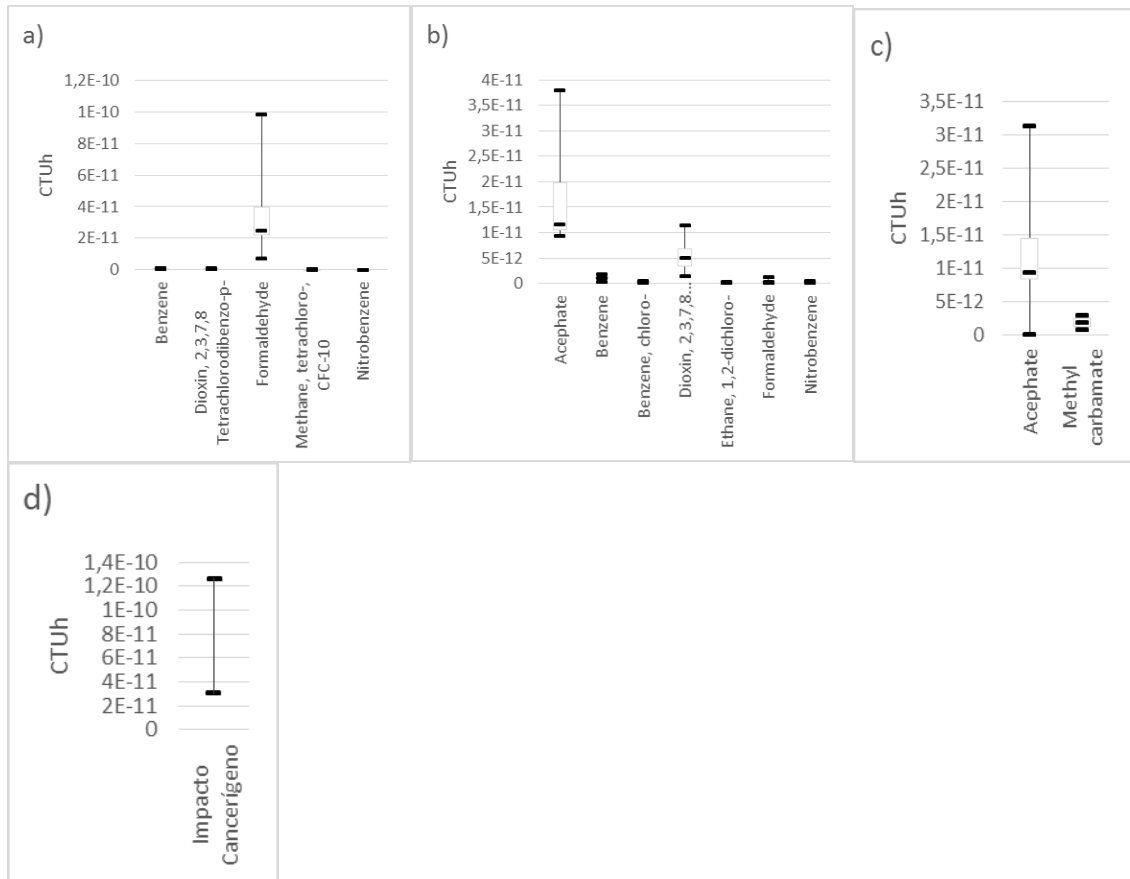
A Figura 22 revela que os processos de transformação do solo e produção de energia não contribuem para o potencial impacto. O processo de produção de fertilizantes contribui em 1,45% do potencial impacto total. Esses cenários revelam que o processo que contribui, majoritariamente, para o impacto corresponde à emissão de defensivos, com representação de 93,03% do potencial impacto. O processo de produção dos defensivos contribui com uma pequena parte, respondendo por 4,6% do impacto total.

Este método é o que abrange a maior quantidade de defensivos para estimar o potencial impacto na categoria, um total de 13 substâncias consideradas. Isto vem de encontro com o resultado demonstrado, que o maior responsável pelo potencial impacto é a emissão de defensivos agrícolas.

#### 4.3.5. Método USEtox

O método USEtox apresenta os potenciais impactos na categoria Toxicidade Humana, subdivididos em duas categorias: Cancerígeno e Não Cancerígeno.

O potencial impacto na categoria Cancerígeno ocorre via compartimentos ar, água e solo. O compartimento que apresenta maior contribuição ao impacto total vem a ser o compartimento Ar, com parcela de 51,50%. Os compartimentos água e solo representam 31,63% e 16,62% do impacto total, respectivamente. A Figura 23 apresenta as principais substâncias contribuintes para o impacto, assim como sua variação entre as fazendas avaliadas.



**Figura 23.** Variação do potencial impacto ambiental entre as fazendas e principais substâncias promotoras do impacto na subcategoria Cancerígeno, via compartimentos: a) ar; b) água; c) solo. d) impacto máximo e mínimo entre as fazendas.

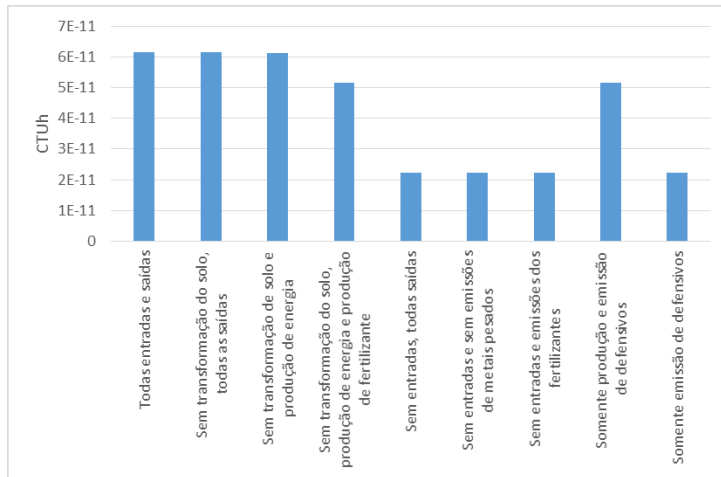
Na Figura 23 *d*, observa-se que o potencial impacto calculado pelo USEtox para a categoria Cancerígeno apresenta fazenda com impacto mínimo de  $3,02E-11$  CTUh e fazenda com impacto máximo de  $1,27E-10$  CTUh, perfazendo uma diferença no impacto de 4,18 vezes entre elas.

Observa-se, na Figura 23, que o modelo USEtox apresenta defensivos agrícolas contribuindo com o potencial impacto, via compartimento água e solo. No compartimento água, o defensivo promotor do impacto compreende o acefato, com potencial impacto de  $1,21E-11$  CTUh. Para o compartimento solo, os defensivos apontados são o acefato (potencial impacto de  $9,92E-12$  CTUh) e o metil carbamato (potencial impacto de  $2,82E-13$  CTUh).

O defensivo agrícola acefato, tanto via compartimento água como solo, apresenta variação maior, se comparado às outras substâncias que contribuem com o potencial impacto, porém o valor desta variação é insignificante, na ordem de grandeza  $10^{-11}$ .

O USEtox considera que os defensivos agrícolas (neste caso o acefato e o metil carbamato) representam 36,26% do impacto total em toxicidade humana com efeitos cancerígenos.

A Figura 24 apresenta a simulação do potencial impacto ambiental na categoria Carcinogênico com o objetivo de avaliar a contribuição no impacto total de processos como produção e emissão de fertilizantes, transformação do solo, produção de energia, entre outros processos, pertencentes direta ou indiretamente ao sistema Produção de Soja.



**Figura 24.** Cenários do sistema agrícola de produção de soja com variações em suas entradas e saídas – modelo USEtox; categoria de impacto Cancerígeno.

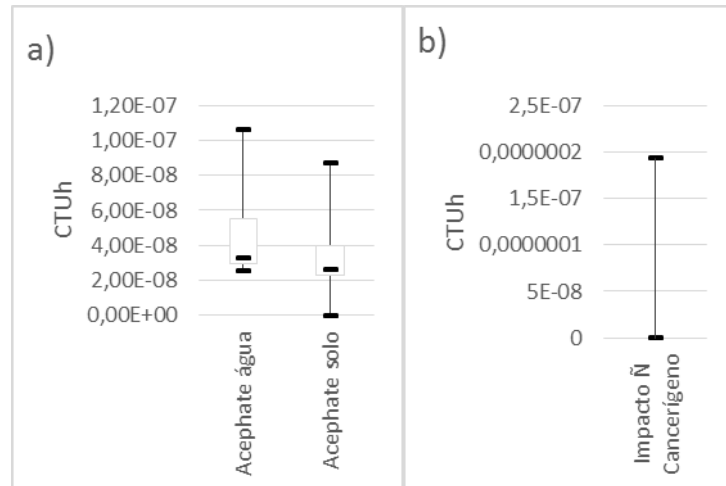
Observa-se, na Figura 24, que os processos que contribuem majoritariamente para o potencial impacto total estão relacionados aos defensivos agrícolas, com parcela de 84,11% do impacto total considerando juntamente o processo de produção e as emissões. Individualmente, os processos que mais contribuem ao impacto são:

- produção de defensivos - responde por 47,85% do impacto;
- emissão de defensivos - responde por 36,3% do impacto;
- produção de fertilizantes - responde por 15,77% do impacto.

Somente o acefato possui fator de caracterização neste modelo, o que reduz o grau de precisão do potencial impacto ambiental causado pelo sistema da soja.

O potencial impacto na subcategoria Não Cancerígeno ocorre via compartimentos água e solo. Ambos contribuem com parcelas semelhantes ao impacto total: 54,85% e 45,16%, respectivamente. A Figura 25 apresenta as principais substâncias contribuintes para o impacto, assim como sua variação entre as fazendas avaliadas.





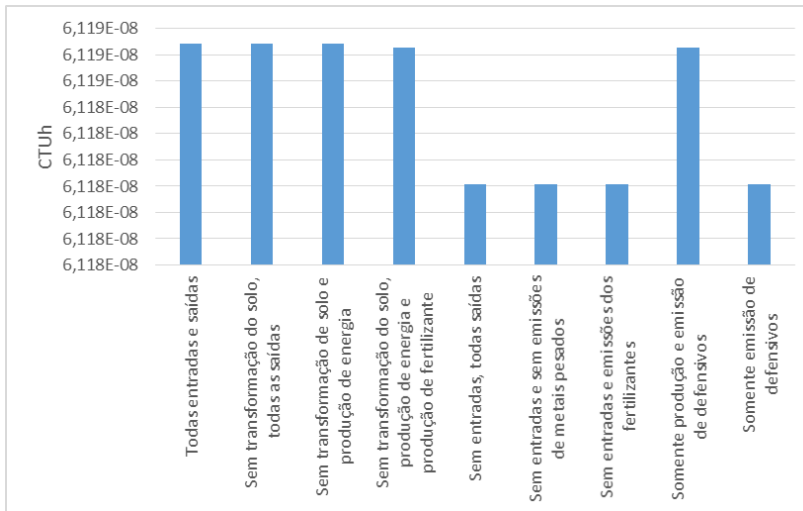
**Figura 25.** Variação do potencial impacto ambiental entre as fazendas e principais substâncias promotoras do impacto na subcategoria Não Cancerígeno, via compartimento água e solo. b) impacto máximo e mínimo entre as fazendas.

A Figura 25b apresenta uma variação grande do potencial impacto ambiental entre as fazendas. Para a fazenda com menor impacto, o USEtox calculou um impacto de  $2,95E-12$  CTUh. Já para a fazenda com maior impacto, o USEtox calculou um impacto de 65.348 vezes maior, chegando a  $1,93E-7$  CTUh.

O resultado apresentado na Figura 25, mostra que o defensivo agrícola acefato vem a ser o principal contribuinte para o impacto na subcategoria Não Carcinogênico, com impacto total de  $6,12E-8$  CTUh. A variação do potencial impacto entre as fazendas corresponde a um valor insignificante, na ordem de grandeza de  $10^{-8}$ .

Nessa categoria, o USEtox considera que 99,99% do impacto em toxicidade humana, com efeitos não cancerígenos ocorre devido ao uso do defensivo agrícola acefato.

A Figura 26 apresenta a simulação do potencial impacto ambiental na categoria Não Carcinogênico para avaliar a contribuição no impacto total dos processos - produção e emissão de fertilizantes, transformação do solo, produção de energia, entre outros processos pertencentes, direta ou indiretamente, ao sistema Produção de Soja.



**Figura 26.** Cenários do sistema agrícola produção de soja com variações em suas entradas e saídas – modelo USEtox; categoria de impacto Não Carcinogênico.

Os resultados dos cenários simulados no USEtox, apresentados na Figura 26, mostram que o potencial impacto tem origem, majoritariamente, na emissão de defensivos, com parcela de 99,99% do potencial impacto total. De acordo com os resultados, os outros processos considerados no inventário não contribuem significativamente para o impacto.

Ressalta-se que este método somente considera o acefato para estimar as emissões de defensivos, e mesmo assim já obteve grande significatividade, sendo a emissão dos defensivos apontada como a maior colaboradora para o potencial impacto. Caso mais substâncias fossem consideradas, esse potencial impacto poderia ser ainda maior.

#### 4.4. AVALIAÇÃO DO IMPACTO EM ECOTOXICIDADE

Para a categoria de impacto Ecotoxicidade os métodos empregados para o cálculo do potencial impacto apresentam os resultados constantes na Tabela 14.

**Tabela 14.** Potencial impacto ambiental em Ecotoxicidade.

|                                      | Unidade                   | Potencial Impacto | Desvio Padrão |
|--------------------------------------|---------------------------|-------------------|---------------|
| <b>Método CML-IA</b>                 |                           |                   |               |
| <b>Ecotoxicidade em água doce</b>    | kg 1,4-DB eq <sup>1</sup> | 29,77             | 24,70         |
| <b>Ecotoxicidade em água marinha</b> | kg 1,4-DB eq              | 40,72             | 17,42         |
| <b>Ecotoxicidade terrestre</b>       | kg 1,4-DB eq              | 0,44              | 0,42          |

*Continua...*

Tabela 14. Potencial impacto ambiental em Ecotoxicidade (*continuação...*).

|  | Unidade                   | Potencial Impacto | Desvio Padrão |
|--|---------------------------|-------------------|---------------|
| <b>Método EDIP 2003</b>                        |                           |                   |               |
| <b>Ecotoxicidade aquática – efeito agudo</b>   | m <sup>3</sup>            | 188.794,61        | 321 874,73    |
| <b>Ecotoxicidade aquática – efeito crônico</b> | m <sup>3</sup>            | 848.108,19        | 609 637,71    |
| <b>Ecotoxicidade do solo – efeito crônico</b>  | m <sup>3</sup>            | 7.581,51          | 8 968,95      |
| <b>Método IMPACT 2002+</b>                     |                           |                   |               |
| <b>Ecotoxicidade aquática</b>                  | kg TEG <sup>3</sup>       | 1.897,45          | 527,71        |
| <b>Ecotoxicidade terrestre</b>                 | kg 1,4-DB eq              | 1.087,85          | 138,09        |
| <b>Método ReCiPe</b>                           |                           |                   |               |
| <b>Ecotoxicidade em água doce</b>              | kg 1,4-DB eq <sup>1</sup> | 0,140             | 0,09          |
| <b>Ecotoxicidade em água marinha</b>           | kg 1,4-DB eq <sup>1</sup> | 0,003             | 3,86E-05      |
| <b>Ecotoxicidade terrestre</b>                 | kg 1,4-DB eq              | 0,057             | 0,05          |
| <b>Método USEtox</b>                           |                           |                   |               |
| <b>Ecotoxicidade em água doce</b>              | CTUe <sup>2</sup>         | 906,94            | 627,67        |

1 – 1,4 diclorobenzeno equivalente; 2 – unidade tóxica comparativa; 3 – trietilenoglicol.

Como discutido anteriormente com relação à Toxicidade Humana, no que concerne à Ecotoxicidade os métodos também apresentam potencial impacto ambiental em unidades diferentes, o que torna a comparação dos resultados complexa. Somente os métodos CML-IA e ReCiPe apresentam unidades iguais. Ainda, ressalte-se a escolha de diferentes categorias de impacto para melhor retratar os potenciais impactos em Ecotoxicidade.

O método CML-IA e o ReCiPe apresentam os potenciais impactos em Ecotoxicidade divididos em três categorias: Ecotoxicidade em Água Doce; Ecotoxicidade em Água Marinha e Ecotoxicidade Terrestre. Os resultados obtidos pelo CML-IA apontam a categoria Ecotoxicidade em Água Marinha com maior impacto, devido às atividades do sistema agrícola, 40,72 kg 1,4-DB equivalente; seguido por Ecotoxicidade em Água Doce, 29,77 kg 1,4-DB equivalente, e com menor impacto Ecotoxicidade Terrestre, 1,4 kg 1,4-DB equivalente. O método ReCiPe apresenta valores de potencial impacto inferiores em relação ao CML-IA e aponta que o maior impacto ocorre em Água Doce, com potencial impacto de 0,14 kg 1,4-DB equivalente.

O método EDIP 2003 considera os impactos em Ecotoxicidade divididos nas categorias: Ecotoxicidade Aquática com Efeito Agudo; Ecotoxicidade Aquática com Efeito Crônico; e Ecotoxicidade do Solo com Efeito Crônico. O maior impacto calculado pelo método, para o sistema agrícola Produção de Soja, corresponde à categoria Ecotoxicidade Aquática com Efeito Crônico, com impacto de 848.108,19 m<sup>3</sup> de água intoxicada pelo sistema, sendo que o efeito deste impacto nos ecossistemas se classifica como crônico. Para a categoria Ecotoxicidade Aquática com Efeitos Agudos, o volume de água impactado, calculado pelo método, corresponde a 188.794,61 m<sup>3</sup>. O potencial impacto em Ecotoxicidade do Solo com Efeitos Crônicos apresenta um volume de terra intoxicado de 7.581,51 m<sup>3</sup>.

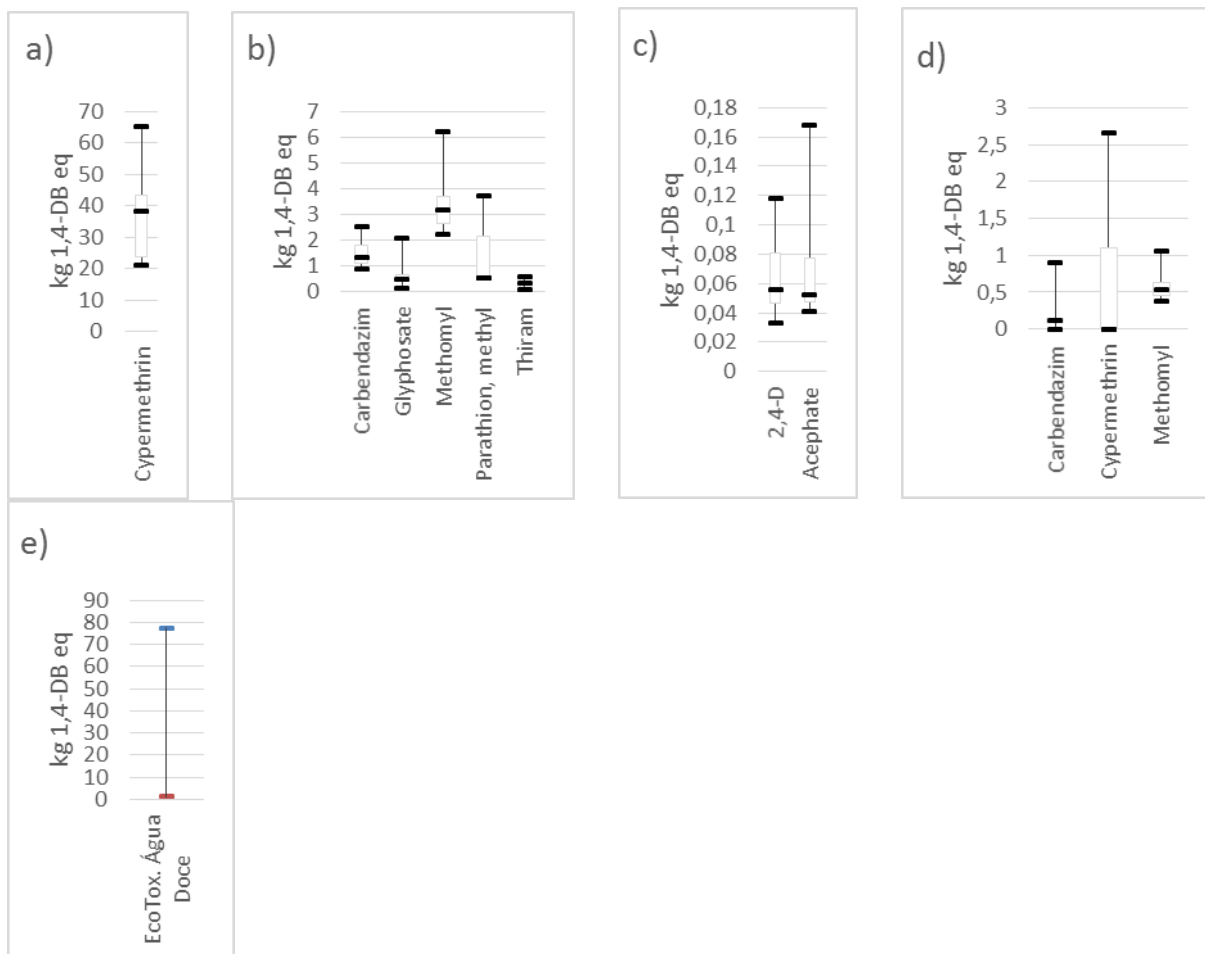
O método IMPACT 2002+ apresenta impactos em Ecotoxicidade Aquática e Terrestre. Os valores de potencial impacto apresentados pelo método, para ambas as categorias, são: 1.897,45 e 1.087,85 kg 1,4-DB equivalente.

O USEtox considera que o impacto ocorre em Água Doce, com potencial impacto de 906,94 CTUe.

#### 4.4.1. Método CML-IA

O método CML-IA divide os impactos em Ecotoxicidade em três categorias: Ecotoxicidade em Água Doce; Ecotoxicidade em Água Marinha; e Ecotoxicidade Terrestre.

Em relação à Ecotoxicidade em Água Doce o método CML-IA indica que o potencial impacto ambiental ocorre via compartimentos: água e solo. Os referidos compartimentos apresentam as seguintes contribuições para o impacto total nessa categoria: 95,13% e 4,77% respectivamente. A Figura 27 apresenta as principais substâncias promotoras do potencial impacto ambiental, assim como sua variação, em relação às quatorze fazendas avaliadas.



**Figura 27.** Variação do impacto ambiental nas fazendas e principais substâncias promotoras do impacto na categoria Ecotoxicidade de Água Doce, via compartimentos: a) b) c) água; d) solo. e) impacto máximo e mínimo entre as fazendas.

Observa-se, na Figura 27, uma variação de 63,35 vezes no potencial impacto ambiental para a categoria Ecotoxicidade de Água Doce. Há fazenda que apresenta um potencial impacto mínimo de 1,22 kg 1,4-DB equivalente, enquanto noutra o potencial impacto apresentado corresponde a 77,56 kg 1,4-DB equivalente.

Os resultados obtidos pelo método CML-IA apresentam os seguintes defensivos causadores do impacto ambiental em água: cipermetrina; 2,4- D; acefato; carbendazim; glifosato; metomil; parationa metílica e tiran.

Observa-se que no compartimento água (Figura 27 a) a cipermetrina corresponde à substância que apresenta maior impacto médio, de 23,58 kg 1,4-DB equivalente.

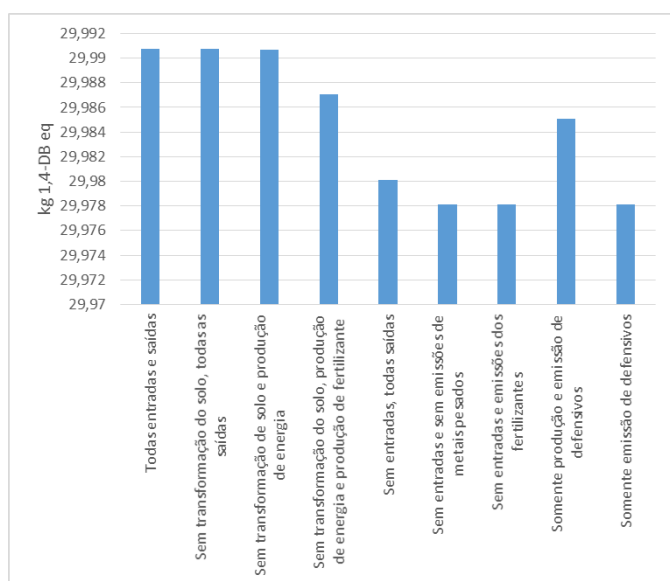
Observa-se na Figura 27 que a substância representativa de maior variação vem a ser a cipermetrina, com amplitude de variação de 43,88 kg de 1,4-DB equivalente. Essa substância representa a maior parcela do impacto para Ecotoxicidade em Água Doce, 78,64% do impacto total. As substâncias metomil e parationa metílica, com representação de 7,35% e 1,72%

respectivamente, também apresentam variação do impacto ambiental entre as fazendas, porém não com grande amplitude comparado à cipermetrina. O carbendazim representa 4,37% do impacto total, todavia, como se observa na Figura 27 *b*, sua amplitude de variação não é significativa.

Nos resultados obtidos, o compartimento solo também apresenta contribuições para o impacto através das substâncias: carbendazim; cipermetrina; e metomil. A contribuição deste compartimento é de 4,77% para o impacto total.

O método CML-IA considera que o potencial impacto ambiental em Ecotoxicidade em Água Doce ocorre, majoritariamente, devido aos defensivos agrícolas aplicados no sistema agrícola Produção de Soja, com representação de 99,89% do impacto total.

A Figura 28 apresenta a simulação do potencial impacto ambiental na categoria Ecotoxicidade em Água Doce para avaliar a contribuição no impacto total dos processos: produção e emissão de fertilizantes, transformação do solo, produção de energia, entre outros, pertencentes direta ou indiretamente ao sistema Produção de Soja.

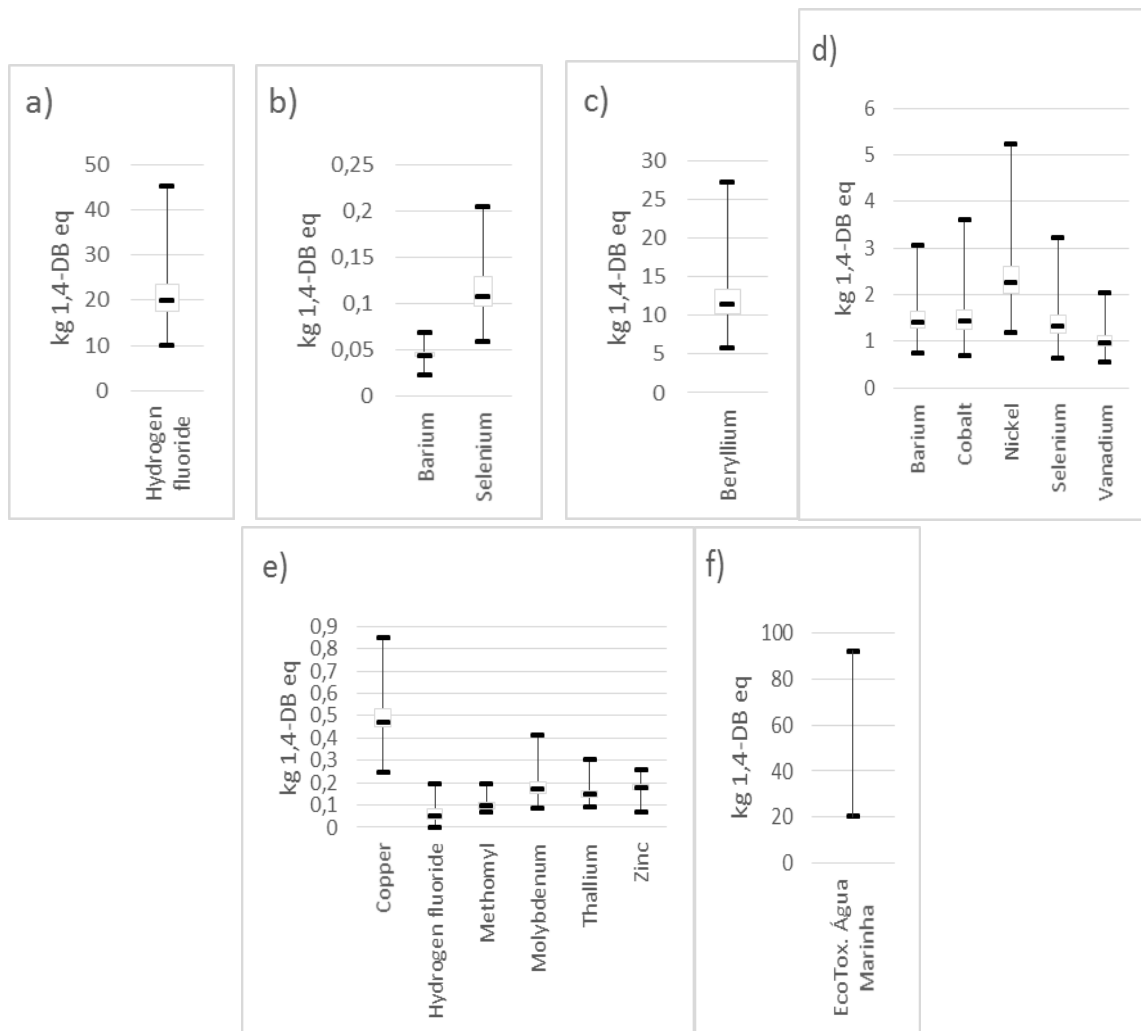


**Figura 28.** Cenários do sistema agrícola produção de soja com variações em suas entradas e saídas – método CML-IA; categoria de impacto Ecotoxicidade em Água Doce.

Mediante os resultados apresentados na Figura 28, observa-se que o processo responsável pelo maior impacto na categoria em análise são as emissões devido ao uso de defensivos durante a produção de soja. Esse processo representa 99,96% do potencial impacto ambiental. Vale ressaltar que este método considerou somente oito, dos vinte três, ingredientes ativos no cálculo do potencial impacto.

Para a categoria de impacto Ecotoxicidade em Água Marinha, o método apresentou impacto ocorrendo via compartimentos ar e água. Tais compartimentos representam 49,60% e

50% do total de impacto nessa categoria, respectivamente. A Figura 29 apresenta as principais substâncias promotoras do potencial impacto ambiental, indicadas pelo CML-IA, assim como a variação do impacto entre as quatorze fazendas avaliadas.



**Figura 29.** Variação do impacto ambiental para Ecotoxicidade em Água Marinha – a) b) compartimento ar; c) d) e) compartimento água. f) impacto máximo e mínimo entre as fazendas.

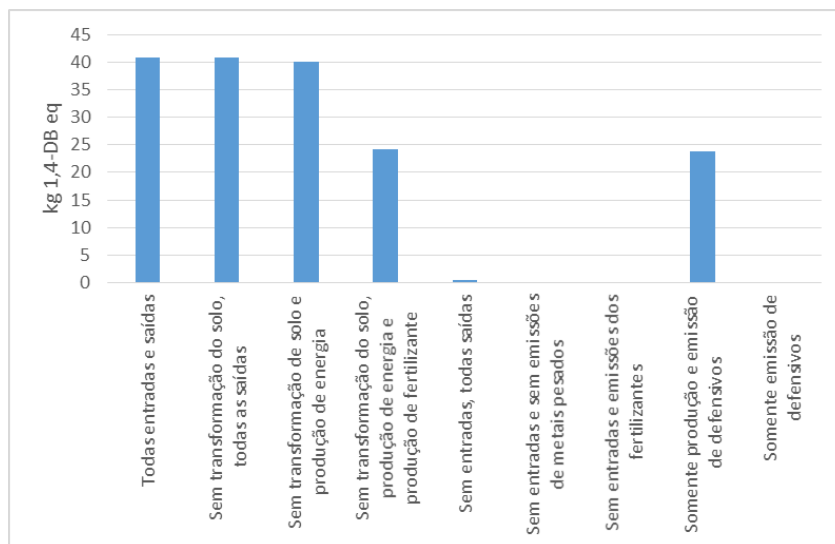
Para a categoria Ecotoxicidade em Água Marinha o potencial impacto ambiental, entre as fazendas, apresenta uma amplitude de variação de 71,46 1,4-DB equivalente (Figura 29 f); há fazenda que apresenta um potencial impacto de 20,45 1,4-DB equivalente, enquanto noutra apresenta-se um potencial impacto de 91,91 1,4-DB equivalente.

Os resultados obtidos pelo método CML-IA (Figura 29), para a categoria de impacto Ecotoxicidade em Água Marinha, apresentou somente a contribuição do agrotóxico metomil. As substâncias que o método apresentou como maiores contribuintes ao impacto foram: fluoreto de hidrogênio (20,05 kg 1,4-DB equivalente) e berílio (11,68 kg 1,4-DB equivalente).

Na Figura 29, observa-se que tanto o fluoreto de hidrogênio como o berílio apresentam grande amplitude de variação do impacto entre as fazendas. Vale ressaltar que somente o fluoreto de hidrogênio representa 49,23% de todo o impacto na categoria considerada.

Como se pode observar (Figura 29 e) o metomil não apresenta grande variação de impacto entre as fazendas, e representa 0,17% do impacto total na categoria de Ecotoxicidade em Água Marinha. Observa-se com estes resultados que o uso de defensivos agrícolas não está contribuindo para impacto, pois somente o metomil foi apresentado pelo método como contribuinte ao impacto, com pequena participação, 0,17%.

A Figura 30 apresenta a simulação do potencial impacto ambiental, na categoria Ecotoxicidade em Água Marinha, para avaliar a contribuição no impacto total dos processos: produção e emissão de fertilizantes, transformação do solo, produção de energia, entre outros pertencentes, direta ou indiretamente, ao sistema Produção de Soja.



**Figura 30.** Cenários do sistema agrícola produção de soja com variações em suas entradas e saídas – método CML-IA; categoria de impacto Ecotoxicidade em Água Marinha.

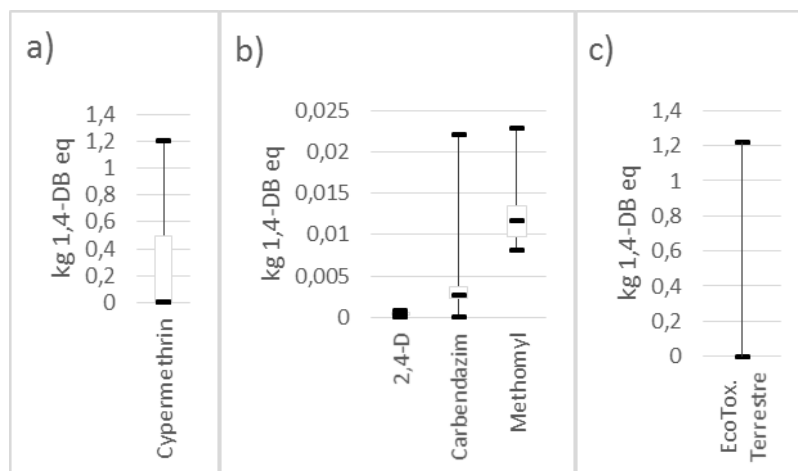
Observa-se, na Figura 30, que o método considera que o impacto decorre dos processos de produção dos insumos empregados no sistema agrícola, em específico a produção de fertilizante e defensivos. Esses processos correspondem a 39,14% e 57,95% do impacto total, respectivamente. Dessa forma, nota-se que a produção de defensivos é apontada como o processo de maior impacto frente à categoria Ecotoxicidade Marinha.

Nesta categoria, ressalta-se também que o método considerou somente oito tipos diferentes de defensivos agrícolas para estimar o potencial impacto ambiental.

O método CML-IA indica que o potencial impacto ambiental em Ecotoxicidade Terrestre ocorre via compartimento solo. A Figura 31 apresenta as principais substâncias



promotoras do potencial impacto ambiental, indicadas pelo CML-IA, assim como a variação do impacto entre as quatorze fazendas avaliadas.



**Figura 31.** Variação do impacto ambiental em Ecotoxicidade Terrestre – a) b) compartimento solo. c) impacto máximo e mínimo entre as fazendas.

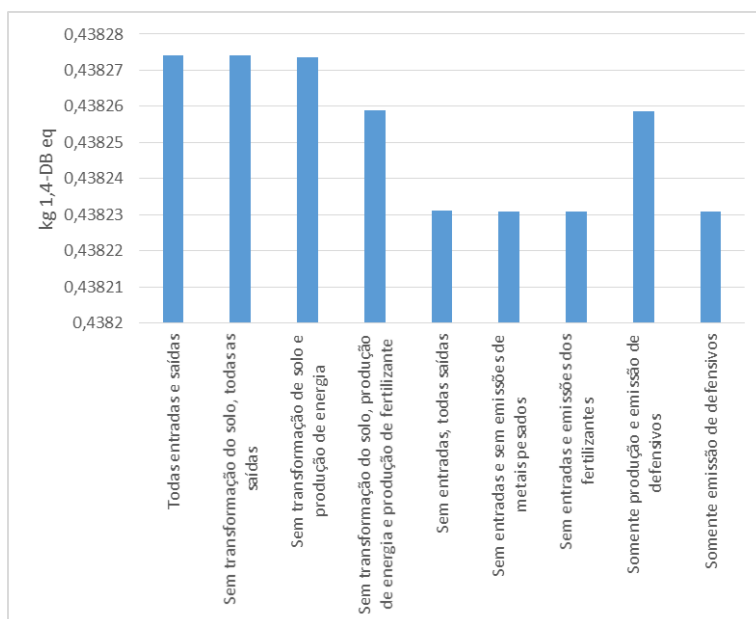
Para a categoria Ecotoxicidade Terrestre, o potencial impacto ambiental entre as fazendas, apresenta uma amplitude de variação de aproximadamente 1,21 kg 1,4-DB equivalente (Figura 31 c); há fazenda que apresenta um potencial impacto de 0,001 kg 1,4-DB equivalente, enquanto noutra ocorre um potencial impacto de 1,20 kg 1,4-DB equivalente. Isto demonstra a grande variação do potencial impacto, na referida categoria, entre as fazendas selecionadas para a construção do inventário da produção de soja.

Os resultados apresentados (Figura 31) mostram que os defensivos cipermetrina; 2,4-D, carbendazim e metomil são os principais responsáveis por impactos em ecotoxicidade terrestre. Vale destacar que o agrotóxico cipermetrina corresponde à maior contribuição ao impacto, de 0,43 kg 1,4-DB equivalente.

O impacto ambiental causado pela cipermetrina apresenta grande variação entre as diferentes fazendas consideradas no estudo (Figura 31), indo de fazendas que praticamente não apresentaram impactos, até fazendas com impacto máximo de 1,2 kg 1,4-DB equivalente. Vale destacar que a cipermetrina representa 97,27% do impacto total em ecotoxicidade terrestre.

Na categoria Ecotoxicidade Terrestre, o método apresenta o mesmo padrão de resultado, considerando que o impacto origina-se majoritariamente pelos defensivos, sendo que os últimos representam 99,82% do impacto total na categoria.

A Figura 32 apresenta a simulação do potencial impacto ambiental, na categoria Ecotoxicidade Terrestre, para avaliar a contribuição no impacto total de processos: produção e emissão de fertilizantes, transformação do solo, produção de energia, entre outros processos, pertencentes direta ou indiretamente ao sistema Produção de Soja.



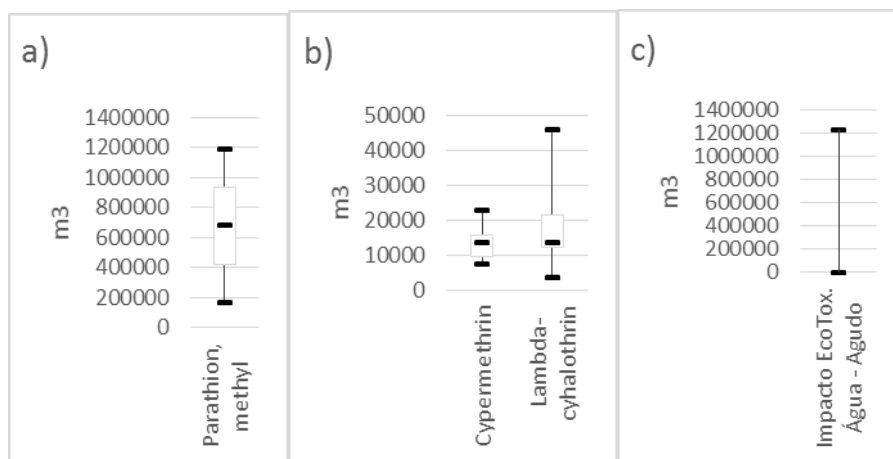
**Figura 32.** Cenários do sistema agrícola produção de soja com variações em suas entradas e saídas – método CML-IA; categoria de impacto Ecotoxicidade Terrestre

Para a categoria Ecotoxicidade Terrestre, o método considera que o potencial impacto decorre da utilização de defensivos no sistema agrícola. Este responde, majoritariamente, por 99,99% do potencial impacto calculado. No entanto, nem todas as substâncias aplicadas para controle de pragas foram consideradas pelo método, somente 8 defensivos possuem fatores de caracterização.

#### 4.4.2. Método EDIP 2003

O método EDIP 2003 apresenta impactos em Ecotoxicidade subdivididos nas categorias: Ecotoxicidade Aquática – Efeito Agudo; Ecotoxicidade Aquática – Efeito Crônico; e Ecotoxicidade do Solo – Efeito Crônico.

Em Ecotoxicidade Aquática – Efeito Agudo, o método EDIP 2003 considera que o impacto ocorre via compartimento água. A Figura 33 apresenta as principais substâncias promotoras do impacto, assim como sua variação entre as fazendas avaliadas.



**Figura 33.** Variação do potencial impacto ambiental, entre as fazendas e principais substâncias promotoras do impacto, na categoria Ecotoxicidade Aquática – Efeito Agudo (a e b). c) impacto máximo e mínimo entre as fazendas.

O potencial impacto ambiental na categoria Ecotoxicidade Aquática – Efeito Agudo apresenta uma variação entre as fazendas de 173.439 vezes, ou seja, varia de um potencial impacto mínimo de 7,07 m<sup>3</sup> até 1.225.874 m<sup>3</sup>.

A Figura 33 mostra que os agrotóxicos são os principais responsáveis pelo impacto na ecotoxicidade aquática com efeito agudo. O agrotóxico com maior impacto corresponde à parationa metflica, com impacto de 165.494,87 m<sup>3</sup> de água, seguido pelo lambda-cialotrina, com impacto de 15.070,26 m<sup>3</sup> de água e, com menor impacto, a cipermetrina, atingindo 8.215,93 m<sup>3</sup> de água.

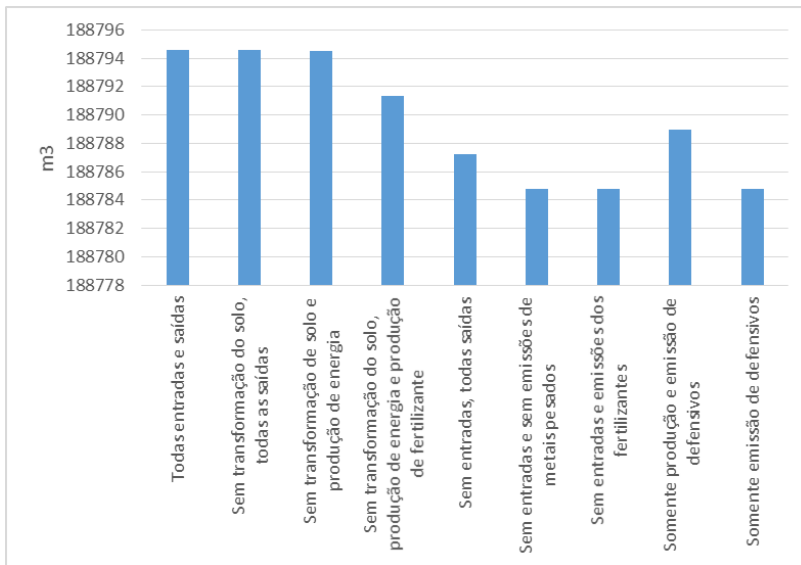
A Figura 33 mostra que os três agrotóxicos apresentam grande variação na quantidade de água impactada:

- a parationa metflica apresenta maior amplitude de variação, 1.025.602,78 m<sup>3</sup> de água. Esta substância representa 87,67% do total do impacto na categoria;
- o lambda-cialotrina apresenta amplitude de variação de 42.261,98 m<sup>3</sup> de água, sendo que representa a 7,98% do impacto total;
- a cipermetrina apresenta amplitude de variação de 15.287,58 m<sup>3</sup> de água impactada, e tem menor representação no impacto total, 4,35%.

O EDIP 2003 considera que os potenciais impactos na categoria Ecotoxicidade Aquática – Efeito Agudo ocorre, majoritariamente (99,99%), pela aplicação de defensivos no plantio de soja.

A Figura 34 apresenta a simulação do potencial impacto ambiental na categoria Ecotoxicidade Aquática – Efeito Agudo para avaliar a contribuição no impacto total de processos tais como: produção e emissão de fertilizantes, transformação do solo, produção de

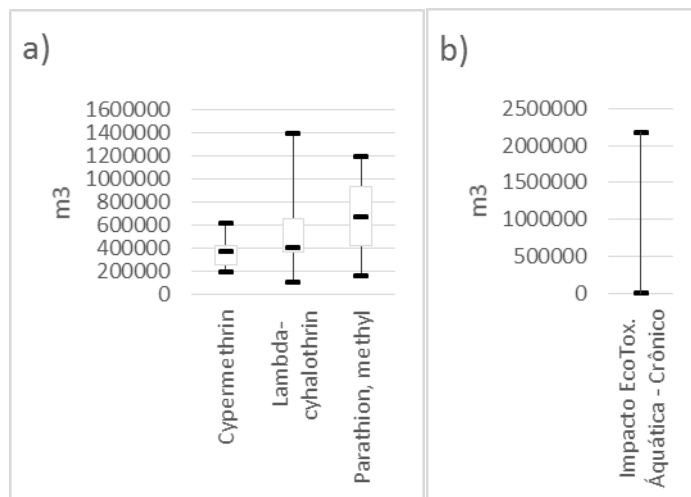
energia, entre outros processos pertencentes, direta ou indiretamente, ao sistema Produção de Soja.



**Figura 34.** Cenários do sistema agrícola produção de soja com variações em suas entradas e saídas – método EDIP 2003; categoria de impacto Ecotoxicidade Aquática – Efeito Agudo.

De acordo com a Figura 34, o método EDIP 2003 considera que o impacto em Ecotoxicidade Aquática – Efeito Agudo ocorre devido à emissão de defensivos no ambiente. O último representa 99,99% do potencial impacto total na categoria avaliada.

Em Ecotoxicidade Aquática – Efeito Crônico, o método EDIP 2003 considera que o impacto ocorre via compartimento água. A Figura 35 apresenta as principais substâncias promotoras deste impacto, assim como sua variação, entre as fazendas avaliadas.



**Figura 35.** Variação do potencial impacto ambiental, entre as fazendas, e principais substâncias promotoras do impacto na categoria Ecotoxicidade Aquática – Efeito Crônico(a). b) impacto máximo e mínimo entre as fazendas.

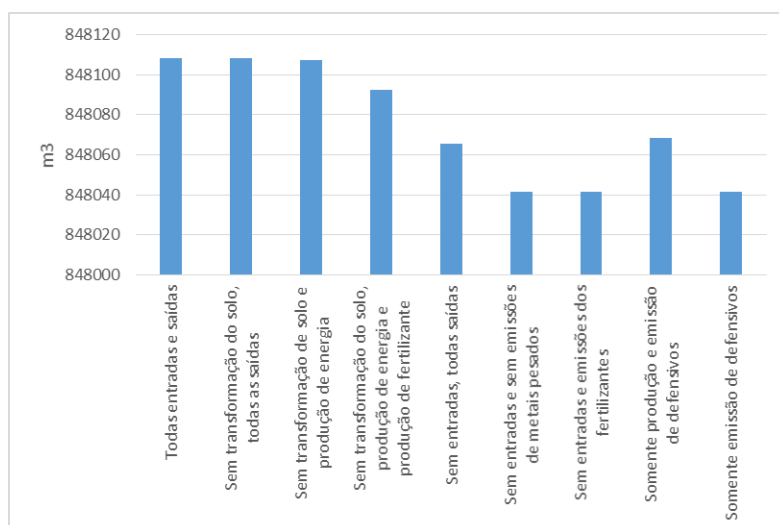
O potencial impacto ambiental entre as fazendas apresenta uma grande variação (Figura 35 b): há fazenda que apresenta impacto mínimo de 49,38 m<sup>3</sup>, e outra, na mesma área considerada, que apresenta potencial impacto 44.111 vezes maior, 2.178.161 m<sup>3</sup>.

O resultado apresentado na Figura 35 mostra que os defensivos cipermetrina, lambda-cialotrina e parationa metílica são os principais contribuintes do impacto ambiental na categoria. Destaca-se o lambda-cialotrina com impacto de 458.048,55 m<sup>3</sup> de água.

A Figura 35 mostra a existência de uma grande variação do impacto ambiental na categoria Ecotoxicidade Aquática com Efeito Crônico entre as fazendas amostradas. A substância lambda-cialotrina apresenta a maior variação, com amplitude de variação de 1.284.519,01 m<sup>3</sup>. Esta substância responde pela maior parcela de impacto na categoria, 54,01% do impacto total. A parationa metílica apresenta uma amplitude de variação 1.025.602,78 m<sup>3</sup>, e responde pela menor parcela de impacto entre as substâncias, 19,51%. A cipermetrina responde por 26,47% do impacto total e apresenta menor amplitude de variação, 417.672,77 m<sup>3</sup>.

Para a categoria em análise, o EDIP 2003 também considera que os defensivos são os grandes responsáveis pelo potencial impacto, respondendo majoritariamente em 99,99% do impacto.

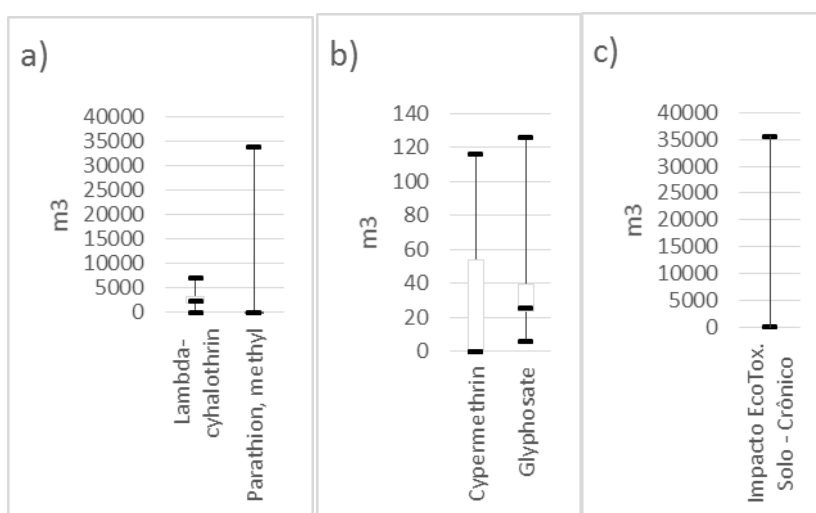
A Figura 36 apresenta a simulação do potencial impacto ambiental na categoria Ecotoxicidade Aquática – Efeito Crônico para avaliar a contribuição no impacto total de processos como: produção e emissão de fertilizantes, transformação do solo, produção de energia, entre outros processos pertencentes, direta ou indiretamente, ao sistema Produção de Soja.



**Figura 36.** Cenários do sistema agrícola produção de soja com variações em suas entradas e saídas – método EDIP 2003; categoria de impacto Ecotoxicidade Aquática – Efeito Crônico.

Os resultados apresentados na Figura 36 demonstram os processos produção de fertilizantes, produção de defensivos ou de energia não contribuem majoritariamente ao potencial impacto total em Ecotoxicidade Aquática – Efeito Crônico. As emissões de defensivos agrícolas são apontadas como causadora do potencial impacto, representando 99,99% deste.

Em Ecotoxicidade do Solo – Efeito Crônico o método EDIP 2003 considera que o impacto ocorre via compartimento solo. A Figura 37 apresenta as principais substâncias apontadas pelo método como promotoras do potencial impacto, assim como sua variação entre as diversas fazendas avaliadas.



**Figura 37.** Variação do potencial impacto ambiental, entre as fazendas, e principais substâncias promotoras do impacto na categoria Ecotoxicidade do Solo com Efeito Crônico (a e b). c) impacto máximo e mínimo entre as fazendas.

O potencial impacto ambiental, entre as fazendas, na categoria de impacto Ecotoxicidade do Solo com Efeito Crônico apresentou uma variação de 35.597 m<sup>3</sup> (Figura 37 c): fazenda com impacto mínimo de 6,31 m<sup>3</sup> até fazenda com impacto de 35.603 m<sup>3</sup>.

Segundo os resultados obtidos (Figura 37), os agrotóxicos são os principais responsáveis pelo impacto ambiental nesta categoria. As substâncias apontadas como impactantes são:

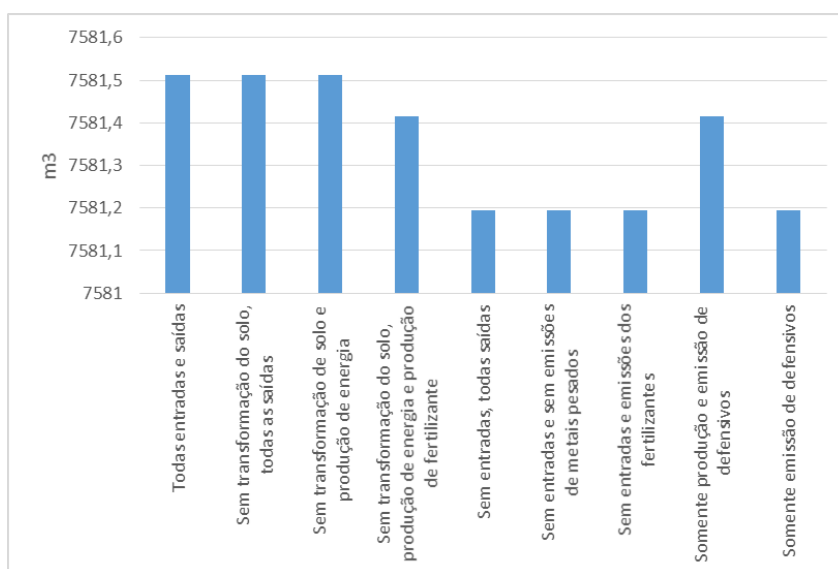
- parationa metílica, com impacto de 5.237,58 m<sup>3</sup>de solo;
- lambda cialotrina, com impacto de 2.271,29 m<sup>3</sup>de solo;
- cipermetrina, com impacto de 41,28 m<sup>3</sup>de solo;
- glifosato, com impacto de 31,04 m<sup>3</sup>de solo.

Observa-se na Figura 37 que a parationa metílica é a substância que apresenta maior amplitude de variação, 33.685,66 m<sup>3</sup>de solo. Este agrotóxico responde a 69,08% de todo o

impacto ambiental na categoria. O lambda-cialotrina possui uma grande amplitude de variação, de 6.897,01 m<sup>3</sup>de solo, e sua parcela no impacto total vem a ser 29,96%. Os agrotóxicos cipermetrina e glifosato apresentam amplitude de variação em torno de 118 m<sup>3</sup>, e respondem a uma pequena parcela do impacto total, 0,54 e 0,41% respectivamente.

Para a categoria em análise, o EDIP 2003 também considera os defensivos os grandes responsáveis pelo potencial impacto, respondendo majoritariamente em 99,99% do impacto.

A Figura 38 apresenta a simulação do potencial impacto ambiental na categoria Ecotoxicidade do Solo – Efeito Crônico para avaliar a contribuição no impacto total de processos como: produção e emissão de fertilizantes, transformação do solo, produção de energia, entre outros processos pertencentes, direta ou indiretamente, ao sistema Produção de Soja.



**Figura 38.** Cenários do sistema agrícola produção de soja com variações em suas entradas e saídas – método EDIP 2003; categoria de impacto Ecotoxicidade do Solo – Efeito Crônico.

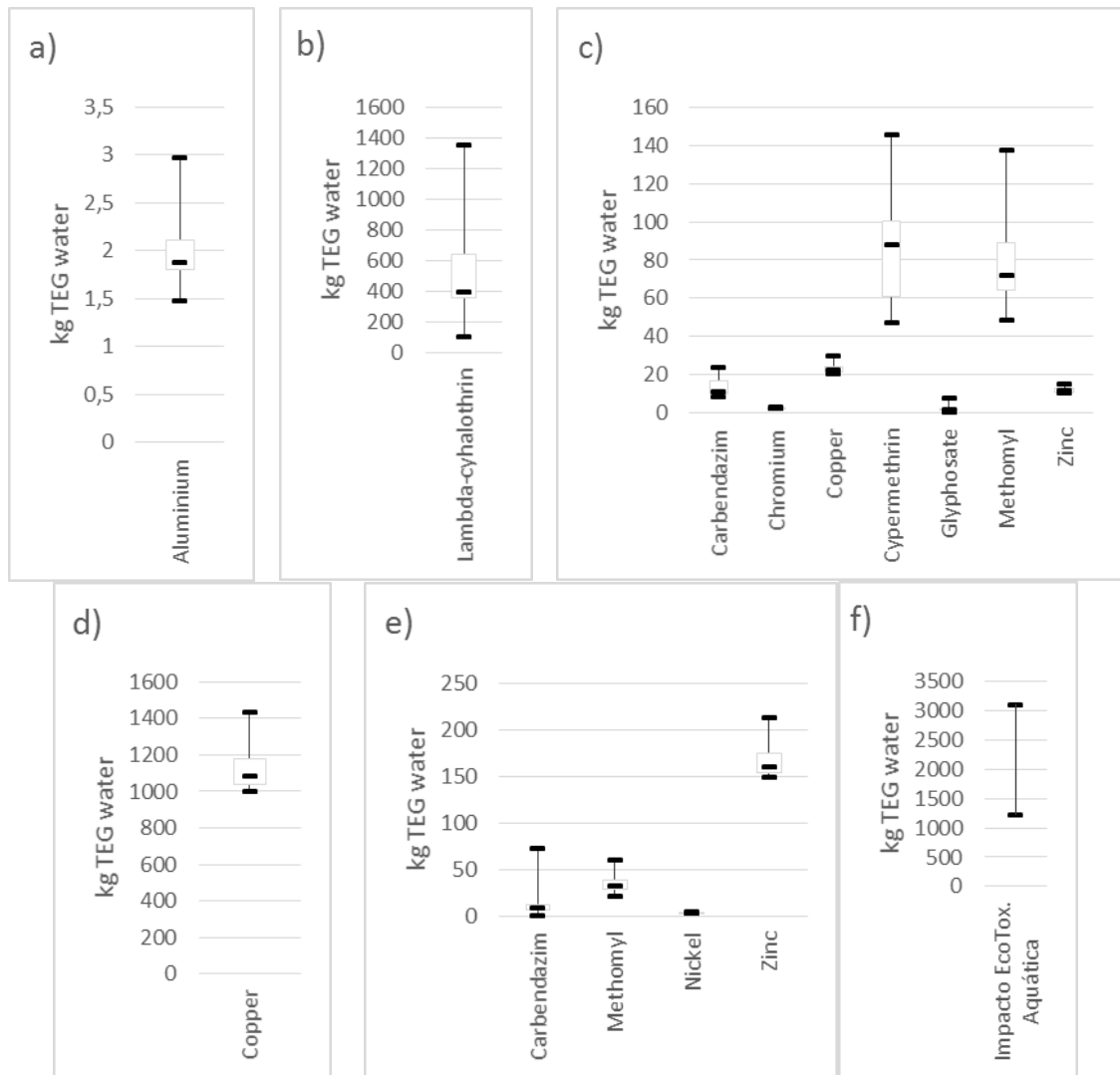
Assim como para as outras categorias, referentes à Ecotoxicidade abrangidas pelo método EDIP 2003, para Ecotoxicidade do Solo – Efeito Crônico o processo representativo do maior impacto corresponde à emissão dos defensivos utilizados no sistema agrícola, com parcela de 99,99% do impacto.

Para as categorias referentes a ecotoxicidade, presentes no EDIP 2003, este último apresenta fatores de caracterização para somente 4 defensivos agrícolas. Dessa forma é possível que, com a consideração de mais substâncias, o método acuse variações no impacto calculado.

#### 4.4.3. Método IMPACT 2002+

O método IMPACT 2002+ apresenta impactos em Ecotoxicidade divididos em duas categorias: Ecotoxicidade Aquática e Ecotoxicidade Terrestre.

Na categoria de impacto Ecotoxicidade Aquática, o IMPACT 2002+ considera que o impacto ocorre via compartimentos ar, água e solo. Estes últimos representam 0,10%, 31,53% e 67,73% do impacto total, respectivamente. A Figura 39 apresenta as principais substâncias promotoras do impacto, assim como sua variação entre as fazendas avaliadas.



**Figura 39.** Variação do potencial impacto ambiental entre as fazendas e principais substâncias promotoras do impacto na categoria Ecotoxicidade Aquática via compartimentos: a) ar; b) c) água; d) e) solo. f) impacto máximo e mínimo entre as fazendas.

Para a categoria Ecotoxicidade Aquática, o potencial impacto ambiental, entre as fazendas, apresenta uma amplitude de variação de 1.867,82 kg TEG em água (Figura 39f): há



fazenda que apresenta um potencial impacto de 1.226,78 kg TEG em água, enquanto outra apresenta um potencial impacto de 3.094,60 kg TEG também em água.

De acordo com resultados obtidos (Figura 39 *d*), o maior contribuinte para o impacto ambiental nesta categoria vem a ser o cobre, via compartimento solo, com impacto médio de 1.090,14 kg TEG em água. Observa-se também os seguintes defensivos como contribuintes do impacto ambiental:

- Via compartimento água
  - lambda-cialotrina, com impacto médio de 445,58 kg TEG em água;
  - cipermetrina, com impacto médio de 52,86 kg TEG em água;
  - metomil, com impacto médio de 48,74 kg TEG em água;
  - carbendazim, com impacto médio de 12,39 kg TEG em água;
  - glifosato, com impacto médio de 1,87 kg TEG em água.
- Via compartimento solo:
  - metomil, com impacto médio de 21,04 kg TEG em água;
  - carbendazim, com impacto médio de 9,03 kg TEG em água.

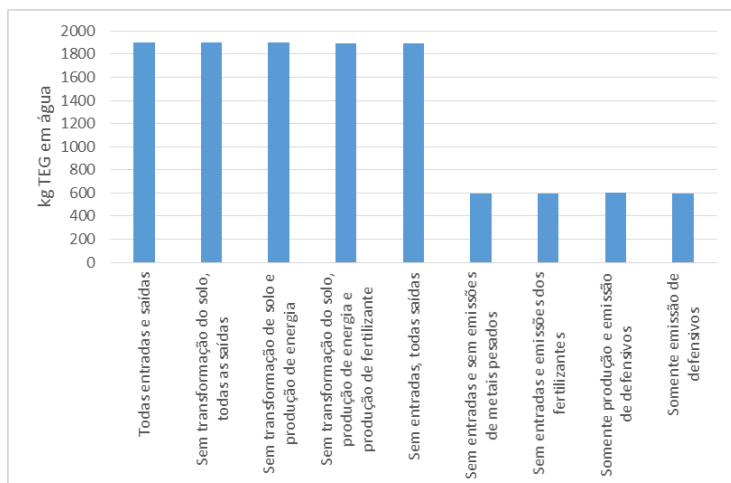
Na Figura 39, observa-se que o potencial impacto, via compartimento água, causado pelo defensivo lambda-cialotrina apresenta grande amplitude de variação entre as fazendas -de 1.249,55 kg TEG. Os defensivos cipermetrina e metomil também apresentam variação no potencial impacto, via compartimento água, de 98,35 e 88,84 kg TEG respectivamente.

A variação do potencial impacto, via compartimento solo, decorrente do uso de defensivos corresponde a:

- carbendazim: com amplitude de variação de 72,29 kg TEG;
- metomil: 38,72 kg TEG.

O método IMPACT 2002+ considera os defensivos agrícolas responsáveis por apenas 31,18% do impacto total em Ecotoxicidade Aquática.

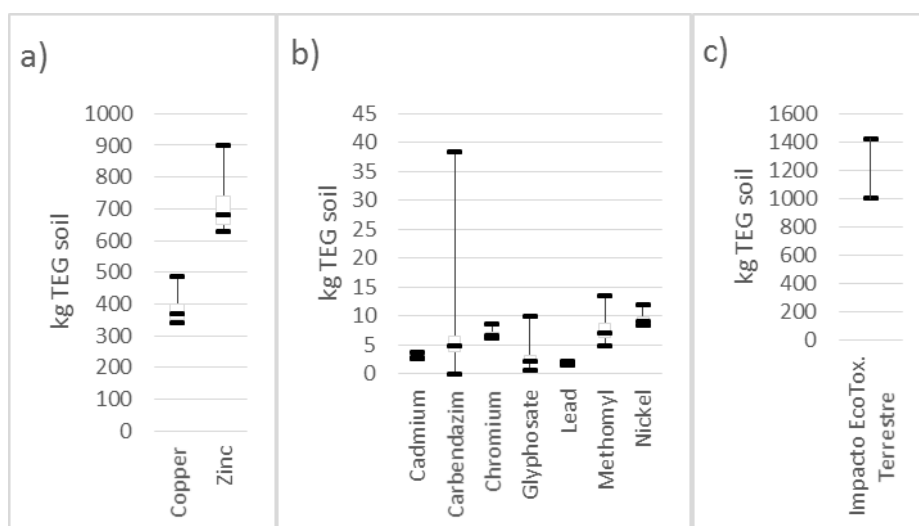
A Figura 40 apresenta a simulação do potencial impacto ambiental, na categoria Ecotoxicidade Aquática, para avaliar a contribuição no impacto total de processos como: produção e emissão de fertilizantes, transformação do solo, produção de energia, entre outros processos pertencentes, direta ou indiretamente, ao sistema Produção de Soja.



**Figura 40.** Cenários do sistema agrícola produção de soja com variações em suas entradas e saídas – método IMPACT 2002+; categoria de impacto Ecotoxicidade Aquática.

Os resultados apresentados pela simulação dos cenários (Figura 40) mostram que os processos que mais contribuem para o impacto são as emissões de metais pesados e as emissões de defensivos agrícolas. Estas emissões correspondem a 68,22% e 31,48% do potencial impacto total, respectivamente. Verifica-se que o método não apresenta fatores de caracterização para todos os defensivos agrícolas aplicados no sistema da soja – há fatores para 12 dos 23 defensivos aplicados.

Na categoria Ecotoxicidade Terrestre, o método considera que o impacto ocorre via compartimento solo. A Figura 41 apresenta as principais substâncias promotoras do impacto, assim como sua variação entre as fazendas avaliadas.



**Figura 41.** Variação do potencial impacto entre as fazendas e principais substâncias promotoras do impacto na categoria Ecotoxicidade Terrestre (a,b). c) impacto máximo e mínimo entre as fazendas.

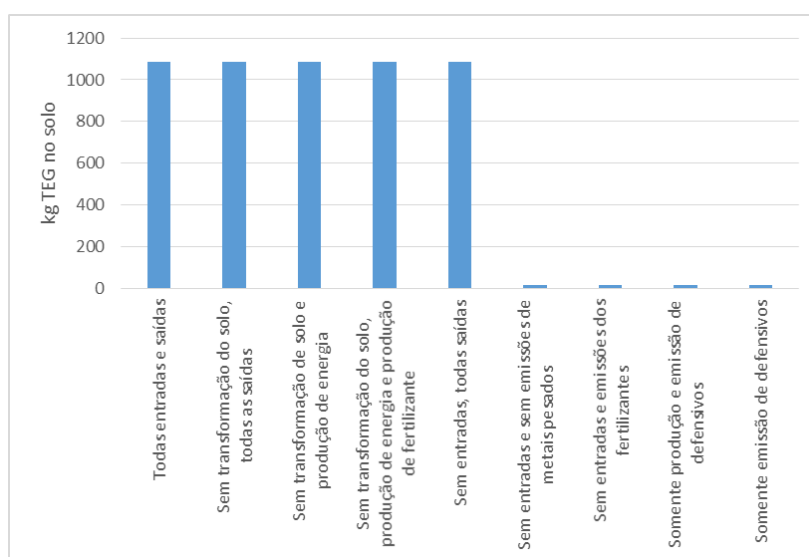
Para a categoria de impacto Ecotoxicidade Terrestre, o potencial impacto calculado para cada fazenda apresentou variação de 1,42 vezes (Figura 41 c). O referido impacto entre as fazendas variou de 1.003,71 kg TEG no solo até 1.421,81 kg TEG.

De acordo com os resultados apresentados na Figura 41, os maiores promotores do impacto nesta categoria são o cobre e o zinco. Os defensivos agrícolas considerados contribuintes, porém com uma parcela menor, a saber: carbendazim com impacto médio de 4,79 kg TEG no solo, com representação de 0,44% do impacto total; metomil com impacto médio de 4,74 kg TEG no solo, correspondendo a 0,44% do impacto total; e o glifosato, com impacto médio de 2,47 kg TEG no solo, com parcela de 0,23% no impacto total.

Na Figura 41, observa-se ser o zinco a substância que apresenta maior variação do potencial impacto entre as fazendas avaliadas, com amplitude de 231,32 kg TEG no solo. Dentre os defensivos, o carbendazim revela maior variação do potencial impacto, porém essa ocorrência foi encontrada em uma fazenda: potencial impacto de 38,31 kg TEG no solo.

Os resultados (Figura 41) demonstram que o IMPACT 2002+ não considera os defensivos grandes impactantes à categoria Ecotoxicidade Terrestre, os primeiros respondem somente 1,10% do impacto total.

A Figura 42 apresenta a simulação do potencial impacto ambiental, na categoria Ecotoxicidade Terrestre, para avaliar a contribuição no impacto total de processos como: produção e emissão de fertilizantes, transformação do solo, produção de energia, entre outros processos pertencentes, direta ou indiretamente, ao sistema Produção de Soja.



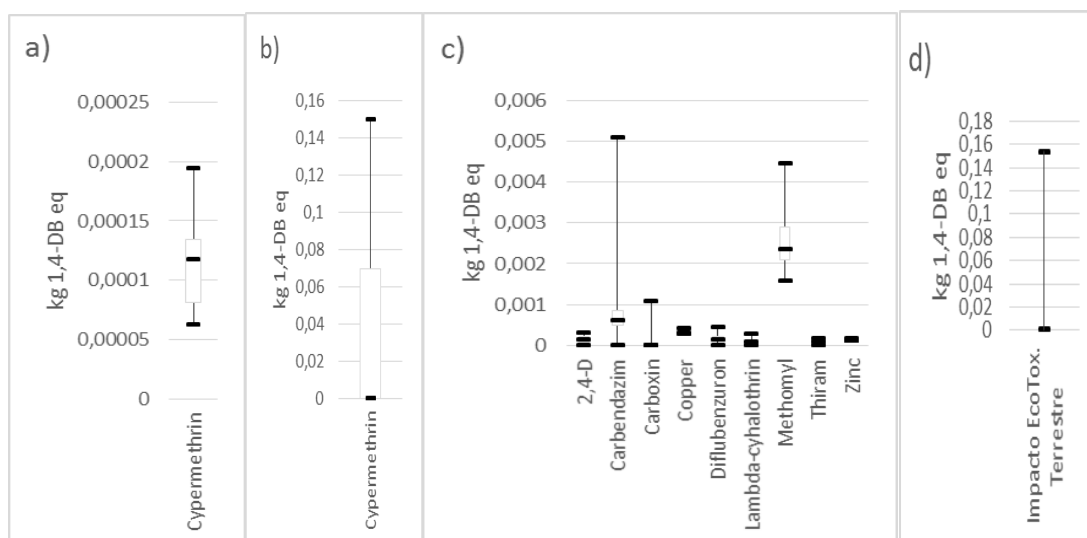
**Figura 42.** Cenários do sistema agrícola produção de soja com variações em suas entradas e saídas – método IMPACT 2002+; categoria de impacto Ecotoxicidade Terrestre.

De acordo com os resultados apresentados na Figura 42, são as emissões de metais pesados que contribuem, majoritariamente, para o potencial impacto em Ecotoxicidade Terrestre - uma parcela de 96,64% do impacto total. No entanto, nem todos os defensivos agrícolas aplicados apresentam fatores de caracterização, somente 11, de um total de 23 defensivos.

#### 4.4.4. Método ReCiPe

O método ReCiPe apresenta impacto em Ecotoxicidade subdivididos nas categorias: Ecotoxicidade Terrestre; Ecotoxicidade Água Doce; e Ecotoxicidade Marinha.

Na categoria Ecotoxicidade Terrestre, o método considera a ocorrência do impacto via compartimentos: água e solo. Estes correspondem a 0,13% e 99,62% do impacto total, respectivamente. A Figura 43 apresenta as principais substâncias promotoras do impacto, assim como sua variação entre as fazendas avaliadas.



**Figura 43.** Variação do potencial impacto ambiental entre as fazendas e principais substâncias promotoras do impacto na categoria Ecotoxicidade Terrestre via compartimentos: a) água; b) c) solo. d) impacto máximo e mínimo entre as fazendas.

O potencial impacto ambiental entre as fazendas apresenta uma grande variação (Figura 43 d). Enquanto uma fazenda apresenta um impacto mínimo de 0,001 kg 1,4-DB equivalente, outra fazenda, na mesma área considerada, apresenta potencial impacto 162 vezes maior, chegando a 0,15 kg 1,4-DB equivalente.

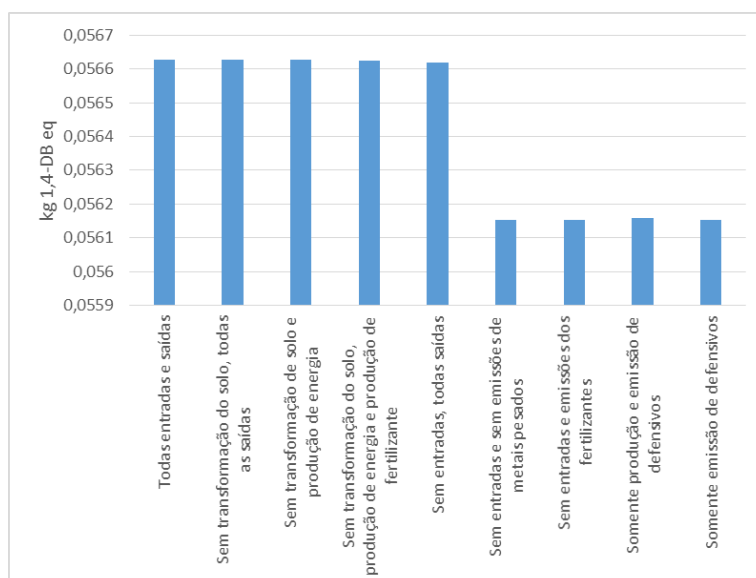
A Figura 43 aponta a cipermetrina como o principal responsável pelo impacto na categoria Ecotoxicidade Terrestre, com impacto médio de 0,05 kg 1,4-DB eq. Esta substância

corresponde a 94,13% do impacto total calculado. Outros defensivos também são apontados como contribuintes para o impacto, tais como: 2,4-D; carbendazim; diflubenzuron; lambda-cialotrina; metomil e tiran.

Os resultados do potencial impacto por fazenda indicam que o causado pela cipermetrina apresenta maior variação, com amplitude de variação de 0,15 kg 1,4-DB equivalente.

O método ReCiPe considera que os impactos em Ecotoxicidade Terrestre ocorrem, majoritariamente, devido ao uso de defensivos. Estes representam 98,95% do impacto total.

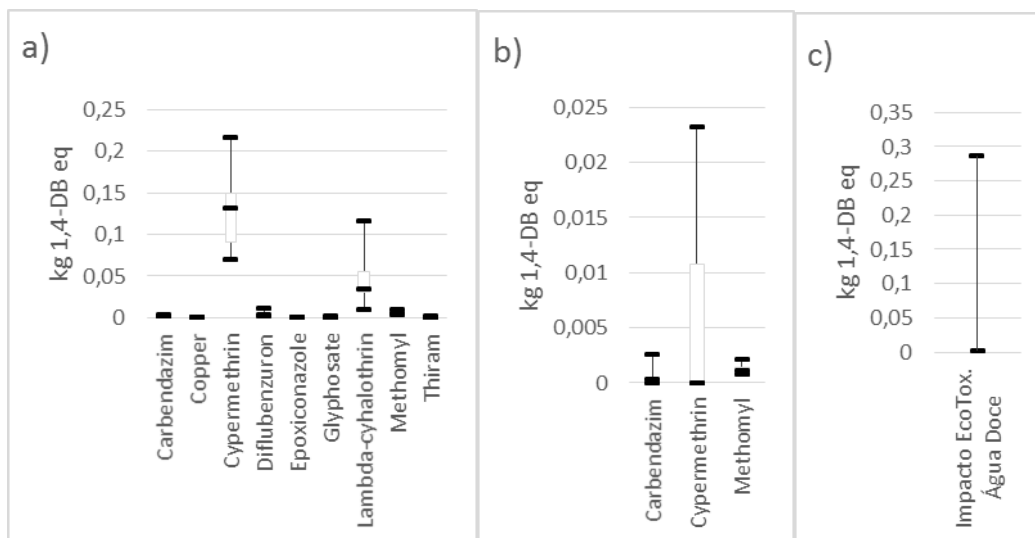
A Figura 44 apresenta a simulação do potencial impacto ambiental, na categoria Ecotoxicidade Terrestre, para avaliar a contribuição no impacto total de processos como: produção e emissão de fertilizantes, transformação do solo, produção de energia, entre outros processos pertencentes, direta ou indiretamente, ao sistema Produção de Soja.



**Figura 44.** Cenários do sistema agrícola produção de soja com variações em suas entradas e saídas – método ReCiPe; categoria de impacto Ecotoxicidade Terrestre.

De acordo com os resultados apresentados na Figura 44, o maior impacto, 99,16%, tem origem na emissão de defensivos agrícolas.

Na categoria Ecotoxicidade em Água Doce, o método considera que o impacto ocorre via compartimentos água e solo. A parcela de cada compartimento no impacto total é: 92,72% e 6,69% respectivamente. A Figura 45 apresenta as principais substâncias promotoras do impacto, assim como sua variação entre as fazendas avaliadas.



**Figura 45.** Variação do potencial impacto ambiental, entre as fazendas, e principais substâncias promotoras do impacto na categoria Ecotoxicidade em Água Doce via compartimentos: a) água; b) solo. c) impacto máximo e mínimo entre as fazendas.

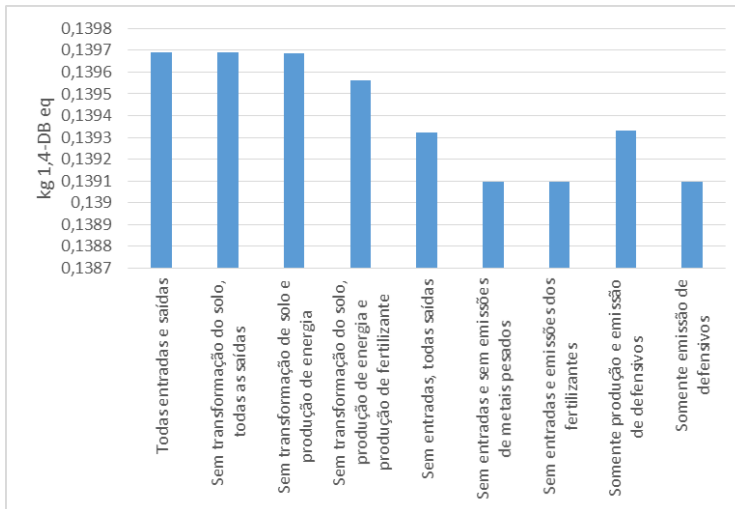
Para a categoria Ecotoxicidade em Água Doce, o potencial impacto ambiental entre as fazendas apresenta uma amplitude de variação de aproximadamente 0,28 kg 1,4-DB equivalente (Figura 45 c); há fazenda com um potencial impacto de 0,002 1,4-DB equivalente, enquanto outra que apresenta um potencial impacto de 0,29 1,4-DB equivalente

Na Figura 45, observa-se que o maior impacto é causado pelo defensivo cipermetrina via compartimento água, com um potencial impacto médio de 0,079 kg 1,4-DB equivalente. O lambda-cialotrina aparece como a segunda substância com maior impacto calculado pelo método. Outros defensivos também são apontados como contribuintes ao potencial impacto, tais como: carbendazim, diflubenzuron, epoxiconazol, glifosato, metomil e tiran.

A Figura 45 ainda mostra as substâncias que apresentam maior amplitude de variação do potencial impacto entre as fazendas: cipermetrina com variação de 0,15 kg 1,4-DB equivalente; e lambda-cialotrina com variação de 0,11 kg 1,4-DB equivalente.

Nota-se que as principais substâncias apresentadas como responsáveis pelo impacto em Ecotoxicidade em Água Doce são defensivos agrícolas, com exceção do cobre. No impacto calculado, 99,24% ocorre devido ao uso de defensivos no plantio de soja.

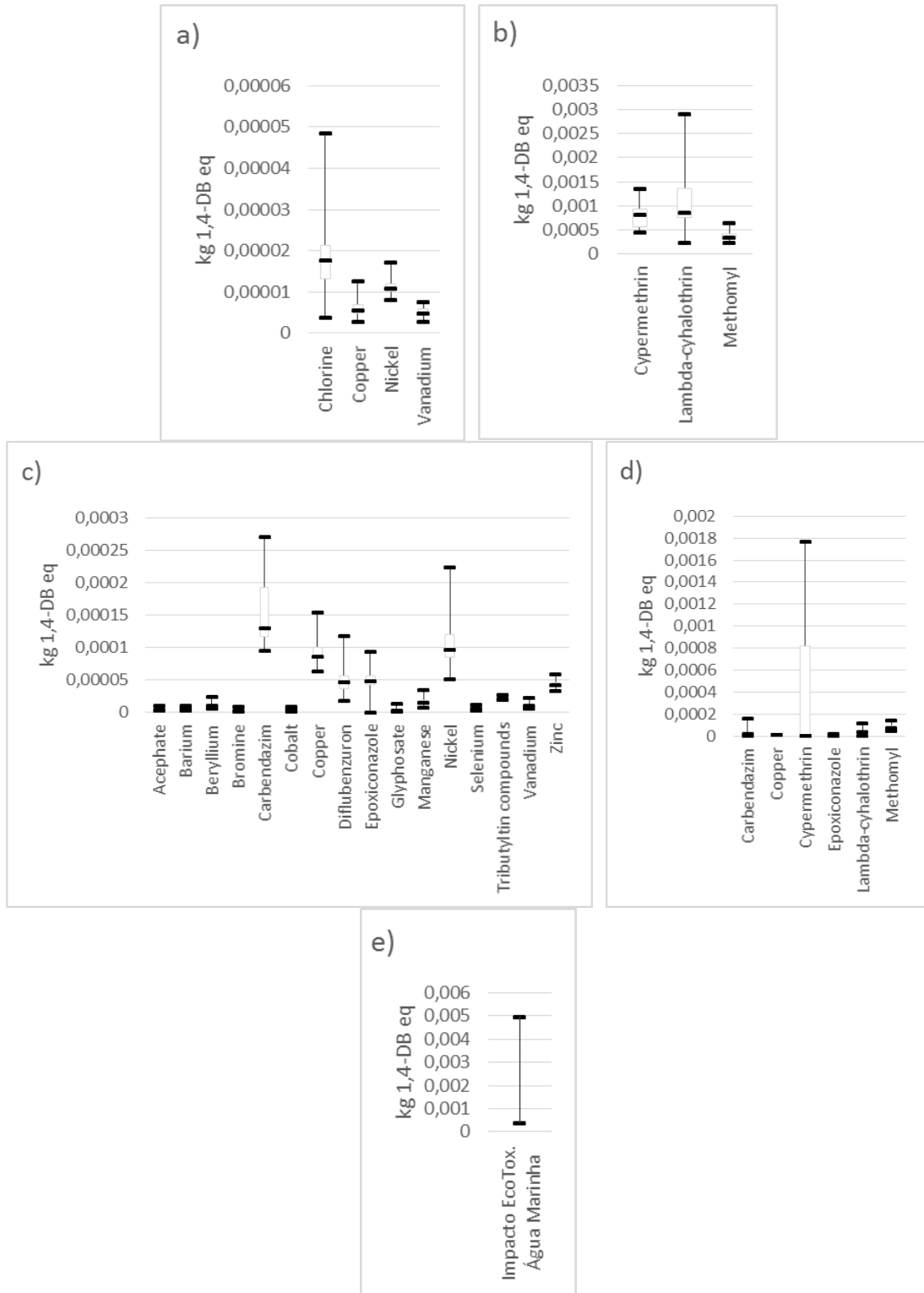
A Figura 46 apresenta a simulação do potencial impacto ambiental, na categoria Ecotoxicidade em Água Doce, para avaliar a contribuição no impacto total de processos como: produção e emissão de fertilizantes, transformação do solo, produção de energia, entre outros processos pertencentes, direta ou indiretamente, ao sistema Produção de Soja.



**Figura 46.** Cenários do sistema agrícola produção de soja com variações em suas entradas e saídas – método ReCiPe; categoria de impacto Ecotoxicidade Água Doce.

A comparação entre os cenários apresentados na Figura 46 aponta para a emissão de defensivos agrícolas como o maior contribuinte ao potencial impacto na categoria avaliada. Esta emissão corresponde a 99,6% do impacto total.

Na categoria Ecotoxicidade Marinha, o método considera a ocorrência do impacto via compartimentos: ar, água e solo. A parcela de representação de cada compartimento no impacto total é: 1,30%; 73,14%; e 24,96% respectivamente. A Figura 47 apresenta as principais substâncias promotoras do impacto, assim como sua variação entre as fazendas avaliadas.



**Figura 47.** Variação do potencial impacto ambiental, entre as fazendas, e principais substâncias promotoras do impacto na categoria Ecotoxicidade Marinha via compartimentos: a) ar; b) c) água; d) solo. e) impacto máximo e mínimo entre as fazendas.

O potencial impacto ambiental, na categoria Ecotoxicidade Marinha, apresenta uma variação entre as fazendas de 12,79 vezes, ou seja, varia de um potencial impacto mínimo de 0,0003 kg 1,4-DB equivalente, até 0,005 kg 1,4-DB equivalente.

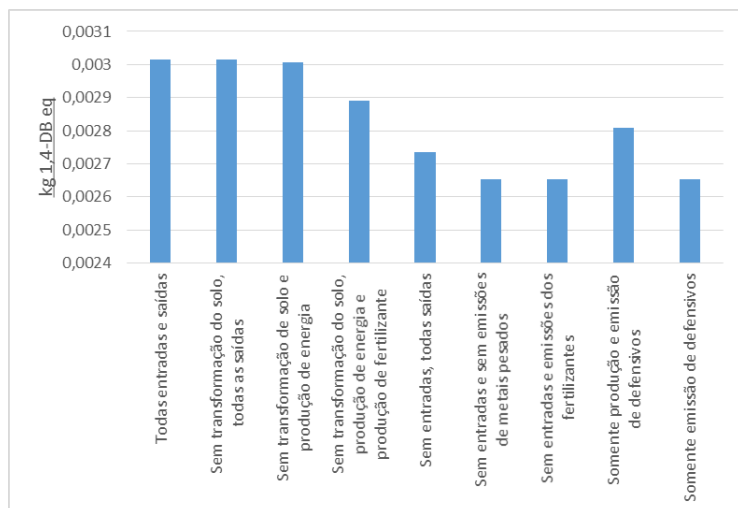


Os resultados de Ecotoxicidade Marinha apontados pelo método não apresentaram valores altos. As substâncias que apareceram como principais contribuintes foram: cipermetrina (0,001 kg 1,4-DB equivalente) e lambda-cialotrina (0,001 kg 1,4-DB equivalente).

Visto o baixo valor do impacto, a variação do potencial impacto ambiental também apresenta amplitudes baixas - na ordem de grandeza de  $10^{-3}$ .

Destaca-se ainda que este método considera que 87,79% do impacto total em água do mar tem origem no uso de defensivos agrícolas. Este resultado não se mostra coerente com a especificação geográfica do estudo, visto a longa distância da região Oeste do Paraná da costa.

A Figura 48 apresenta a simulação do potencial impacto ambiental, na categoria Ecotoxicidade em Água Marinha, para avaliar a contribuição no impacto total de processos como: produção e emissão de fertilizantes, transformação do solo, produção de energia, entre outros processos pertencentes, direta ou indiretamente, ao sistema Produção de Soja.



**Figura 48.** Cenários do sistema agrícola produção de soja com variações em suas entradas e saídas – método ReCiPe; categoria de impacto Ecotoxicidade Água Marinha.

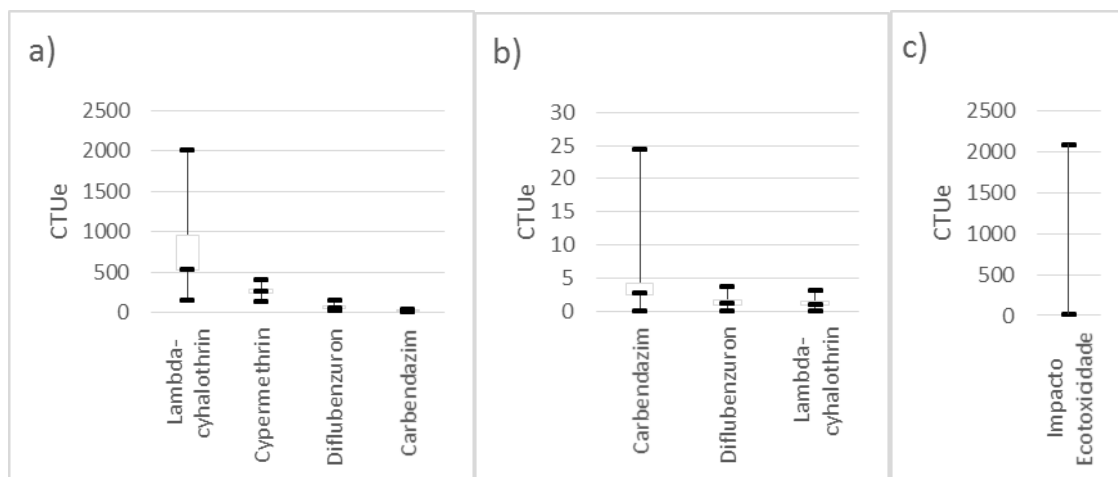
De forma análoga aos resultados calculados pelo ReCiPe para as categorias relacionadas à Ecotoxicidade, o maior promotor da Ecotoxicidade em Água Marinha também é a emissão de defensivos agrícola durante o plantio de soja. Esta emissão corresponde a 87,95% do potencial impacto total. A produção dos defensivos e fertilizantes contribuem minoritariamente ao impacto, representando 5,19% e 3,83%, respectivamente.

Este método, como exposto, aponta as emissões de defensivos agrícolas como o principal processo promotor do potencial impacto. Ressalta-se que para as referidas categorias há no método somente 14 fatores de caracterização disponíveis. Ou seja, 9 defensivos agrícolas não foram considerados no cálculo do potencial impacto ambiental.

#### 4.4.5. Método USEtox

O método USEtox mostra os resultados na categoria Ecotoxicidade em Água Doce. Os impactos apresentados pelo modelo se dão via compartimentos água e solo. Estes compartimentos representam 99,21 % e 0,62% do impacto total, respectivamente.

A Figura 49 apresenta as principais substâncias promotoras do impacto e sua variação entre as fazendas avaliadas.



**Figura 49.** Variação do potencial impacto ambiental entre as fazendas e principais substâncias promotoras do impacto na categoria Ecotoxicidade em Água Doce via compartimentos: a) água; b) solo. c) impacto máximo e mínimo entre as fazendas.

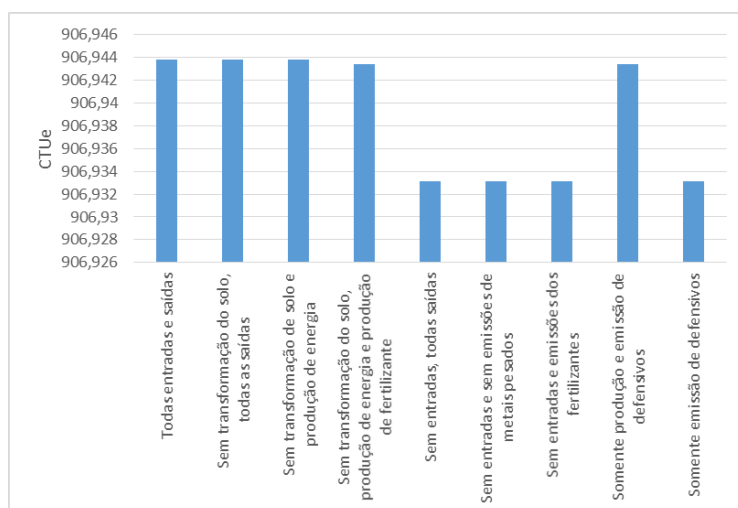
Na Figura 49 c, observa-se que o potencial impacto calculado pelo USEtox para a categoria Ecotoxicidade em Água Doce apresenta fazenda com impacto mínimo de 20,39 CTUe e outra com impacto máximo de 2.084,88 CTUe, uma diferença no impacto de 102 vezes entre as fazendas.

De acordo com os resultados da Figura 49, observa-se que o USEtox apresenta os defensivos agrícolas como responsáveis pelo potencial impacto em Ecotoxicidade em Água Doce, respondendo por 99,83% do impacto calculado.

A principal substância contribuinte para o impacto corresponde ao lambda-cialotrina, com potencial impacto médio de 660,60 CTUe, seguido da cipermetrina com potencial impacto médio de 149,71 CTUe. Outros defensivos também responsáveis pelo potencial impacto são: diflubenzuron e carbendazim.

Observa-se na Figura 49 - a cipermetrina maior contribuinte para potencial impacto, apresenta grande amplitude de variação entre as fazendas avaliadas. A variação apresenta amplitude de 1.852,54 CTUe.

A Figura 50 apresenta a simulação do potencial impacto ambiental na categoria Ecotoxicidade em Água Doce para avaliar a contribuição no impacto total de processos como: produção e emissão de fertilizantes, transformação do solo, produção de energia, entre outros processos pertencentes, direta ou indiretamente, ao sistema Produção de Soja.



**Figura 50.** Cenários do sistema agrícola produção de soja com variações em suas entradas e saídas – método USEtox; categoria de impacto Ecotoxicidade em Água Doce.

As simulações apresentadas na Figura 50 mostram que o processo com maior contribuição ao impacto total em Ecotoxicidade em Água Doce, calculado pelo modelo USEtox, constitui-se pela emissão de defensivos, com parcela de 99,99% do impacto total. Este método considerou 13 defensivos agrícolas para calcular este potencial impacto.

#### 4.5. CONSIDERAÇÕES SOBRE OS MÉTODOS

A simulação dos métodos pode ajudar na tomada de decisão apontando quais substâncias tem maior contribuição para o potencial impacto total. Nos resultados apresentados para a categoria relacionada à Toxicidade Humana, dos cinco métodos considerados as principais substâncias estão sumarizadas na Tabela 15.

**Tabela 15.** Principais substâncias promotoras do impacto ambiental no sistema da soja na região oeste do Paraná, para categorias referentes a toxicidade humana.

| Substâncias        | CML-IA | EDIP 2003 | Métodos      |        |        |
|--------------------|--------|-----------|--------------|--------|--------|
|                    |        |           | IMPACT 2002+ | ReCiPe | USEtox |
| 2,4-D              | X      |           |              | X      |        |
| Acefato            | X      |           | X            | X      | X      |
| Carbendazim        | X      |           |              | X      |        |
| Parationa metílica | X      | X         |              | X      |        |
| Cipermetrina       | X      | X         |              | X      |        |
| Metomil            | X      |           |              | X      |        |
| Glifosato          |        | X         |              |        |        |
| Diflubenzuron      |        |           |              | X      |        |
| Metil carbamato    |        |           |              |        | X      |

De acordo com a Tabela 15 temos que:

- quatro deles apresentam o acefato como contribuinte ao potencial impacto;
- três apresentam a cipermetrina e a parationa metílica como contribuinte ao potencial impacto.

A Tabela 16 apresenta, por métodos, qual o processo que mais contribuiu para o potencial impacto nas categorias referentes a toxicidade humana.

**Tabela 16.** Processos que mais contribuem para o potencial impacto nas categorias referentes a toxicidade humana.

| Processos                         | CML-IA | EDIP 2003 | IMPACT 2002+ | ReCiPe | USEtox |
|-----------------------------------|--------|-----------|--------------|--------|--------|
| <b>Transformação do solo</b>      |        |           |              |        |        |
| <b>Produção de Energia</b>        |        |           |              |        |        |
| <b>Produção de Fertilizantes</b>  |        |           | X            |        |        |
| <b>Produção de Defensivos</b>     | X      | X         | X            |        | X      |
| <b>Emissões de metais pesados</b> |        | X         | X            |        |        |
| <b>Emissões de fertilizantes</b>  |        |           |              |        |        |
| <b>Emissão de Defensivos</b>      | X      |           |              | X      | X      |

Observa-se na Tabela 16 que a produção de defensivos é o processo que os métodos apontam como maior contribuinte ao potencial impacto na referida categoria. Este processo é apontado pelo CML-IA, EDIP 2003, IMPACTO 2002+ e USEtox.

Para a categoria relacionada à Ecotoxicidade, os resultados obtidos com os métodos destacam:

**Tabela 17.** Principais substâncias promotoras do potencial impacto ambiental no sistema da soja na região oeste do Paraná, na categoria de ecotoxicidade.

| Substâncias        | CML-IA | EDIP 2003 | Métodos      |        |        |
|--------------------|--------|-----------|--------------|--------|--------|
|                    |        |           | IMPACT 2002+ | ReCiPe | USEtox |
| Cipermetrina       | X      | X         | X            | X      | X      |
| Carbendazim        | X      |           | X            | X      | X      |
| Glifosato          | X      | X         | X            | X      |        |
| Metomil            | X      |           | X            | X      |        |
| Parationa metílica | X      | X         |              |        |        |
| Tiran              | X      |           |              | X      |        |
| 2,4-D              | X      |           |              | X      |        |
| Acefato            | X      |           |              | X      |        |
| Lambda-cialotrina  |        | X         | X            | X      | X      |
| Diflubenzuron      |        |           |              | X      | X      |
| Epoxiconazol       |        |           |              | X      |        |

Na Tabela 17 temos que, para a categoria de ecotoxicidade:

- a cipermetrina é apontada por todos os métodos como impactante ao meio ambiente;
- o carbendazim, lambda-cialotrina e o glifosato são apontados por quatro métodos como contribuintes ao potencial impacto;
- o metomil é apontado por três métodos como contribuinte ao potencial impacto;

Isso mostra que os métodos, de uma certa forma, convergem para algumas substâncias com maior potencial de impacto, possibilitando a tomada de decisão em relação a qual substância deve ser destinado os maiores esforços de redução de impacto.

**Tabela 18.** Processos que mais contribuem para o potencial impacto nas categorias referentes a ecotoxicidade.

| Processos                  | CML-IA | EDIP 2003 | IMPACT 2002+ | ReCiPe | USEtox |
|----------------------------|--------|-----------|--------------|--------|--------|
| Transformação do solo      |        |           |              |        |        |
| Produção de Energia        |        |           |              |        |        |
| Produção de Fertilizantes  |        |           |              |        |        |
| Produção de Defensivos     | X      |           |              |        |        |
| Emissões de metais pesados |        |           | X            |        |        |
| Emissões de fertilizantes  |        |           |              |        |        |
| Emissão de Defensivos      | X      | X         |              | X      | X      |

Observa-se na Tabela 18 que os métodos indicam o processo Emissão de Defensivos como aquele que mais contribui para o potencial impacto total na categoria de ecotoxicidade.

Ressalta-se que os diferentes métodos não apresentaram variações no potencial impacto nas categorias referentes a toxicidade humana e ecotoxicidade quando se tratou de transformações do solo. Isso indica que este processo não é relevante dentro das categorias em destaque neste trabalho.

#### 4.6. FATORES DE CARACTERIZAÇÃO ADAPTADOS

Os fatores de caracterização adaptados ao contexto brasileiro, calculados com o modelo USEtox, estão apresentados nas Tabela 19 e Tabela 20.

**Tabela 19.** Fatores de Caracterização Adaptados ao contexto brasileiro – compartimentos Solo e Água.

| Categoria                                 | Substância           | Solo                        |                  |                |                  | Água           |                  |                |                  |
|---|----------------------|-----------------------------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|
|   |                      | Agrícola                    |                  | Natural        |                  | Oceano         |                  | Água Doce      |                  |
|   |                      | F.C. <sup>2</sup><br>Padrão | F.C.<br>adaptado | F.C.<br>Padrão | F.C.<br>adaptado | F.C.<br>Padrão | F.C.<br>adaptado | F.C.<br>Padrão | F.C.<br>adaptado |
| Tox. <sup>1</sup> Humana<br>- Cancerígeno | Benzeno              | 1,29E-07                    | 8,03E-08         | 1,08E-07       | 4,33E-08         | 2,49E-08       | 7,79E-09         | 2,42E-07       | 1,42E-07         |
|   | Formaldeido          | 2,88E-07                    | 8,05E-08         | 2,76E-07       | 6,71E-08         | 1,31E-09       | 4,01E-10         | 1,24E-07       | 3,95E-08         |
|   | Nitrobenzeno         | 2,67E-07                    | 2,90E-07         | 1,75E-07       | 1,14E-07         | 1,59E-08       | 7,73E-09         | 1,14E-06       | 5,55E-07         |
|   | Acefato              | 1,26E-07                    | 3,00E-08         | 1,00E-07       | 2,83E-08         | 4,64E-11       | 5,04E-11         | 2,49E-07       | 6,20E-08         |
|   | Clorobenzeno         | 4,34E-08                    | 3,24E-08         | 3,48E-08       | 1,61E-08         | 4,89E-09       | 1,95E-09         | 8,43E-08       | 4,79E-08         |
|   | 1,2 dicloroetano     | 5,70E-07                    | 6,91E-07         | 2,89E-07       | 2,35E-07         | 5,30E-08       | 2,80E-08         | 1,60E-06       | 1,23E-06         |
| Tox. Humana -<br>Não<br>Cancerígeno       | Metil<br>Carbamato   | 3,17E-07                    | 2,47E-07         | 2,20E-07       | 1,22E-07         | 1,98E-10       | 1,76E-10         | 7,90E-07       | 3,27E-07         |
|   | Acefato              | 3,51E-04                    | 1,49E-04         | 2,79E-04       | 7,87E-05         | 1,29E-07       | 1,40E-07         | 6,93E-04       | 1,73E-04         |
|   | Clorobenzeno         | 4,50E-08                    | 3,35E-08         | 3,61E-08       | 1,67E-08         | 5,06E-09       | 2,02E-09         | 8,73E-08       | 4,96E-08         |
|   | Benzeno              | 2,05E+00                    | 2,94E+00         | 1,30E-01       | 3,72E-03         | 6,60E+01       | 5,35E+01         | 6,38E-02       | 2,23E-02         |
| Ecotoxicidade                             | Formaldeido          | 8,40E+01                    | 4,34E+01         | 2,44E-02       | 1,89E-02         | 2,97E+02       | 1,19E+02         | 2,60E+01       | 1,56E+01         |
|   | Nitrobenzeno         | 1,25E+01                    | 1,15E+01         | 3,09E-01       | 1,18E-01         | 1,79E+02       | 9,39E+01         | 0,00E+00       | 0,00E+00         |
|   | Acefato              | 2,52E+02                    | 6,84E+01         | 1,91E-07       | 8,87E-08         | 6,27E+02       | 1,50E+02         | 0,00E+00       | 0,00E+00         |
|   | Clorobenzeno         | 6,54E+00                    | 9,69E+00         | 7,51E-02       | 2,40E-02         | 3,93E+02       | 3,17E+02         | 8,42E-01       | 3,60E-01         |
|   | Lambda<br>Cialotrina | 1,34E+05                    | 4,21E+04         | 3,93E+03       | 6,47E+02         | 1,39E+08       | 2,41E+07         | 5,76E+05       | 3,19E+04         |
|   | Cipermetrina         | 7,01E+04                    | 2,48E+04         | 1,08E+03       | 1,98E+02         | 5,04E+07       | 8,78E+06         | 3,82E+05       | 2,63E+04         |
|   | Diflubenzuron        | 1,70E+05                    | 5,19E+04         | 9,85E+00       | 2,88E+00         | 1,20E+07       | 1,54E+06         | 2,04E+05       | 3,00E+04         |
| Carberndazim                              | 5,46E+04             | 2,69E+04                    | 4,77E-04         | 4,87E-04       | 7,41E+05         | 1,78E+05       | 6,34E+03         | 4,92E+03       |                  |

1 – Toxicidade; 2 – Fatores de Caracterização.

**Tabela 20.** Fatores de Caracterização Adaptados ao contexto brasileiro – compartimento Ar.

| Categori<br>a                             | Substância       | Ar                          |                  |                |                  |                         |                  |                 |                  |
|---|------------------|-----------------------------|------------------|----------------|------------------|-------------------------|------------------|-----------------|------------------|
|   |                  | Estratosfera + Troposfera   |                  | Alta População |                  | Baixa Pop., longo prazo |                  | Baixa População |                  |
|   |                  | F.C. <sup>2</sup><br>Padrão | F.C.<br>adaptado | F.C.<br>Padrão | F.C.<br>adaptado | F.C.<br>Padrão          | F.C.<br>adaptado | F.C.<br>Padrão  | F.C.<br>adaptado |
| Tox. <sup>1</sup> Humana<br>- Cancerígeno | Benzeno          | 1,20E-07                    | 4,34E-08         | 4,70E-07       | 3,98E-07         | 1,20E-07                | 4,34E-08         | 1,20E-07        | 4,34E-08         |
|   | Formaldeido      | 1,39E-06                    | 3,17E-07         | 2,54E-05       | 2,42E-05         | 1,39E-06                | 3,17E-07         | 1,39E-06        | 3,17E-07         |
|   | Nitrobenzeno     | 5,09E-07                    | 2,09E-07         | 1,60E-06       | 1,30E-06         | 5,09E-07                | 2,09E-07         | 5,09E-07        | 2,09E-07         |
|   | Acefato          | 1,32E-07                    | 3,00E-08         | 1,93E-07       | 9,55E-08         | 1,32E-07                | 3,00E-08         | 1,32E-07        | 3,00E-08         |
|   | Clorobenzeno     | 4,89E-08                    | 2,04E-08         | 1,61E-07       | 1,33E-07         | 4,89E-08                | 2,04E-08         | 4,89E-08        | 2,04E-08         |
|   | 1,2 dicloroetano | 2,43E-07                    | 1,33E-07         | 5,87E-07       | 4,77E-07         | 2,43E-07                | 1,33E-07         | 2,43E-07        | 1,33E-07         |
| Tox. Humana -<br>Não<br>Cancerígeno       | Metil Carbamato  | 3,95E-07                    | 1,43E-07         | 8,49E-07       | 5,99E-07         | 3,95E-07                | 1,43E-07         | 3,95E-07        | 1,43E-07         |
|   | Acefato          | 3,68E-04                    | 8,36E-05         | 5,38E-04       | 2,66E-04         | 3,68E-04                | 8,36E-05         | 3,68E-04        | 8,36E-05         |
|   | Clorobenzeno     | 5,06E-08                    | 2,12E-08         | 1,67E-07       | 1,37E-07         | 5,06E-08                | 2,12E-08         | 5,06E-08        | 2,12E-08         |
|   | Benzeno          | 6,42E-02                    | 2,29E-02         | 6,38E-02       | 2,23E-02         | 6,38E-02                | 2,23E-02         | 6,40E-02        | 2,23E-02         |
|   | Formaldeido      | 2,76E+01                    | 1,62E+01         | 2,60E+01       | 1,56E+01         | 2,60E+01                | 1,56E+01         | 2,68E+01        | 1,56E+01         |
|   | Nitrobenzeno     | 1,10E+01                    | 4,07E+00         | 1,09E+01       | 4,00E+00         | 0,00E+00                | 0,00E+00         | 0,00E+00        | 0,00E+00         |
| Ecotoxicidade                             | Acefato          | 1,07E+02                    | 3,63E+01         | 1,06E+02       | 3,68E+01         | 0,00E+00                | 0,00E+00         | 0,00E+00        | 0,00E+00         |
|   | Clorobenzeno     | 8,50E-01                    | 3,70E-01         | 8,42E-01       | 3,60E-01         | 8,42E-01                | 3,60E-01         | 8,46E-01        | 3,60E-01         |
|   | Lambda           |                             |                  |                |                  |                         |                  |                 |                  |
|   | Cialotrina       | 1,87E+06                    | 2,96E+05         | 5,76E+05       | 3,19E+04         | 5,76E+05                | 3,19E+04         | 1,22E+06        | 3,19E+04         |
|   | Cipermetrina     | 9,86E+05                    | 1,57E+05         | 3,82E+05       | 2,63E+04         | 3,82E+05                | 2,63E+04         | 6,84E+05        | 2,63E+04         |
|   | Diflubenzuron    | 3,60E+05                    | 5,57E+04         | 2,04E+05       | 3,00E+04         | 2,04E+05                | 3,00E+04         | 2,82E+05        | 3,00E+04         |
| Carberndazim                              | 1,54E+04         | 8,09E+03                    | 6,34E+03         | 4,92E+03       | 6,34E+03         | 4,92E+03                | 1,09E+04         | 4,92E+03        |                  |

1 – Toxicidade; 2 – Fatores de Caracterização.



Observa-se na comparação entre os fatores de caracterização padrão do USEtox e aqueles calculados com informações brasileiras que estes últimos apresentam valores menores que os primeiros, ou seja, os fatores de caracterização, adaptados ao contexto brasileiro, são inferiores àqueles calculados com informações europeias. De acordo com as Tabela 19 e Tabela 20, a diferença entre os fatores de caracterização compreende a casa de uma ordem de magnitude.

Estas diferenças são mais evidentes quando se avalia a categoria de impacto Ecotoxicidade, observe:

- o Fator de Caracterização padrão do USEtox para a substância benzeno, no compartimento Solo Natural é 35 vezes maior do que o fator de caracterização adaptado ao contexto brasileiro;
- o fator de caracterização padrão do USEtox para a substância lambda cialotrina é 18 vezes maior que o fator de caracterização adaptado ao contexto brasileiro para os compartimentos Água Doce, Ar em Alta População e Baixa População no longo prazo. Porém chega a ser 38 vezes maior quando comparados os fatores de caracterização para baixa população;
- os fatores de caracterização padrão do USEtox para a cipermetrina são 15 vezes superiores àqueles adaptados ao contexto brasileiro para os compartimentos Água Doce, Ar Alta População e Baixa População no longo prazo. Para o compartimento Ar em Baixa População essa diferença sobe para 26 vezes.

Essas grandes diferenças entre os fatores de caracterização irão repercutir no potencial impacto ambiental causado pela produção de soja. Espera-se, com o exposto, que o potencial impacto ambiental calculado com os fatores de caracterização adaptados ao contexto brasileiro seja inferior àquele apresentado nas seções 4.3.5 e 4.4.5

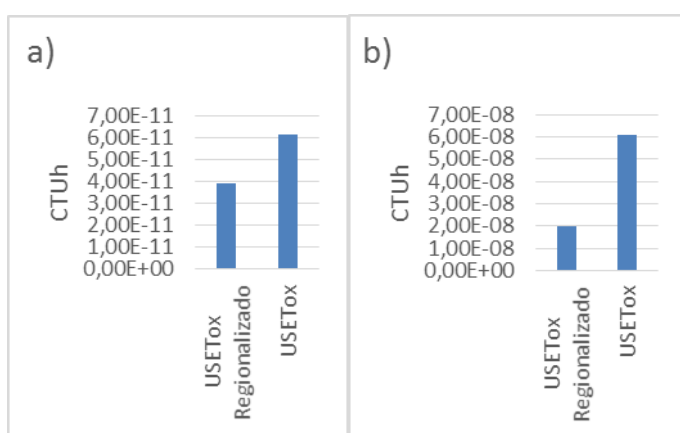
#### 4.7. AVALIAÇÃO DO IMPACTO COM FATORES DE CARACTERIZAÇÃO REGIONALIZADOS

Nas seções 4.3.5 e 4.4.5 foram apresentadas as avaliações do potencial impacto para as categorias referentes à toxicidade, considerando os fatores de caracterização padrão do USEtox. Estes fatores de caracterização são referentes ao continente Europeu. Nesta seção, considera-se o potencial impacto tendo por escopo informações brasileiras, ou seja, a avaliação

do potencial impacto é realizada com o emprego de fatores de caracterização adaptados para o Brasil.<sup>2</sup>

#### 4.7.1. Avaliação do Impacto em Toxicidade Humana

A Figura 51 apresenta o potencial impacto ambiental para toxicidade humana calculado, tanto pelos fatores de caracterização padrão do USEtox, como com aqueles adaptados ao contexto brasileiro.



**Figura 51.** Comparação do potencial impacto ambiental calculado pelos fatores de caracterização padrão do USEtox e os fatores regionalizados: a) toxicidade humana câncer; b) toxicidade humana não câncer.

Os resultados apresentados na Figura 51 mostram que o potencial impacto ambiental, tanto para a categoria Toxicidade Humana com Efeitos Cancerígenos como para Toxicidade Humana com Efeitos Não Cancerígenos, são menores do que aqueles calculados com emprego dos fatores de caracterização padrão do USEtox.

Para a categoria Toxicidade Humana com Efeitos Cancerígenos o USEtox com os fatores de caracterização adaptados obteve-se um potencial impacto de 3,90E-11 CTUh, contra um potencial impacto de 6,14E-11 CTUh, calculado com o modelo padrão. Isso mostra uma redução de 36,5% no potencial impacto ambiental.

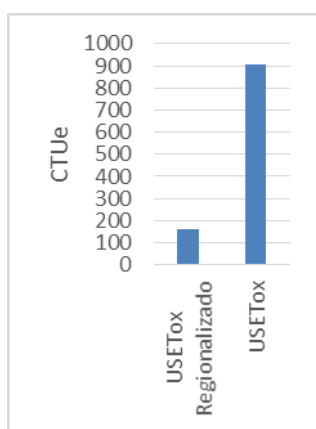
Para a categoria Toxicidade Humana com Efeitos Não Cancerígenos o potencial impacto ambiental calculado com os fatores de caracterização adaptados foi de 2,01E-08 CTUh. O modelo com suas informações padrão apresentou um potencial impacto de 6,12E-08 CTUh. Isso indica uma diferença de 67,1% no impacto calculado.

<sup>2</sup> Nesta seção será apresentado somente o potencial impacto ambiental total. As principais substâncias e os processos responsáveis pelo impacto continuam sendo aqueles apresentados nas seções 4.3.5 e 4.4.5.

Dessa forma, ressalta-se a necessidade de obter fatores de caracterização regionalizados para o Brasil, pois há uma grande diferença entre os impactos calculados, chegando a discrepâncias de quase 70% no impacto calculado.

#### 4.7.2. Avaliação do Impacto em Ecotoxicidade

A Figura 52 apresenta o potencial impacto ambiental calculado pelo modelo USEtox com o emprego dos fatores de caracterização adaptados ao contexto brasileiro.



**Figura 52.** Comparação do potencial impacto ambiental calculado pelos fatores de caracterização padrão do USEtox e os fatores regionalizados para Ecotoxicidade.

Os resultados apresentados (Figura 52) mostram uma diferença significativa entre o potencial impacto ambiental calculado pelo USEtox, com as informações do continente europeu e o potencial impacto calculado com informações referentes ao Brasil. O último apresentou um potencial impacto de 158,53 CTUe, contra um potencial impacto de 906,94 CTUe (USEtox padrão). Estes valores indicam que há uma diferença de 82,52% entre os potenciais impactos apresentados.

Assim como para as categorias de Toxicidade Humana, para Ecotoxicidade em Água Doce o potencial impacto ambiental calculado com o emprego de fatores de caracterização adaptados ao Brasil apresentou valor de impacto inferior expressivo daquele calculado com o modelo em suas configurações padrões, reforçando a importância de se realizar avaliações de impacto com o emprego de fatores de caracterização que descrevam as situações encontradas no Brasil.

## CONCLUSÃO

A análise do inventário revelou a expressiva diversidade de defensivos agrícolas que são aplicados no plantio de soja para o controle de pragas e doenças. Alguns desses produtos são classificados como portadores de alto potencial de toxicidade e elevada periculosidade ao meio ambiente. Ressalte-se: dentre os defensivos aplicados, existem aqueles que são proibidos internacionalmente. Devido às próprias características do sistema agrícola, há grande dispersão desses produtos, atingindo principalmente ecossistemas, comprometendo assim a qualidade dos últimos.

Nesta pesquisa observou-se a importância da construção de inventários para o sistema agrícola regionalizados com o objetivo de se aproximar dos impactos reais do sistema. Comparações entre inventários mostram grandes variações entre as quantidades de insumos apresentadas. Ressalte-se ainda, as diferenças entre os ingredientes ativos que são aplicados, com formas de ação diferentes e potenciais de toxicidade diferentes.

Outro ponto que corrobora a importância da construção de inventários agrícolas regionalizados corresponde à variação existente no impacto ambiental entre fazendas dentro da região considerada - Oeste do Paraná. Isso mostra que dentro de uma pequena região já existe significativa variação do impacto ambiental. Consequentemente, em um inventário como por exemplo da região Sul, ou um com amplitude nacional, a variação do impacto se torna ainda maior. Nesse caso, o resultado do impacto ambiental terá embutido um grau maior de incerteza.

Os métodos utilizados para avaliar o impacto ambiental do sistema agrícola apontam um elevado impacto nas categorias referentes à toxicidade, principalmente para a Ecotoxicidade. Dentre os métodos, há a seguinte convergência dos resultados:

- categoria Toxicidade Humana - resultados apontam três pontos principais como contribuintes ao impacto: produção de defensivos agrícolas, emissão de defensivos agrícolas e emissão de metais pesados;
- categoria Ecotoxicidade: os métodos convergem para a emissão de defensivos agrícolas como sendo o maior contribuinte ao potencial impacto ambiental.

Deve-se ressaltar também que a modelagem dos métodos não considera a emissão direta dos defensivos agrícolas. Dessa forma, o grau de incerteza nos resultados possivelmente venha a ser maior. Significa dizer que o impacto real dos defensivos agrícolas pode ser maior do que o estimado pelos métodos.

O método mais indicado para realizar a avaliação do impacto ambiental revelou ser o USEtox. Para essa escolha ressalta-se a possibilidade de customização apresentada pelo

método. Dessa forma, com o levantamento das informações necessárias, obteve-se fatores de caracterização adaptados ao contexto brasileiro.

Os fatores de caracterização calculados para as categorias relacionadas à toxicidade com informações brasileiras apresentaram valores inferiores daquele padrão do USEtox. Por conseguinte, o potencial impacto ambiental do sistema agrícola de produção de soja na região Oeste do Paraná apresentou valores menores.

Estes resultados de potencial impacto ambiental do sistema considerado aproximam-se mais da realidade e oferecem melhor base para tomada de decisões. Os resultados mostraram significativa necessidade em realizar as avaliações de impacto ambiental com fatores de caracterização regionalizados. As avaliações com fatores de caracterização de outras regiões não irão representar a realidade observada, dessa forma o grau de incerteza nos resultados será relevante, prejudicando as tomadas de decisões que possam ocorrer com base nos resultados de perfil ambiental.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2013**. Brasília, 2013. Disponível em [http://arquivos.ana.gov.br/institucional/spr/conjuntura/webSite\\_relatorioConjuntura/projeto/index.html](http://arquivos.ana.gov.br/institucional/spr/conjuntura/webSite_relatorioConjuntura/projeto/index.html). Acesso em 10 de outubro de 2014.

AGRI-FOOTPRINT. Base de Dados versão 1.0. Gouda, Netherlands, 2014. Disponível no software SimaPro.

BEN, *Balanço Energético Nacional*. Elaborado pelo Ministério de Minas e Energia do Brasil, 2005. Disponível em <https://ben.epe.gov.br/>. Acesso em 07 de maio de 2013.

BONGIOVANNI, R. Precision Agriculture and Sustainability. **Precision Agriculture**, v. 5, p. 359-387, 2004.

BORÉM, A.; GIUDICE, M. P. del; QUEIROZ, D. M. de; MANTOVANI, E. C.; FERREIRA, L. R.; VALLE, F. X. R. do; GOMIDE, R. L. (Ed.). **Agricultura de precisão**. Viçosa, MG: UFV, Embrapa Milho e Sorgo, 2000.

CAVALETT, O. ORTEGA, E. Energy, nutrients balance, and economic assessment of soybean production and industrialization in Brazil. **Journal of Cleaner Production**. v 17, p. 762-771, 2009.

CAVALETT, O. ORTEGA, E. Integrated environmental assessment of biodiesel production from soybean in Brazil. **Journal of Cleaner Production**. v 18, p. 55-70, 2010.

COELHO, J. P. C.; SILVA, J. R. M. **Agricultura de Precisão**. Instituto Superior de Estatística e Gestão de Informação. Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, 2009.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira – Grãos. v. 2 – safra 2014/15, n.3 – terceiro levantamento, 2013**. Disponível em [http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/14\\_12\\_10\\_08\\_51\\_33\\_boletim\\_graos\\_dezembro\\_2014.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/14_12_10_08_51_33_boletim_graos_dezembro_2014.pdf). Acesso em 15 de dezembro de 2014.

EC- JRC, ILCD Handbook. **Framework and Requirements for LCIA models and indicators**. 2010. Disponível em <http://ict.jrc.ec.europa.eu>. Acesso em 23 de setembro de 2014.

EC- JRC, ILCD Handbook. **Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context**. 2011. Disponível em <http://ict.jrc.ec.europa.eu>. Acesso em 24 de setembro de 2014.

ECOINVENT. Base de Dados versão 3.01. 2013. Disponível no software SimaPro.

EMBRAPA. **Agricultura de Precisão para o manejo da fertilidade do solo em sistema plantio direto**. Ed: Pedro L. O. A. Machado, Alberto C. C. Bernardi e Carlos A. Silva. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004.

EMBRAPA. **Agricultura de Precisão: manejo da variabilidade espacial e temporal dos solos e culturas**. Antônio Marcos Coelho (Ed.). Embrapa Milho e Sorgo: Sete Lagoas, 2005.

EMBRAPA. **Tecnologias de Produção de Soja – região central do Brasil 2012 e 2013**. Londrina: Embrapa Soja, 2011.

European Commission Joint Research Centre. Institute for Health and Consumer Protection. Disponível em <http://edexim.jrc.it/>. Acesso em 29 de novembro de 2014.

European Commission. Health & Consumer Protection Directorate - General. Directive 79/117/EEC, Council Regulation 805/2004/EC, Directive 91/414/EEC and regulation (EC) of the European Parliament and of the Council No. 689/2008. Disponível em [http://ec.europa.eu/food/plant/protection/evaluation/exist\\_subs\\_rep\\_en.htm](http://ec.europa.eu/food/plant/protection/evaluation/exist_subs_rep_en.htm). Acesso em 29 de novembro de 2014.

GOEDKOOOP, M.J.; HEIJUNGS, R.; HUIJBREGTS, M.A.J.; DE SCHRYVER, A.M.; STRUIJS, J.; VAN ZELM, R. **ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level; First edition Report I: Characterisation**. 6 January 2009. Disponível em [http://www.leidenuniv.nl/cml/ssp/publications/recipe\\_characterisation.pdf](http://www.leidenuniv.nl/cml/ssp/publications/recipe_characterisation.pdf). Acesso em 13 de janeiro de 2014.

GUINÉE, J.B.; GORRÉE, M.; HEIJUNGS, R.; HUPPES, G.; KLEIJN, R.; KONING, A. DE; OERS, L. VAN; WEGENER SLEESWIJK, A.; SUH, S.; UDO DE HAES, H.A.; BRUIJN, H. DE; DUIN, R. VAN; HUIJBREGTS, M.A.J. **Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. Part III: Scientific background**. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2002.

HENDERSON, A. D.; HAUSCHILD, M. Z.; MEENT, D.; HUIJBREGTS, M. A. J.; LARSEN, H. F.; MARGNI, M.; MCKONE, T.E.; PAYET, J.; ROSENBAUM, R. K.; JOLLIET, O. USEtox fate and ecotoxicity factors for comparative assessment of toxic emissions in life cycle analysis: sensitivity to key chemical properties. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v.16, p. 701-709, 2011.

HUIJBREGTS, M.; HAUSCHILD, M.; JOLLIET, O.; MARGNI, M.; MCKONE, T.; ROSENBAUM, R. K.; MEENT, D. **USEtox User manual**. USEtox Team, 2010.

HUMBERT S.; SCHRYVER, A. D.; BENGEOA, X.; MARGNI, M.; JOLLIET, O. **IMPACT 2002+: User Guide Draft for version Q2.21**. Quantis Sustainability counts, 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Senso 2007. Disponível em: [http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/contagem2007/contagem\\_final/tabela1\\_1.pdf](http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/contagem2007/contagem_final/tabela1_1.pdf). Acesso em 20 de outubro de 2014.

INSTITUTO DE ÁGUA DO PARANÁ – ÁGUAS PARANÁ – site. Disponível em <http://www.aguaparana.pr.gov.br/>. Acesso em 02 de julho de 2013.

INSTITUTO DE TERRAS, CARTOGRAFIA E GEOCIÊNCIAS – ITCG - site. Disponível em <http://www.itcg.pr.gov.br/>. Acesso em 12 de junho de 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. Disponível em [http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=rede\\_estacoes\\_auto\\_graf](http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=rede_estacoes_auto_graf). Acesso em 25 de outubro de 2014.

INSTITUTO PARANAENSE DE ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL – EMATER - site. Disponível em <http://www.emater.go.gov.br/w/5839>. Acesso em 20 de outubro de 2014.

ISO 14040. **Environmental management – Life Cycle Assessment – Principles and Frameworks**. 2 ed. Switzerland, 2006.

JOLLIET, O.; MARGNI, M.; CHARLES, R.; HUMBERT, S.; PAYET, J.; REBITZER, G.; ROSENBAUM, R. IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v.8, n.6, p.324 – 330, 2003.

LEWIS, K. A.; NEWBOLD, M. J.; TZILIVAKIS, J. Developing an emissions inventory from farm data. **Journal of Environmental Management**, v. 55, p. 183-197, 1999.

MARZULLO, R. C. M. **Análise de ecoeficiência dos óleos vegetais oriundos da soja e palma, visando a produção de biodiesel**. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de São Paulo, São Paulo, São Paulo, 2007.

MEYER, E. D.; CEDERBERG, C. **Pesticide use and glyphosate – resistant weeds – a case study of Brazilian soybean production**. SIK Rapport, n. 809, 2010.

MOURAD, A.L. **Avaliação da Cadeia Produtiva de biodiesel obtido a partir da soja**. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2008

NEMECEK, T.; SCHNETZER, J. **Methods of assessment of direct field emissions for LCIs of agricultural production systems**. Agroscope Reckenholz-Tänikon Research Station ART, Zurich, 2011



PADUA, F. T. *et al.* Produção de matéria seca e composição químico-bromatológica do feno de três leguminosas forrageiras tropicais em dois sistemas de cultivo. **Ciência Rural**, v. 36, n. 4, p. 1253 – 1257, 2006.

PEGORARO. L. **Desenvolvimento de fatores de caracterização para toxicidade humana em avaliação do impacto do ciclo de vida no Brasil**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Mecânica e de Materiais. UTFPR, fevereiro, 2008.

Pesticide Action Network. Dirty Dozen pesticides. Disponível em [http://www.pesticideinfo.org/Docs/ref\\_toxicity7.html#DirtyDozen](http://www.pesticideinfo.org/Docs/ref_toxicity7.html#DirtyDozen). Acesso em 30 de novembro de 2014.

POTTING, J; HAUSCHILD, M. **Background for spatial differentiation in LCA impact assessment - The EDIP2003 methodology**. Institute for Product Development Technical University of Denmark. Environmental Project No. 996, 2005a.

POTTING, J; HAUSCHILD, M. **Spatial differentiation in Life Cycle impact assessment - The EDIP2003 methodology**. Institute for Product Development Technical University of Denmark. Environmental news No. 80, 2005b.

PROGRAMA NACIONAL DE PRODUÇÃO E USO DE BIODIESEL NO BRASIL – PNPB – site. Disponível em <http://www.mme.gov.br/programas/biodiesel>. Acesso em 03 de outubro de 2014.

PROGRAMA NACIONAL DE PRODUÇÃO E USO DO BIODIESEL – PNPB – site. Disponível em <http://www.mme.gov.br/programas/biodiesel>. Acesso em 25 de novembro de 2014.

ROCHAT, D., MARGNI, M. AND JOLLIET, O. Continent-specific Intake Fractions and Characterization Factors for Toxic Emissions: Does it make a Difference? **International Journal of Life Cycle Assessment**. v.11, special issue 1, p.55-63, 2006.

ROSENBAUM, R.K.; BACHMANN, T.M.; GOLD L.S.; HUIJBREGTS, M.A.J.; JOLLIET, O.; JURASKE, R.; KOEHLER, A.; LARSEN, H.F.; MACLEOD, M.; MARGNI, M.; MCKONE, T.E.; PAYET, J.; SCHUHMACHER, M.; van de MEENT, D.; HAUSCHILD, M.Z. USEtox – the UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterization factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment. **International Journal of Life Cycle Assessment**. v. 13, n.7, p.532-546, 2008.

ROSENBAUM, R.K.; HUIJBREGTS, M.A.J.; HENDERSON, A.D.; MARGNI, M.; MCKONE, T.E.; VAN DE MEENT, D.; HAUSCHILD, M.Z.; SHAKED, S.; LI, D.S.; GOLD, L.S.; JOLLIET, O. USEtox human exposure and toxicity factors for comparative assessment of toxic emissions in life cycle analysis: sensitivity to key chemical properties. **International Journal of Life Cycle Assessment**. v.16, n.8, p. 710-727, 2011.

SHEEHAN, J.; CAMOBRECO, V.; DUFFIELD, J.; GRABOSKI, M.; SHAPOURI, H. **Life Cycle Inventory of Biodiesel and Petroleum Diesel for Use in an Urban Bus**. Final Report. National Renewable Energy Laboratory, Colorado, 1998.

SILVA, A. C.; LIMA, E. P. C.; BATISTA, H. R. **A importância da soja para o agronegócio brasileiro: uma análise sob o enfoque da produção, emprego e exportação**. Disponível em: [http://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=soja%20importancia%20nacional&source=web&cd=2&cad=rja&ved=0CDwQFjAB&url=http%3A%2F%2Fwww.apec.unesc.net%2FV\\_EEC%2Fsessoes\\_tematicas%2FEconomia%2520rural%2520e%2520agricultura%2520familiar%2FA%2520IMPORT%25C3%2582NCIA%2520DA%2520SOJA%2520PARA%2520O%2520AGRONEG%25C3%2593CIO%2520BRASILEIRO.pdf&ei=Tg3sULHZK5H29gTRIYHICQ&usg=AFQjCNFprtW2xJXIFkqQakXf3Agnkllsig](http://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=soja%20importancia%20nacional&source=web&cd=2&cad=rja&ved=0CDwQFjAB&url=http%3A%2F%2Fwww.apec.unesc.net%2FV_EEC%2Fsessoes_tematicas%2FEconomia%2520rural%2520e%2520agricultura%2520familiar%2FA%2520IMPORT%25C3%2582NCIA%2520DA%2520SOJA%2520PARA%2520O%2520AGRONEG%25C3%2593CIO%2520BRASILEIRO.pdf&ei=Tg3sULHZK5H29gTRIYHICQ&usg=AFQjCNFprtW2xJXIFkqQakXf3Agnkllsig) . Acesso em 08 de janeiro de 2013.

SILVA, V. P.; WERF, H. M. G.; SPIES, A.; SOARES, S. R. Variability in environmental impacts of Brazilian soybean according to crop production and transport scenarios. **Journal of Environmental Management**, v. 91, p. 1831-1839, 2010.

WERF, H.M.G.; PETITI, J.; SANDERS, J. The environmental impacts of the production of concentrated feed: the case of pig feed in Bretagne. **Agricultural Systems**, v 83, n.2, p. 153-177, 2005.

WHELAN, B. M.; McBRATNEY, A. B. The “Null Hypothesis” of Precision Agriculture Management. **Precision Agriculture**, n. 2, p. 265-279, 2000.

## APÊNDICES

## Apêndice 1

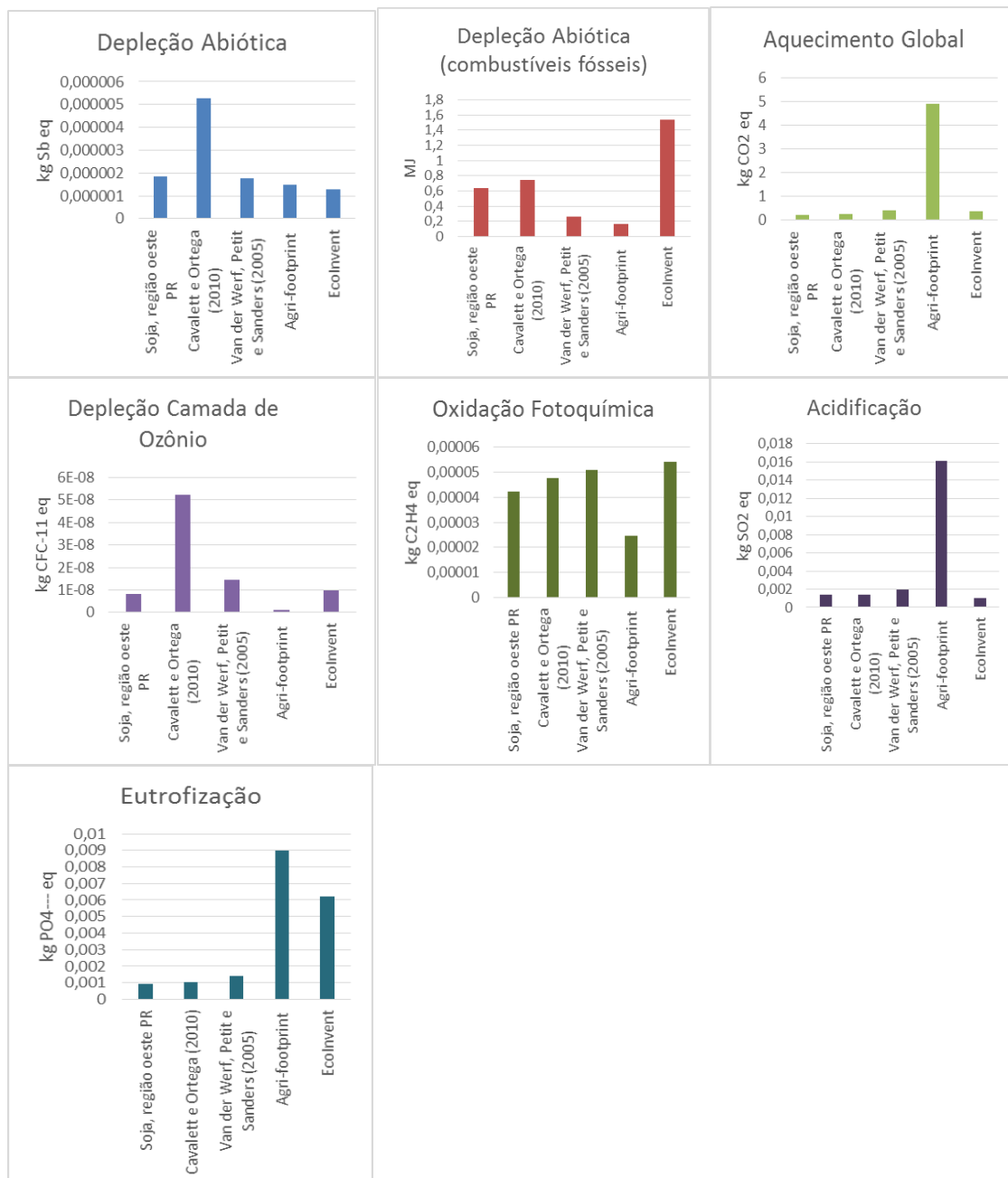
Processos elementares da base de dados empregados para representar os fluxos elementares do sistema da Soja.

**Tabela 21.** Relação entre os fluxos elementares do sistema da Soja e os processos elementares selecionados no SimPro para representar os primeiros.

| <b>Fluxo Elementar</b>   | <b>Processo Elementar</b>   |
|--|---|
| Consumo de diesel  | Energy, from diesel burned in machinery/RER mass.   |
| Produção de fosfato  | Phosphate rock (32% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , 50% CaO) (NPK 0-32-0)/RER Mass.   |
| Produção de superfosfato simples                                   | Single superphosphate, as 35% Ca(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (NPK 0-21-0), at regional storehouse/RER Mass. |
| Produção de superfosfato triplo                                    | Triple superphosphate, as 80% Ca(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (NPK 0-48-0) ate regional storehouse/RER Mass. |
| Cloreto de Potássio  | Potassium chloride (NPK 0-0-60), at regional storehouse/RER Mass.   |
| Produção do fungicida Carbendazim                                  | Benzimidazole-compound {GLO}, market for, Alloc Def, U.   |
| Produção inseticidas: cipermetrina, tiametoxan e lambda-cialotrina | Pyrethoid-compound {GLO}, Market for, Alloc Def, U.   |
| Produção dos inseticidas: acefato e parationa metílica             | Organophosphorus-compound, unspecified {GLO}, Market for, Alloc Def, U.   |
| Produção herbicida 2,4-D   | 2,4-dichorophenol {GLO}, market for, Alloc Def, U.  |
| Produção herbicida glifosato                                       | Glyphosate {GLO}, market for, Alloc Def, U.   |
| Produção herbicida paraquat  | Bipyridylum-compound {GLO}, market for, Alloc Def, U.   |
| Defensivos não presentes na base de dados                          | Pesticide, unspecified {GLO}, market for, Alloc Def, U.   |
| Produção calcário  | Lime, packed {GLO}, market for, Alloc Def, U.   |

## Apêndice 2

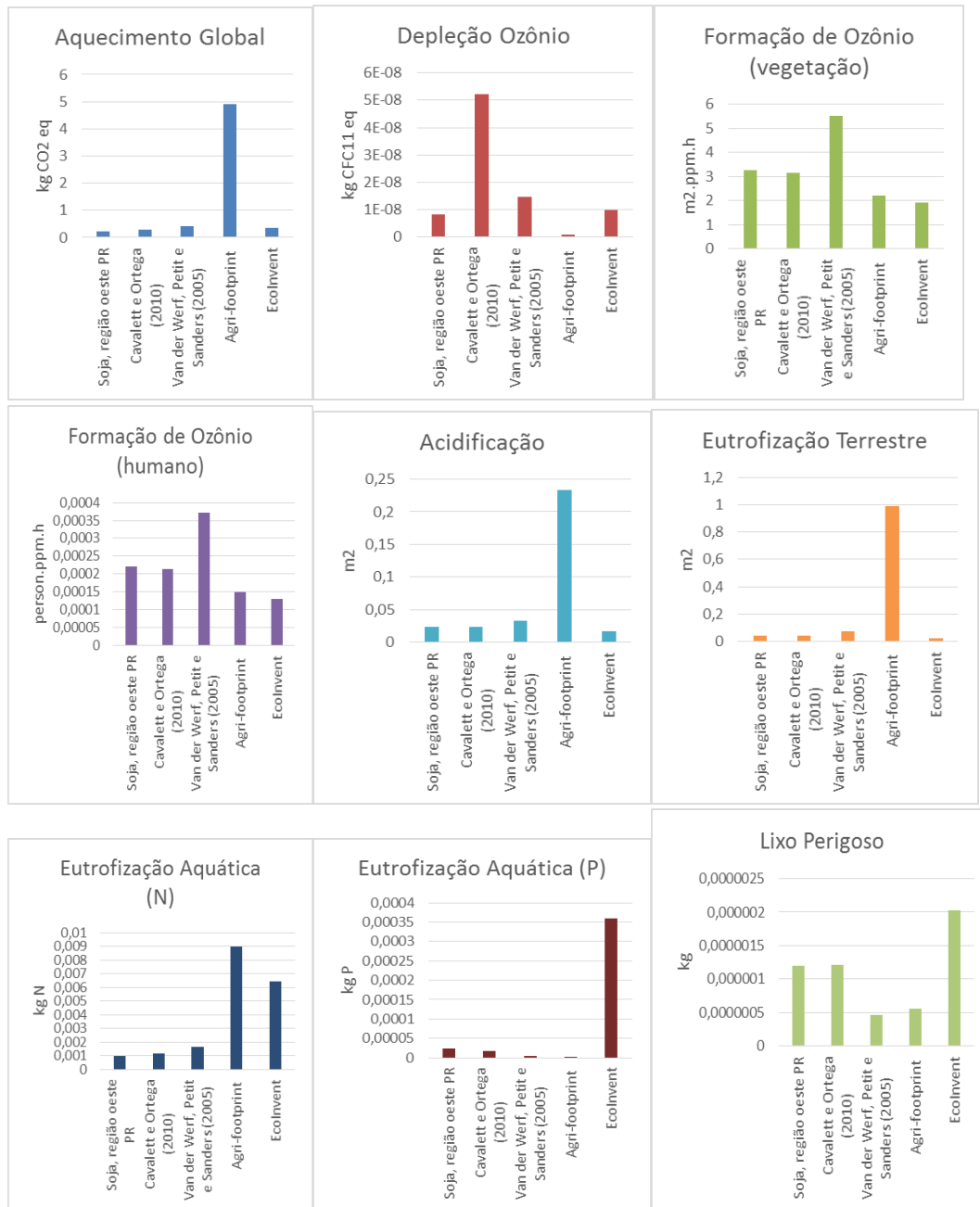
Avaliação de potencial impacto ambiental, calculado pelo método CML-IA, para as categorias de depleção abiótica; depleção abiótica (combustíveis fósseis); aquecimento global; depleção da camada de ozônio; oxidação fotoquímica; acidificação; e eutrofização.

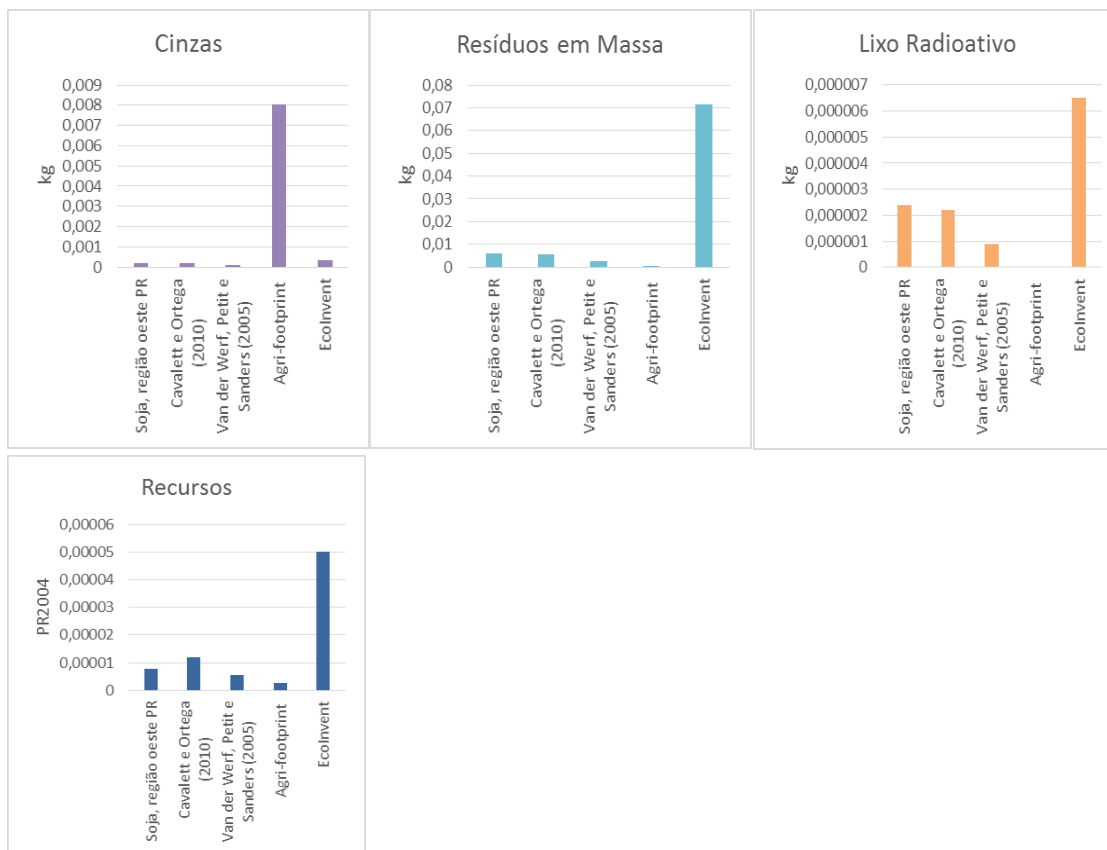


**Figura 53.** Avaliação do potencial impacto ambiental do sistema agrícola - método CML-IA.

Apêndice 3

Avaliação do potencial impacto ambiental, calculado pelo método EDIP 2003, para as categorias aquecimento global, depleção de ozônio, formação de ozônio (vegetação), formação de ozônio (humano), acidificação, eutrofização terrestre, eutrofização aquática (N), eutrofização aquática (P), lixo perigoso, cinzas, resíduos em massa, lixo radioativo e recursos.

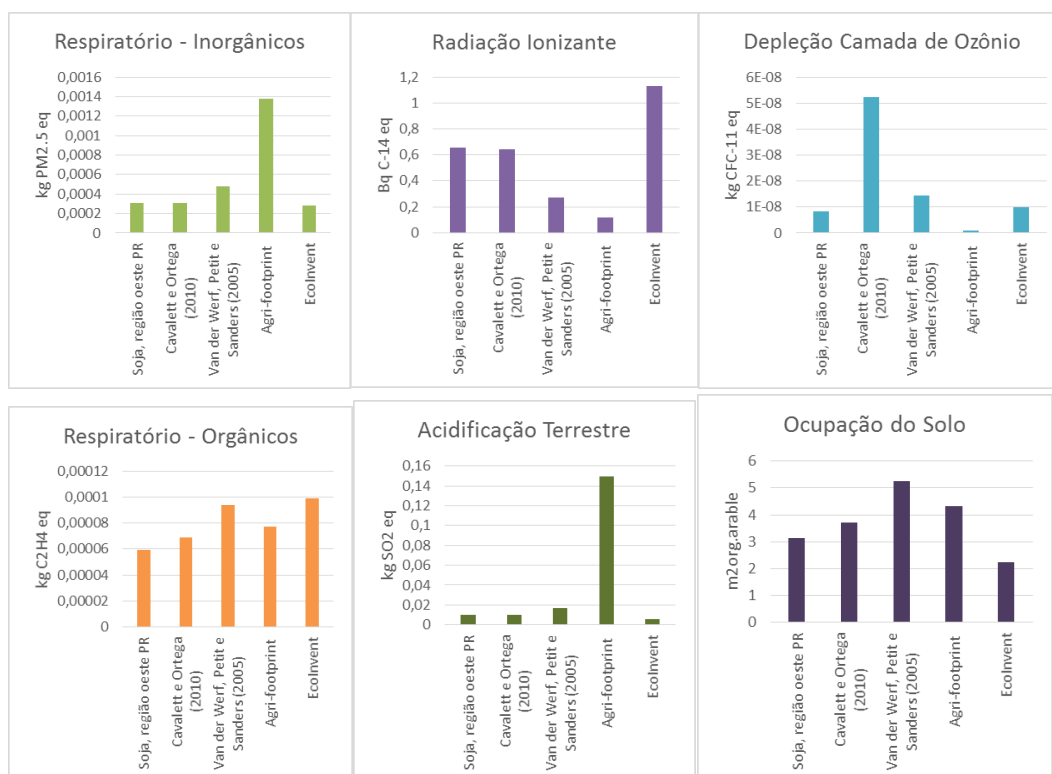




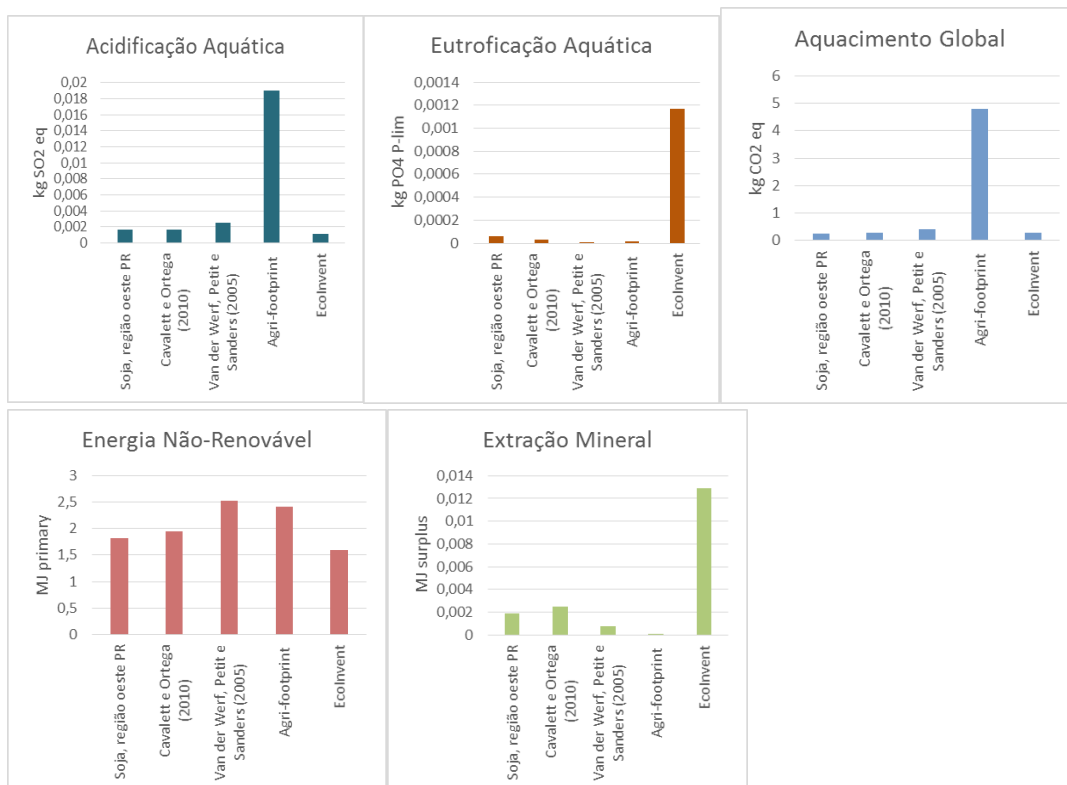
**Figura 54.** Avaliação do impacto da produção de soja calculado pelo método EDIP 2003.

## Apêndice 4

Avaliação do potencial impacto ambiental, calculado pelo método IMPACT 2002+, para as categorias de impacto: respiratório – inorgânicos; radiação ionizante; depleção da camada de ozônio; respiratório – orgânicos; acidificação terrestre; ocupação do solo; acidificação aquática; eutrofização aquática; aquecimento global; energia não-renovável; extração mineral.



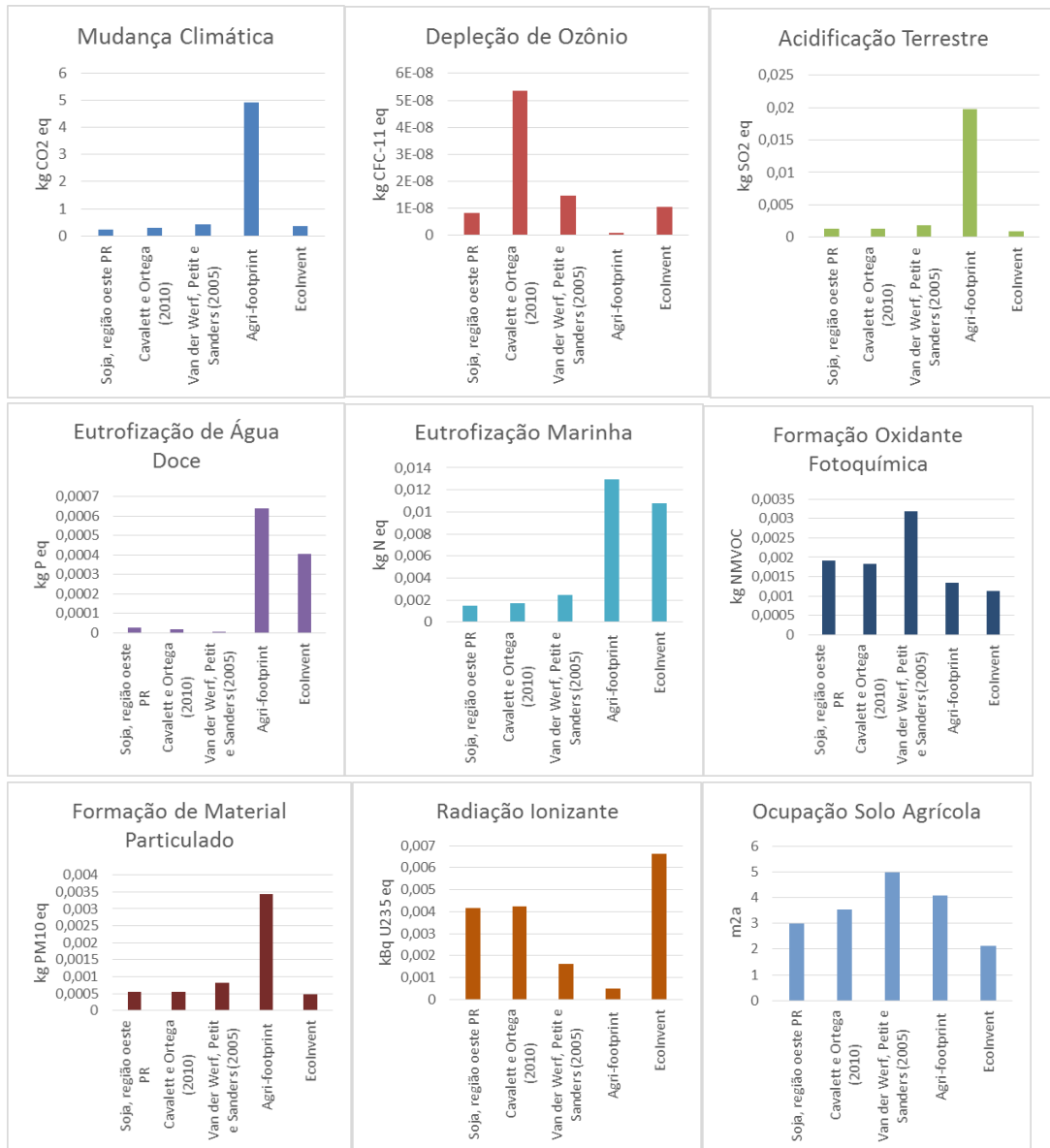




**Figura 55.** Avaliação do impacto da produção de soja calculado pelo método IMPACT 2002+.

Apêndice 5

Avaliação do potencial impacto ambiental, calculado pelo método ReCiPe, para as categorias de impacto: mudança climática; depleção de ozônio; acidificação terrestre; eutrofização de água doce; eutrofização marinha; formação oxidante fotoquímica; formação de material particulado; radiação ionizante; ocupação de solo agrícola; ocupação de solo urbano; transformação de solo natural; depleção de água; depleção de metais; depleção fóssil.





**Figura 56.** Avaliação do impacto da produção de soja calculado pelo método ReCiPe.

## Apêndice 6

Lista dos ingredientes ativos aplicados no plantio de soja com seu número de identificação CAS (Chemical Abstract Service):

**Tabela 22.** Defensivos agrícolas e seus respectivos números CAS.

| <b>Ingrediente ativo</b> | <b>Número CAS</b> |
|--------------------------|-------------------|
| <b>Fungicidas</b>        |                   |
| Carbendazim              | 010605-21-7       |
| Pyraclostrobina          | 175013-18-0       |
| Epoxiconazol             | 106325-08-0       |
| Carboxina                | 005234-68-4       |
| Tiram                    | 000137-26-8       |
| <b>Inseticidas</b>       |                   |
| Clorfluazuron            | 071422-67-8       |
| Cipermetrina             | 052315-07-8       |
| Diflubenzuron            | 035367-38-5       |
| Metomil                  | 016752-77-5       |
| Acefato                  | 030560-19-1       |
| Tiametoxam               | 153719-23-4       |
| Lambda-cialotrina        | 091465-08-6       |
| Imidacloprido            | 138261-41-3       |
| Tiodicarbe               | 059669-26-0       |
| Parationa metílica       | 000298-00-0       |
| <b>Herbicidas</b>        |                   |
| 2,4-d                    | 000094-75-7       |
| Clorimurrom-etílico      | 090982-32-4       |
| Glifosato                | 001071-83-6       |
| Paraquat                 | 004685-14-7       |
| Cloransulam metílico     | 147150-35-4       |
| Quizalofope-P-tefurílico | 094051-08-8       |
| Carfentrazona etílica    | 128639-02-1       |
| Cletodim                 | 099139-21-2       |

## Apêndice 7

Abaixo encontram-se listados todos os fatores de caracterização considerados pelos métodos para calcular o potencial impacto ambiental dos defensivos agrícolas aplicados no sistema da soja.

**Tabela 23.** Fatores de caracterização para toxicidade humana.

| Fatores de caracterização - Toxicidade Humana |                   |             |             |            |                  |            |            |            |   |
|---|-------------------|-------------|-------------|------------|------------------|------------|------------|------------|---|
| Métodos                                       | CML-IA            | EDIP 2003   |             |            | IMPACT 2002+     | Recipe     | USEtox     |            |   |
| Categorias                                    | Toxicidade Humana | Tox. Humana | Tox. Humana | Tox Humana | N- Carcinogênico | Tox Humana | Tox Humana | Tox Humana | n |
|   |                   | ar          | água        | solo       |                  |            |            |            |   |
| Fungicidas                                    |                   |             |             |            |                  |            |            |            |   |
| Carbendazim - Ar                              | 1,92E+01          |             |             |            |                  | 2,56E+00   |            |            |   |
| Carbendazim - Água                            | 2,51E+00          |             |             |            |                  | 1,39E+00   |            |            |   |
| Carbendazim - Oceano                          | 2,01E-03          |             |             |            |                  | 1,33E-03   |            |            |   |
| Carbendazim - Solo                            | 4,32E-01          |             |             |            |                  | 2,54E-01   |            |            |   |
| Carbendazim - Agrícola                        | 1,41E+02          |             |             |            |                  |            |            |            |   |
| Pyraclostrobina                               |                   |             |             |            |                  |            |            |            |   |
| Epoxiconazol - Ar                             |                   |             |             |            |                  |            |            |            |   |
| Epoxiconazol - Água                           |                   |             |             |            |                  |            |            |            |   |
| Epoxiconazol - Oceano                         |                   |             |             |            |                  |            |            |            |   |
| Epoxiconazol - Solo                           |                   |             |             |            |                  |            |            |            |   |
| Carboxina - Ar                                |                   |             |             |            | 5,05E-01         | 1,96E+00   |            |            |   |
| Carboxina - Água                              |                   |             |             |            | 6,24E-02         | 3,88E-01   |            |            |   |
| Carboxina - Oceano                            |                   |             |             |            |                  | 5,05E-04   |            |            |   |
| Carboxina - Solo                              |                   |             |             |            | 7,70E-03         | 1,71E-01   |            |            |   |
| Carboxina - Aragrícola                        |                   |             |             |            | 7,70E-03         |            |            |            |   |
| Tiram - Ar                                    | 1,89E+01          |             |             |            | 4,09E+00         | 1,32E+01   |            |            |   |
| Tiram - Água                                  | 3,31E+00          |             |             |            | 6,88E-02         | 2,15E+00   |            |            |   |
| Tiram - Oceano                                | 6,60E-04          |             |             |            |                  | 4,39E-04   |            |            |   |
| Tiram - Solo                                  | 2,53E-01          |             |             |            | 2,09E-02         | 7,14E-01   |            |            |   |
| Tiram - Agrícola                              | 7,91E+00          |             |             |            | 2,10E-02         |            |            |            |   |
| Inseticidas                                   |                   |             |             |            |                  |            |            |            |   |
| Clorfluazuron                                 |                   |             |             |            |                  |            |            |            |   |

Continua...

**Tabela 23.** Fatores de caracterização para toxicidade humana. (continuação...)

| Fatores de caracterização - Toxicidade Humana |                   |                |                  |                 |               |                 |            |                   |                     |
|---|-------------------|----------------|------------------|-----------------|---------------|-----------------|------------|-------------------|---------------------|
| Métodos                                       | CML-IA            | EDIP 2003      |                  |                 | IMPACT 2002+  |                 | Recipe     | USEtox            |                     |
| Categorias                                    | Toxicidade Humana | Tox. Humana ar | Tox. Humana água | Tox Humana solo | Carcinogênico | N-carcinogênico | Tox Humana | Tox Humana cancer | Tox Humana n cancer |
| Cipermetrina - Ar                             | 1,66E+02          | 1,74E+05       |                  |                 |               | 3,20E+01        | 3,00E+02   |                   |                     |
| Cipermetrina - Água                           | 5,55E+00          |                |                  |                 |               | 1,23E-01        | 1,64E+01   |                   |                     |
| Cipermetrina - Oceano                         | 2,58E-02          |                |                  |                 |               |                 | 1,35E-01   |                   |                     |
| Cipermetrina - Solo                           | 1,85E+00          |                |                  | 3,29E+00        |               | 9,29E-01        | 1,38E+03   |                   |                     |
| Cipermetrina - Agrícola                       | 5,20E+03          |                |                  |                 |               | 4,25E+00        |            |                   |                     |
| Diflubenzuron - Ar                            |                   |                |                  |                 |               |                 | 5,50E+00   |                   |                     |
| Diflubenzuron - Água                          |                   |                |                  |                 |               |                 | 9,90E+00   |                   |                     |
| Diflubenzuron - Oceano                        |                   |                |                  |                 |               |                 | 2,73E-02   |                   |                     |
| Diflubenzuron - Solo                          |                   |                |                  |                 |               |                 | 4,41E-01   |                   |                     |
| Metomil - Ar                                  | 6,16E+00          |                |                  |                 |               | 4,19E+00        | 1,00E+02   |                   |                     |
| Metomil - Água                                | 3,27E+00          |                |                  |                 |               | 9,86E-01        | 2,69E+01   |                   |                     |
| Metomil - Oceano                              | 1,40E-03          |                |                  |                 |               |                 | 9,08E-03   |                   |                     |
| Metomil - Solo                                | 6,93E-01          |                |                  |                 |               | 6,70E-01        | 7,68E+00   |                   |                     |
| Metomil - Agrícola                            | 4,33E+01          |                |                  |                 |               | 2,13E+00        |            |                   |                     |
| Acefato - Ar                                  | 3,06E+00          |                |                  |                 | 1,51E+00      |                 | 1,65E+03   | 1,63E-07          | 4,53E-04            |
| Acefato - Água                                | 2,11E+00          |                |                  |                 | 6,50E-01      |                 | 5,08E+02   | 2,49E-07          | 6,93E-04            |
| Acefato - Oceano                              | 5,10E-04          |                |                  |                 |               |                 | 1,58E-01   | 4,64E-11          | 1,29E-07            |
| Acefato - Solo                                | 3,07E-01          |                |                  |                 | 5,10E-02      |                 | 9,41E+01   | 1,00E-07          | 2,79E-04            |
| Acefato - Agrícola                            | 2,16E+01          |                |                  |                 | 6,10E-02      |                 |            | 1,26E-07          | 3,51E-04            |
| Tiametoxam                                    |                   |                |                  |                 |               |                 |            |                   |                     |
| Lambda-Cialotrina - Ar                        |                   |                |                  |                 |               | 1,37E+02        |            |                   |                     |
| Lambda-Cialotrina - Agua                      |                   |                |                  |                 |               | 5,60E+00        |            |                   |                     |
| Lambda-Cialotrina - Oceano                    |                   |                |                  |                 |               |                 |            |                   |                     |

Continua...

**Tabela 23.** Fatores de caracterização para toxicidade humana. (continuação...)

| Fatores de caracterização - Toxicidade Humana |                   |                |                  |                 |                 |               |            |                   |                     |
|---|-------------------|----------------|------------------|-----------------|-----------------|---------------|------------|-------------------|---------------------|
| Métodos                                       | CML-IA            | EDIP 2003      |                  |                 | IMPACT 2002+    |               | Recipe     | USEtox            |                     |
| Categorias                                    | Toxicidade Humana | Tox. Humana ar | Tox. Humana água | Tox Humana solo | N-Carcinogênico | carcinogênico | Tox Humana | Tox Humana cancer | Tox Humana n cancer |
| Lambda-Cialotrina - Solo                      |                   |                |                  |                 |                 | 9,01E+00      |            |                   |                     |
| Lambda-Cialotrina - Agrícola                  |                   |                |                  |                 |                 | 4,13E+01      |            |                   |                     |
| Imidacloprido                                 |                   |                |                  |                 |                 |               |            |                   |                     |
| Tiodicarbe - Ar                               |                   |                |                  |                 |                 |               | 1,59E+01   |                   |                     |
| Tiodicarbe - Água                             |                   |                |                  |                 |                 |               | 9,97E-01   |                   |                     |
| Tiodicarbe - Oceano                           |                   |                |                  |                 |                 |               | 5,82E-03   |                   |                     |
| Tiodicarbe - Solo                             |                   |                |                  |                 |                 |               | 1,33E+00   |                   |                     |
| Parationa Metílica - Ar                       | 5,27E+01          |                |                  |                 |                 | 1,16E+01      | 1,09E+02   |                   |                     |
| Parationa Metílica - Água                     | 1,03E+02          |                | 1,14E+05         |                 |                 | 1,23E+01      | 1,75E+02   |                   |                     |
| Parationa Metílica - Oceano                   | 5,38E-01          |                |                  |                 |                 |               | 2,19E-01   |                   |                     |
| Parationa Metílica - Solo                     | 1,74E+00          |                |                  | 6,04E+03        |                 | 4,49E+00      | 8,35E+00   |                   |                     |
| Parationa Metílica - Agrícola                 | 2,36E+01          |                |                  |                 |                 | 1,95E+01      |            |                   |                     |
| Herbicidas                                    |                   |                |                  |                 |                 |               |            |                   |                     |
| 2,4-D - Ar                                    | 6,64E+00          |                |                  |                 |                 | 2,39E+01      | 5,20E+00   |                   |                     |
| 2,4-D - Água                                  | 3,47E+00          |                |                  |                 |                 | 1,13E-01      | 2,39E-01   |                   |                     |
| 2,4-D - Oceano                                | 6,68E-05          |                |                  |                 |                 |               | 1,64E-06   |                   |                     |
| 2,4-D - Solo                                  | 7,22E-01          |                |                  |                 |                 | 1,56E-01      | 3,83E-01   |                   |                     |
| 2,4-D - Agrícola                              | 4,70E+01          |                |                  |                 |                 | 5,93E-01      |            |                   |                     |
| Clorimurom-Etílico- Ar                        |                   |                |                  |                 |                 | 8,00E-03      | 2,45E+00   |                   |                     |
| Clorimurom-Etílico- Água                      |                   |                |                  |                 |                 | 2,89E-02      | 3,30E-01   |                   |                     |
| Clorimurom-Etílico- Oceano                    |                   |                |                  |                 |                 |               | 5,24E-04   |                   |                     |
| Clorimurom-Etílico- Solo                      |                   |                |                  |                 |                 | 3,45E-02      | 9,79E-02   |                   |                     |

Continua...





**Tabela 24.** Fatores de caracterização para ecotoxicidade aquática.

| Fatores de caracterização - Ecotoxicidade aquática |               |             |           |                |                 |              |             |               |  |
|--|---------------|-------------|-----------|----------------|-----------------|--------------|-------------|---------------|--|
| Métodos  | CML-IA        |             | EDIP 2003 |                | IMPACT<br>2002+ | RECIPE       |             | USEtox        |  |
| Categorias   | Eco água doce | Eco marinha | Eco água  |                | Eco Aquatica    | Eco aquatica | Eco Marinha | Ecotoxicidade |  |
|  |               |             | Cronico   | Eco água Agudo |                 |              |             |               |  |
| Fungicidas   |               |             |           |                |                 |              |             |               |  |
| Carbendazim - Ar                                   | 2,98E+03      | 7,19E+02    |           |                | 2,32E+03        | 4,67E+00     | 5,11E-01    | 1,06E+04      |  |
| Carbendazim - Água                                 | 3,84E+04      | 5,82E+02    |           |                | 3,63E+05        | 6,71E+01     | 4,09E+00    | 7,41E+05      |  |
| Carbendazim - Oceano                               | 2,40E-08      | 1,35E+03    |           |                |                 | 7,54E-11     | 7,76E+00    | 4,77E-04      |  |
| Carbendazim - Solo                                 | 6,11E+03      | 9,27E+01    |           |                | 1,62E+05        | 5,87E+00     | 3,58E-01    | 5,46E+04      |  |
| Carbendazim - Agrícola                             | 2,01E+03      | 3,04E+01    |           |                |                 |              |             |               |  |
| Pyraclostrobina                                    |               |             |           |                |                 |              |             |               |  |
| Epoxiconazol - Ar                                  |               |             |           |                |                 | 1,75E+00     | 2,49E+00    | 6,02E+02      |  |
| Epoxiconazol - Água                                |               |             |           |                |                 | 4,18E+01     | 9,99E+00    | 2,30E+04      |  |
| Epoxiconazol - Oceano                              |               |             |           |                |                 | 1,68E-02     | 1,34E+01    | 8,29E-02      |  |
| Epoxiconazol - Solo                                |               |             |           |                |                 | 1,87E+00     | 1,35E+00    | 1,06E+02      |  |
| Carboxina - Ar                                     |               |             |           |                | 3,73E+01        | 2,49E-01     | 9,50E-03    | 3,82E+02      |  |
| Carboxina - Água                                   |               |             |           |                | 8,87E+03        | 3,19E+00     | 3,29E-02    | 2,47E+04      |  |
| Carboxina - Oceano                                 |               |             |           |                |                 | 3,99E-08     | 2,33E-01    | 2,48E-04      |  |
| Carboxina - Solo                                   |               |             |           |                | 1,10E+03        | 3,34E-01     | 3,46E-03    | 1,62E+03      |  |
| Carboxina - Aragrícola                             |               |             |           |                |                 |              |             |               |  |
| Tiram - Ar   | 2,70E+03      | 2,18E+02    |           |                | 2,17E+04        | 4,29E+01     | 7,37E-01    |               |  |
| Tiram - Água                                       | 9,80E+04      | 7,44E+01    |           |                | 6,23E+05        | 3,71E+02     | 4,64E-01    |               |  |
| Tiram - Oceano                                     | 2,62E-02      | 4,18E+02    |           |                |                 | 5,03E-04     | 1,91E+00    |               |  |
| Tiram - Solo                                       | 4,38E+03      | 4,16E+00    |           |                | 1,90E+05        | 1,42E+01     | 8,03E-02    |               |  |
| Tiram - Agrícola                                   | 6,86E+02      | 6,50E-01    |           |                |                 |              |             |               |  |
| Inseticidas  |               |             |           |                |                 |              |             |               |  |
| Clorfluazuron                                      |               |             |           |                |                 |              |             |               |  |

Continua...

**Tabela 24.** Fatores de caracterização para ecotoxicidade aquática. (*continuação...*)

| Fatores de caracterização - Ecotoxicidade aquática |               |             |           |                |                 |              |             |               |  |
|--|---------------|-------------|-----------|----------------|-----------------|--------------|-------------|---------------|--|
| Métodos  | CML-IA        |             | EDIP 2003 |                | IMPACT<br>2002+ | RECIPE       |             | USEtox        |  |
| Categorias   | Eco água doce | Eco marinha | Eco água  |                | Eco Aquatica    | Eco aquatica | Eco Marinha | Ecotoxicidade |  |
|  |               |             | Cronico   | Eco água Agudo |                 |              |             |               |  |
| Cipermetrina - Ar                                  | 8,36E+04      | 1,90E+04    |           |                | 1,58E+05        | 3,13E+03     | 5,78E+02    | 6,84E+05      |  |
| Cipermetrina - Água                                | 7,94E+06      | 1,00E+04    | 7,56E+10  | 2,77E+09       | 1,78E+07        | 2,65E+04     | 1,64E+02    | 5,04E+07      |  |
| Cipermetrina - Oceano                              | 2,36E+00      | 1,65E+05    |           |                |                 | 3,16E-01     | 1,85E+03    | 1,08E+03      |  |
| Cipermetrina - Solo                                | 6,89E+05      | 1,03E+03    |           |                | 9,59E+03        | 1,74E+03     | 1,32E+02    | 7,01E+04      |  |
| Cipermetrina - Agricola                            | 1,99E+05      | 2,97E+02    |           |                |                 |              |             | 0,00E+00      |  |
| Diflubenzuron - Ar                                 |               |             |           |                |                 | 3,82E+01     | 1,60E+01    | 2,82E+05      |  |
| Diflubenzuron - Água                               |               |             |           |                |                 | 8,55E+02     | 8,86E+00    | 1,20E+07      |  |
| Diflubenzuron - Oceano                             |               |             |           |                |                 | 1,98E-04     | 6,50E+01    | 9,85E+00      |  |
| Diflubenzuron - Solo                               |               |             |           |                |                 | 1,16E+01     | 1,49E-01    | 1,70E+05      |  |
| Metomil - Ar                                       | 1,39E+04      | 3,89E+03    |           |                | 7,98E+04        | 3,94E+01     | 5,73E+00    | 3,28E+03      |  |
| Metomil - Água                                     | 1,35E+05      | 4,21E+03    |           |                | 2,98E+06        | 2,16E+02     | 1,38E+01    | 2,90E+04      |  |
| Metomil - Oceano                                   | 8,51E-03      | 6,93E+03    |           |                |                 | 3,43E-05     | 1,99E+01    | 9,98E-05      |  |
| Metomil - Solo                                     | 2,84E+04      | 8,87E+02    |           |                | 7,96E+05        | 2,84E+01     | 1,82E+00    | 5,30E+03      |  |
| Metomil - Agricola                                 | 1,41E+04      | 4,40E+02    |           |                |                 |              |             |               |  |
| Acefato - Ar                                       | 7,92E+01      | 1,94E+01    |           |                | 7,61E+01        | 1,33E-01     | 1,60E-02    | 1,06E+02      |  |
| Acefato - Água                                     | 1,10E+03      | 1,45E+01    |           |                | 8,04E+03        | 1,28E+00     | 6,94E-02    | 6,27E+02      |  |
| Acefato - Oceano                                   | 6,04E-08      | 3,67E+01    |           |                |                 | 2,27E-10     | 1,42E-01    | 1,91E-07      |  |
| Acefato - Solo                                     | 1,59E+02      | 2,11E+00    |           |                | 6,30E+02        | 1,43E-01     | 7,74E-03    | 2,52E+02      |  |
| Acefato - Agricola                                 | 5,09E+01      | 6,73E-01    |           |                |                 |              |             |               |  |
| Tiametoxam   |               |             |           |                |                 |              |             |               |  |
| Lambda-Cialotrina - Ar                             |               |             |           |                | 6,31E+05        | 6,86E+01     | 2,29E+03    | 1,22E+06      |  |
| Lambda-Cialotrina - Agua                           |               |             | 9,64E+10  | 3,17E+09       | 9,38E+07        | 8,06E+03     | 2,00E+02    | 1,39E+08      |  |
| Lambda-Cialotrina - Oceano                         |               |             |           |                |                 | 3,28E-01     | 8,09E+03    | 3,93E+03      |  |

*Continua...*

**Tabela 24.** Fatores de caracterização para ecotoxicidade aquática. (*continuação...*)

| Fatores de caracterização - Ecotoxicidade aquática |               |             |           |                |                 |              |             |               |          |
|--|---------------|-------------|-----------|----------------|-----------------|--------------|-------------|---------------|----------|
| Métodos  | CML-IA        |             | EDIP 2003 |                | IMPACT<br>2002+ | RECIPE       |             | USEtox        |          |
| Categorias   | Eco água doce | Eco marinha | Eco água  |                | Eco Aquatica    | Eco aquatica | Eco Marinha | Ecotoxicidade |          |
|  |               |             | Cronico   | Eco água Agudo |                 |              |             |               |          |
| Lambda-Cialotrina - Solo                           |               |             |           |                | 4,80E+04        | 2,02E+00     | 4,83E+00    |               | 1,34E+05 |
| Lambda-Cialotrina - Agrícola                       |               |             |           |                |                 |              |             |               |          |
| Imidacloprido                                      |               |             |           |                |                 |              |             |               |          |
| Tiodicarbe - Ar                                    |               |             |           |                | 2,01E+03        | 2,99E+00     | 1,04E+00    |               | 1,59E+03 |
| Tiodicarbe - Água                                  |               |             |           |                | 3,49E+05        | 8,02E+01     | 8,90E-01    |               | 9,06E+04 |
| Tiodicarbe - Oceano                                |               |             |           |                |                 | 2,76E-03     | 6,12E+00    |               | 3,40E+00 |
| Tiodicarbe - Solo                                  |               |             |           |                | 1,89E+04        | 6,12E+00     | 6,97E-01    |               | 4,35E+03 |
| Parationa Metílica - Ar                            | 9,87E+02      | 7,24E+02    |           |                | 2,82E+03        | 5,93E-01     | 5,30E-02    |               | 7,98E+02 |
| Parationa Metílica - Água                          | 2,90E+05      | 1,46E+03    | 9,29E+10  | 9,29E+10       | 3,86E+05        | 4,00E+01     | 1,87E-01    |               | 6,51E+04 |
| Parationa Metílica - Oceano                        | 1,23E-01      | 8,06E+03    |           |                |                 | 5,33E-05     | 1,33E+00    |               | 1,31E-01 |
| Parationa Metílica - Solo                          | 4,37E+03      | 2,30E+01    |           |                | 8,06E+03        | 7,51E-01     | 1,26E-02    |               | 1,24E+03 |
| Parationa Metílica - Agrícola                      | 1,12E+03      | 5,86E+00    |           |                |                 |              |             |               |          |
| Herbicidas   |               |             |           |                |                 |              |             |               |          |
| 2,4-D - Ar   | 3,87E+01      | 5,28E+00    |           |                | 1,44E+01        | 3,10E-02     | 5,47E-04    |               |          |
| 2,4-D - Água                                       | 4,03E+02      | 2,27E+00    |           |                | 7,24E+02        | 2,39E-01     | 2,65E-04    |               |          |
| 2,4-D - Oceano                                     | 1,14E-10      | 1,01E+01    |           |                |                 | 9,97E-15     | 5,81E-03    |               |          |
| 2,4-D - Solo                                       | 8,20E+01      | 4,62E-01    |           |                | 2,19E+02        | 2,93E-02     | 3,25E-05    |               |          |
| 2,4-D - Agrícola                                   | 2,95E+01      | 1,66E-01    |           |                |                 |              |             |               |          |
| Clorimurom-Etílico- Ar                             |               |             |           |                |                 |              |             |               |          |
| Clorimurom-Etílico- Água                           |               |             |           |                |                 |              |             |               |          |
| Clorimurom-Etílico- Oceano                         |               |             |           |                |                 |              |             |               |          |
| Clorimurom-Etílico- Solo                           |               |             |           |                |                 |              |             |               |          |
| Clorimurom-Etílico- Agrícola                       |               |             |           |                |                 |              |             |               |          |

*Continua...*



**Tabela 25.** Fatores de caracterização para ecotoxicidade terrestre.

| Fatores de caracterização - Eco terrestre |                  |                  |                 |                  |
|---|------------------|------------------|-----------------|------------------|
| Métodos                                   | CML-IA           | EDIP 2003        | IMPACT<br>2002+ | RECIPE           |
| Categorias                                | Eco<br>terrestre | Eco solo crônico | Eco terrestre   | Eco<br>Terrestre |
| Fungicidas                                |                  |                  |                 |                  |
| Carbendazim - Ar                          | 1,98E+01         |                  | 9,31E+02        | 1,01E+00         |
| Carbendazim - Água                        | 6,27E-08         |                  | 1,20E-06        | 1,01E-08         |
| Carbendazim - Oceano                      | 1,61E-10         |                  |                 | 8,15E-11         |
| Carbendazim - Solo                        | 3,76E+01         |                  | 8,57E+04        | 1,14E+01         |
| Carbendazim - Agrícola                    | 4,94E+01         |                  |                 |                  |
| Pyraclostrobina                           |                  |                  |                 |                  |
| Epoxiconazol - Ar                         |                  |                  |                 | 5,66E-01         |
| Epoxiconazol - Água                       |                  |                  |                 | 8,70E-02         |
| Epoxiconazol - Oceano                     |                  |                  |                 | 1,67E-02         |
| Epoxiconazol - Solo                       |                  |                  |                 | 3,42E+00         |
| Carboxina - Ar                            |                  |                  | 1,05E+01        | 1,24E-01         |
| Carboxina - Água                          |                  |                  | 2,33E-12        | 2,05E-06         |
| Carboxina - Oceano                        |                  |                  |                 | 1,04E-07         |
| Carboxina - Solo                          |                  |                  | 6,37E+02        | 1,59E+00         |
| Carboxina - Aragrícola                    |                  |                  |                 |                  |
| Tiram - Ar                                | 3,16E+01         |                  | 2,05E+04        | 1,10E+01         |
| Tiram - Água                              | 9,29E-02         |                  | 2,04E-05        | 7,64E-02         |
| Tiram - Oceano                            | 3,06E-04         |                  |                 | 2,75E-04         |
| Tiram - Solo                              | 8,12E+01         |                  | 2,40E+05        | 1,73E+01         |
| Tiram - Agrícola                          | 5,08E+01         |                  |                 |                  |
| Inseticidas                               |                  |                  |                 |                  |
| Clorfluazuron                             |                  |                  |                 |                  |

*Continua...*

**Tabela 25.** Fatores de caracterização para ecotoxicidade terrestre. (*continuação...*)

| Fatores de caracterização - Eco terrestre        |                  |                  |                 |                  |
|--|------------------|------------------|-----------------|------------------|
| Métodos  | CML-IA           | EDIP 2003        | IMPACT<br>2002+ | RECIPE           |
| Categorias                                       | Eco<br>terrestre | Eco solo crônico | Eco terrestre   | Eco<br>Terrestre |
| Cipermetrina - Ar                                | 8,92E+03         |                  | 1,15E+02        | 4,75E+03         |
| Fatores de+A1:E29 caracterização - Eco terrestre |                  |                  |                 |                  |
| Métodos  | CML-IA           | EDIP 2003        | IMPACT<br>2002+ | RECIPE           |
| Categorias                                       | Eco<br>terrestre | Eco solo crônico | Eco terrestre   | Eco<br>Terrestre |
| Cipermetrina - Água                              | 1,58E+01         |                  | 1,42E-02        | 2,38E+01         |
| Cipermetrina - Oceano                            | 2,52E-01         |                  |                 | 1,16E+00         |
| Cipermetrina - Solo                              | 7,76E+04         | 8,69E+06         | 2,28E+03        | 1,12E+04         |
| Cipermetrina - Agrícola                          | 8,97E+04         |                  |                 |                  |
| Diflubenzuron - Ar                               |                  |                  |                 | 1,03E+01         |
| Diflubenzuron - Água                             |                  |                  |                 | 1,78E-03         |
| Diflubenzuron - Oceano                           |                  |                  |                 | 9,36E-05         |
| Diflubenzuron - Solo                             |                  |                  |                 | 2,09E+01         |
| Metomil - Ar                                     | 1,19E+02         |                  | 1,35E+04        | 1,09E+01         |
| Metomil - Água                                   | 2,16E-03         |                  | 3,34E-01        | 7,09E-04         |
| Metomil - Oceano                                 | 7,50E-05         |                  |                 | 4,27E-05         |
| Metomil - Solo                                   | 2,23E+02         |                  | 1,79E+05        | 5,95E+01         |
| Metomil - Agrícola                               | 3,05E+02         |                  |                 |                  |
| Acefato - Ar                                     | 6,90E-01         |                  | 1,77E+01        | 2,12E-02         |
| Acefato - Água                                   | 2,18E-08         |                  | 3,03E-07        | 2,43E-09         |
| Acefato - Oceano                                 | 5,32E-10         |                  |                 | 1,90E-10         |
| Acefato - Solo                                   | 1,32E+00         |                  | 3,71E+02        | 2,01E-01         |

*Continua...*

**Tabela 25.** Fatores de caracterização para ecotoxicidade terrestre. (*continuação...*)

| Fatores de caracterização - Eco terrestre |                  |                  |                 |                  |
|---|------------------|------------------|-----------------|------------------|
| Métodos                                   | CML-IA           | EDIP 2003        | IMPACT<br>2002+ | RECIPE           |
| Categorias                                | Eco<br>terrestre | Eco solo crônico | Eco terrestre   | Eco<br>Terrestre |
| Acefato - Agrícola                        | 1,69E+00         |                  |                 |                  |
| Tiametoxam                                |                  |                  |                 |                  |
| Lambda-Cialotrina - Ar                    |                  |                  | 3,88E+01        | 6,16E+00         |
| Lambda-Cialotrina - Água                  |                  |                  | 4,34E-02        | 2,72E-02         |
| Lambda-Cialotrina - Oceano                |                  |                  |                 | 1,87E-02         |
| Lambda-Cialotrina - Solo                  |                  | 2,94E+08         | 9,81E+02        | 1,19E+01         |
| Lambda-Cialotrina - Agrícola              |                  |                  |                 |                  |
| Imidacloprido                             |                  |                  |                 |                  |
| Tiodicarbe - Ar                           |                  |                  |                 | 3,77E+00         |
| Tiodicarbe - Água                         |                  |                  |                 | 1,64E-01         |
| Tiodicarbe - Oceano                       |                  |                  |                 | 8,66E-03         |
| Tiodicarbe - Solo                         |                  |                  |                 | 4,68E+01         |
| Parationa Metílica - Ar                   | 5,66E+00         |                  | 1,60E+02        | 1,68E-01         |
| Parationa Metílica - Água                 | 3,36E-02         |                  | 2,14E-01        | 1,24E-03         |
| Parationa Metílica - Oceano               | 7,08E-04         |                  |                 | 2,87E-05         |
| Parationa Metílica - Solo                 | 7,92E+01         | 1,60E+09         | 3,07E+03        | 1,71E+00         |
| Parationa Metílica - Agrícola             | 8,09E+01         |                  |                 |                  |
| Herbicidas                                |                  |                  |                 |                  |
| 2,4-D - Ar                                | 5,97E-01         |                  | 3,79E+00        | 8,41E-02         |
| 2,4-D - Água                              | 9,26E-10         |                  | 1,32E-10        | 7,50E-11         |
| 2,4-D - Oceano                            | 1,76E-12         |                  |                 | 1,27E-13         |
| 2,4-D - Solo                              | 1,10E+00         |                  | 8,47E+01        | 6,66E-01         |
| 2,4-D - Agrícola                          | 1,58E+00         |                  |                 |                  |

*Continua...*



**Tabela 25.** Fatores de caracterização para ecotoxicidade terrestre. (*continuação...*)

| Fatores de caracterização - Eco terrestre |                  |                  |                 |                  |
|---|------------------|------------------|-----------------|------------------|
| Métodos                                   | CML-IA           | EDIP 2003        | IMPACT<br>2002+ | RECIPE           |
| Categorias                                | Eco<br>terrestre | Eco solo crônico | Eco terrestre   | Eco<br>Terrestre |
| Clorimurrom-Etílico- Ar                   |                  |                  |                 |                  |
| Clorimurrom-Etílico- Água                 |                  |                  |                 |                  |
| Clorimurrom-Etílico- Oceano               |                  |                  |                 |                  |
| Clorimurrom-Etílico- Solo                 |                  |                  |                 |                  |
| Clorimurrom-Etílico- Agricola             |                  |                  |                 |                  |
| Glifosato - Ar                            | 4,66E-02         |                  | 8,86E+01        | 1,61E-03         |
| Glifosato - Água                          | 2,25E-11         |                  | 2,37E-19        | 1,75E-12         |
| Glifosato - Oceano                        | 4,40E-14         |                  |                 | 4,42E-15         |
| Glifosato - Solo                          | 9,60E-02         | 5,13E+04         | 4,08E+03        | 1,06E-02         |
| Glifosato - Agricola                      | 9,63E-02         |                  |                 |                  |
| Paraquat - Ar                             |                  |                  | 9,21E+02        | 8,60E-01         |
| Paraquat - Água                           |                  |                  | 2,50E-06        | 3,00E-09         |
| Paraquat - Oceano                         |                  |                  |                 | 1,51E-10         |
| Paraquat - Solo                           |                  |                  | 1,94E+04        | 6,09E+00         |
| Paraquat - Agricola                       |                  |                  |                 |                  |
| Cloransulam Metílico                      |                  |                  |                 |                  |
| Quizalofope-P-Tefurílico                  |                  |                  |                 |                  |
| Carfentrazona Etílica - Ar                |                  |                  |                 |                  |
| Carfentrazona Etílica - Água              |                  |                  |                 |                  |
| Carfentrazona Etílica - Oceano            |                  |                  |                 |                  |
| Carfentrazona Etílica - Solo              |                  |                  |                 |                  |
| Cletodim                                  |                  |                  |                 |                  |