

**EDUARDO TOSHIO SUGAWARA**

**COMPARAÇÃO DOS DESEMPENHOS AMBIENTAIS DO B5 ETÍLICO  
DE SOJA E DO ÓLEO DIESEL, POR MEIO DA AVALIAÇÃO DO  
CICLO DE VIDA (ACV)**

**São Paulo**

**2012**



**EDUARDO TOSHIO SUGAWARA**

**COMPARAÇÃO DOS DESEMPENHOS AMBIENTAIS DO B5 ETÍLICO  
DE SOJA E DO ÓLEO DIESEL, POR MEIO DA AVALIAÇÃO DO  
CICLO DE VIDA (ACV)**

**Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo  
para a obtenção do título de Mestre em  
Engenharia**

**São Paulo**

**2012**



**EDUARDO TOSHIO SUGAWARA**

**COMPARAÇÃO DOS DESEMPENHOS AMBIENTAIS DO B5 ETÍLICO  
DE SOJA E DO ÓLEO DIESEL, POR MEIO DA AVALIAÇÃO DO  
CICLO DE VIDA (ACV)**

**Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo  
para a obtenção do título de Mestre em  
Engenharia**

**Área de Concentração:  
Engenharia Química**

**Orientador:  
Prof. Dr. Gil Anderi da Silva**

**São Paulo**

**2012**

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

**Sugawara, Eduardo Toshio**

**Comparação dos desempenhos ambientais do B5 etílico de soja e de óleo diesel, por meio da avaliação do ciclo de vida (ACV) / E.T. Sugawara. -- São Paulo, 2012.**

**238 p.**

**Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química.**

**1. Biodiesel 2. Ciclo de vida (Avaliação) I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Química II. t.**

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho aos meus pais, Vilma e Mário, e à minha irmã, Yumi.

Aos meus pais, agradeço em especial por sempre terem fornecido todo suporte, financeiro e moral, para que eu pudesse ter as melhores oportunidades de estudo.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. Gil Anderi da Silva, pela oportunidade dada para que eu pudesse crescer, pessoal e profissionalmente, durante todos esses anos de convívio.

Ao amigo e Prof. Dr. Luiz Alexandre Kulay, por todo o auxílio prestado na concretização desta atividade, meus sinceros agradecimentos.

Aos grandes amigos (as) que tive no GP2: Paulo, Alex, Rafael e Laura, obrigado por todas as risadas que compartilhamos.

Aos colegas que tornaram possível a concretização desta dissertação: Marília (Embrapa Meio Ambiente) e Otávio e Mateus (CTBE).



## RESUMO

Ainda que a energia de origem fóssil predomine nos dias atuais, as fontes renováveis vêm ocupando cada vez mais um papel de destaque no mercado de energia. No Brasil, o etanol se apresenta como alternativa já consolidada e, nos últimos anos, o biodiesel passou também a possuir relevância na matriz energética nacional. Tal fato deveu-se à introdução em 2008 da obrigatoriedade legal de adição de biodiesel ao óleo diesel, e desde 2010 misturas com 5%<sub>v/v</sub> de combustível de origem renovável (B5) são comercializadas no país. Diante desta imposição legal, procurou-se determinar quais os benefícios e ônus, em termos de impactos ambientais, acarretados pela adição de 5% do éster etílico de soja ao óleo diesel. Para tal objetivo, decidiu-se adotar a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) que, por apresentar uma visão sistêmica, não se restringindo à fase de uso dos combustíveis, permite identificar com maior precisão qual alternativa acarreta menor impacto para o meio ambiente. Os resultados da fase de Avaliação de Impacto indicaram que a mistura B5 de biodiesel etílico de soja, quando utilizada em um ônibus urbano da companhia Mercedes-Benz, apresenta pior desempenho ambiental que o óleo diesel em nove das treze categorias avaliadas, quais sejam: Depleção do Ozônio Estratosférico; Formação de Foto-oxidantes; Formação de Material Particulado; Acidificação Terrestre; Eutrofização de Água Doce; Ecotoxicidade Terrestre; Ocupação de Área Agrícola; Transformação de Área Natural; e Depleção de Água. Na categoria Mudanças Climáticas a mistura B5 obteve desempenho favorável, enquanto nas demais três categorias – Toxicidade Humana, Ecotoxicidade em Água Doce e Depleção Fóssil – ambos os combustíveis apresentaram resultados semelhantes. Voltando a comparação para o nível *endpoint*, no qual os impactos são expressos por meio de um indicador único, a mistura B5 obteve um desempenho ambiental inferior, uma vez que o resultado do seu indicador foi 0,2% maior que o do óleo diesel.

**Palavras-chave:** Avaliação do ciclo de vida; biodiesel; desempenho ambiental.

## ABSTRACT

Although nowadays there is a predominancy of fossil energy, renewable energy sources are increasing its role in the energy market. In Brazil, ethanol is a consolidated alternative and recently biodiesel has also becoming relevant for the national energy matrix. This fact can be explained due the introduction, by legal obligation, in 2008 of the addition of biodiesel into diesel oil and since 2010 diesel's blends with 5%<sub>v/v</sub> of fuel from renewable sources (B5) are sold in the country market. Given this legal obligation, it was sought to determine the benefits and burdens in terms of environmental impacts caused by the addition of 5% soybean ethyl ester to diesel oil. For this purpose it was decided to adopt the Life Cycle Assessment (LCA), which offers a systemic view, not restricted to the fuel use stage, and allows to identify more precisely which alternative causes less impact to the environment. The results of the Impact Assessment phase showed that the mixture of B5 soybean ethyl ester, when used in a Mercedes-Benz's urban bus, presents worse environmental performance compared with diesel in nine of thirteen evaluated categories, namely: Stratospheric Ozone Depletion, Photochemical Oxidant Formation; Particulate Matter Formation; Terrestrial Acidification, Freshwater Eutrophication, Terrestrial Ecotoxicity; Agricultural Land Occupation; Natural Land Transformation, and Water Depletion. In Climate Change, the mixture of B5 soybean ethyl ester resulted in a better environmental performance, whereas in the other three categories – Human Toxicity, Freshwater Ecotoxicity and Fossil Depletion – both fuels presented equivalent results. In an endpoint evaluation level, which the impacts are expressed by a single indicator, the B5 mixture obtained worse environmental performance, since the result of its index was 0.2% higher than that of diesel oil.

**Keywords:** Life cycle assessment; biodiesel; environmental performance.

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>23</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>30</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>31</b>
3.1	<i>Combustíveis utilizados em motores do ciclo diesel .....</i>	<i>31</i>
3.1.1	Óleo Diesel .....	31
3.1.1.1	Histórico do Óleo Diesel .....	32
3.1.1.2	Processo de Produção de Óleo Diesel.....	33
3.1.1.3	Mercado de Diesel no Brasil.....	38
3.1.2	Biodiesel .....	39
3.1.2.1	Histórico do Biodiesel .....	40
3.1.2.2	Propriedades do Biodiesel.....	42
3.1.2.2.1	Características físicas e químicas do biodiesel .....	42
3.1.2.3	Processo de Produção de biodiesel .....	44
3.1.2.4	Matérias-primas para a produção de biodiesel.....	46
3.1.2.5	Álcool empregado na transesterificação.....	48
3.1.2.6	Catalisadores .....	50
3.1.2.7	Glicerina .....	51
3.1.2.8	Vantagens e desvantagens do biodiesel em relação ao diesel .....	51
3.1.2.9	Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB).....	54
3.1.2.10	Produção de Biodiesel no Brasil .....	57
3.1.2.10.1	Lei N° 11.097/2005 .....	57
3.1.2.10.2	Capacidade Produtiva e Produção Nacional .....	59
3.1.2.10.3	Leilões Públicos da ANP .....	62
3.1.2.11	Produção de Biodiesel no Mundo .....	62
3.2	<i>Óleo de soja .....</i>	<i>64</i>
3.2.1	Características da cultura de soja.....	64
3.2.2	Cultivo da soja .....	65
3.2.3	Extração do óleo de soja .....	69
3.2.4	Dados da produção de grão e óleo de soja .....	71

3.3	<i>Etanol</i> .....	74
3.3.1	Características do etanol de cana-de-açúcar .....	74
3.3.2	Cultivo da cana-de-açúcar.....	76
3.3.3	Produção de etanol.....	78
3.3.4	Dados da produção de cana-de-açúcar e etanol.....	81
3.4	<i>Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)</i> .....	82
3.4.1	Conceito de Ciclo de Vida .....	82
3.4.2	Aplicações da ACV.....	83
3.4.3	Limitações da ACV .....	84
3.4.4	Metodologia de ACV.....	85
3.4.4.1	Definição de Objetivo e Escopo .....	86
3.4.4.1.1	Objetivo do estudo de ACV .....	86
3.4.4.1.2	Escopo do estudo de ACV .....	87
3.4.4.2	Análise de Inventário.....	93
3.4.4.2.1	Coleta de dados .....	94
3.4.4.2.2	Tratamento dos dados.....	96
3.4.4.3	Avaliação de Impacto .....	101
3.4.4.3.1	Seleção de categorias de impacto, indicadores de categoria e modelos de caracterização .....	103
3.4.4.3.2	Classificação .....	108
3.4.4.3.3	Caracterização .....	108
3.4.4.3.4	Normalização .....	110
3.4.4.3.5	Ponderação .....	110
3.4.4.4	Interpretação .....	111
3.4.4.5	Comunicação e Revisão Crítica .....	114
3.4.4.6	Abordagens da ACV.....	115
3.5	<i>ACV e Biocombustíveis</i> .....	118
<b>4</b>	<b>ESTUDO DE ACV</b> .....	<b>121</b>
4.1	<i>Definição de Objetivo e Escopo</i> .....	121
4.1.1	Definição de Objetivo.....	121
4.1.2	Definição de Escopo.....	121
4.1.2.1	Função .....	121

4.1.2.2	Unidade Funcional e Fluxo de Referência.....	122
4.1.2.3	Sistemas de Produto .....	122
4.1.2.3.1	Sistema de Produto do Óleo Diesel .....	122
4.1.2.3.2	Sistema de Produto do B5 etílico de soja.....	123
4.1.2.4	Fronteiras do Sistema .....	124
4.1.2.5	Requisitos de qualidade dos dados.....	125
4.1.2.6	Procedimento de alocação .....	126
4.1.2.7	Pressupostos e Escolha de Valores.....	126
4.1.2.8	Método de Avaliação de Impacto e categorias de impacto .....	126
4.1.2.9	Interpretação .....	127
4.1.2.10	Tipo de Revisão Crítica.....	128
4.1.2.11	Tipo e Formato do Relatório.....	128
4.2	<i>Análise de Inventário</i> .....	128
4.2.1	ICV do óleo diesel.....	128
4.2.1.1	Subsistema de extração de petróleo .....	128
4.2.1.1.1	Banco de dados utilizado .....	130
4.2.1.1.2	Inventário Consolidado da extração de petróleo .....	130
4.2.1.2	Subsistema refino do petróleo.....	133
4.2.1.2.1	Produção de derivados do petróleo nas refinarias paulistas .....	134
4.2.1.2.2	Transportes .....	135
4.2.1.2.3	Banco de dados utilizado .....	136
4.2.1.2.4	Inventário Consolidado da produção de óleo diesel.....	137
4.2.1.3	Subsistema Armazenamento .....	140
4.2.1.3.1	Inventário Consolidado do armazenamento de óleo diesel .....	140
4.2.1.4	Subsistema de uso do óleo diesel em ônibus .....	141
4.2.1.4.1	Inventário Consolidado do uso do óleo diesel em ônibus.....	142
4.2.2	ICV do biodiesel etílico de soja.....	143
4.2.2.1	Subsistema de produção de grãos de soja .....	143
4.2.2.1.1	Área, produtividade e produção da soja .....	144
4.2.2.1.2	Consumos de calcário e semente .....	144
4.2.2.1.3	Consumo de fertilizantes minerais .....	144
4.2.2.1.4	Consumo de pesticidas .....	145
4.2.2.1.5	Consumo de óleo diesel.....	147

4.2.2.1.6	Uso do Solo.....	148
4.2.2.1.7	Captura de CO <sub>2</sub> .....	150
4.2.2.1.8	Emissões para o Ar.....	150
4.2.2.1.9	Emissões para o Solo.....	155
4.2.2.1.10	Emissões para a Água.....	158
4.2.2.1.11	Transportes.....	160
4.2.2.1.12	Banco de dados utilizado.....	163
4.2.2.1.13	Inventário Consolidado da produção de soja.....	164
4.2.2.2	Subsistema de produção de óleo de soja.....	165
4.2.2.2.1	Transportes.....	168
4.2.2.2.2	Banco de dados utilizado.....	169
4.2.2.2.3	Inventário Consolidado da produção de óleo de soja.....	169
4.2.2.3	Subsistema de produção de cana-de-açúcar.....	170
4.2.2.3.1	Área, produtividade e produção de cana-de-açúcar.....	171
4.2.2.3.2	Área de Plantio e consumo de mudas.....	171
4.2.2.3.3	Aplicação de resíduos industriais no campo.....	171
4.2.2.3.4	Colheita.....	172
4.2.2.3.5	Consumos de calcário e gesso.....	172
4.2.2.3.6	Consumo de fertilizantes minerais.....	173
4.2.2.3.7	Consumo de Pesticidas.....	173
4.2.2.3.8	Consumo de óleo diesel.....	174
4.2.2.3.9	Uso do solo.....	174
4.2.2.3.10	Captura de CO <sub>2</sub> .....	175
4.2.2.3.11	Emissões para o Ar.....	175
4.2.2.3.12	Emissões para o Solo.....	178
4.2.2.3.13	Emissões para a Água.....	180
4.2.2.3.14	Transportes.....	180
4.2.2.3.15	Banco de dados utilizado.....	182
4.2.2.3.16	Inventário Consolidado da produção de cana-de-açúcar.....	183
4.2.2.4	Subsistema de produção de etanol anidro.....	185
4.2.2.4.1	Transportes.....	187
4.2.2.4.2	Banco de dados utilizado.....	188
4.2.2.4.3	Inventário Consolidado da produção de etanol anidro.....	188
4.2.2.5	Subsistema de produção de biodiesel.....	190

4.2.2.5.1 Transporte.....	192
4.2.2.5.2 Banco de dados .....	192
4.2.2.5.3 Inventário Consolidado da produção de biodiesel etílico de soja	193
4.2.2.6 Subsistema da mistura do biodiesel ao óleo diesel.....	193
4.2.2.6.1 Inventário Consolidado da mistura do biodiesel ao óleo diesel...	194
4.2.2.7 Subsistema de uso do B5 em ônibus .....	195
4.2.2.7.1 Inventário Consolidado do uso do da mistura B5 em ônibus.....	196
4.3 <i>Avaliação de Impacto</i> .....	197
<b>5 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>202</b>
5.1 <i>Análise de Contribuição</i> .....	202
5.1.1 Mudanças Climáticas.....	202
5.1.2 Depleção do Ozônio Estratosférico .....	203
5.1.3 Toxicidade Humana.....	205
5.1.4 Formação de Foto-oxidantes.....	205
5.1.5 Formação de Material Particulado .....	207
5.1.6 Acidificação Terrestre .....	208
5.1.7 Eutrofização em Água Doce .....	209
5.1.8 Ecotoxicidade Terrestre.....	210
5.1.9 Ecotoxicidade em Água Doce.....	211
5.1.10 Ocupação de Área Agrícola.....	212
5.1.11 Transformação de Área Natural.....	213
5.1.12 Depleção de Água .....	214
5.1.13 Depleção Fóssil .....	215
5.2 <i>Análise de Sensibilidade</i> .....	216
<b>6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>220</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>222</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Consumo Final de Energia por Fonte: Mundo, em 2008.....	24
Figura 2 - Consumo Final de Energia por Fonte: Brasil, em 2010.....	25
Figura 3 – Esquema da Destilação Atmosférica.....	36
Figura 4 – Reação de Transesterificação.....	44
Figura 5 – Fluxograma da produção de biodiesel pelo processo de transesterificação .....	45
Figura 6 – Potencial das oleaginosas nas Regiões do Brasil.....	48
Figura 7 – Integração das plantas industriais de óleo, álcool e biodiesel.....	50
Figura 8 – Percentagens mínimas obrigatórias e prazos da adição do biodiesel ao óleo diesel.....	57
Figura 9 – Matérias-primas utilizadas na produção de biodiesel.....	60
Figura 10 – Evolução da Capacidade Nominal, Produção Mensal e Demanda Compulsória Autorizada pela ANP no ano de 2009 .....	61
Figura 11 – Calendário de Plantio e Colheita da Soja.....	67
Figura 12 – Fluxograma simplificado da produção de grãos de soja .....	68
Figura 13 – Fluxograma simplificado da produção de óleo bruto.....	70
Figura 14 – Aspecto geral da cana-de-açúcar.....	74
Figura 15 – Etapas do cultivo da cana-de-açúcar .....	77
Figura 16 – Fluxograma da produção de açúcar e etanol na usina.....	79
Figura 17 – Fases de uma ACV .....	86
Figura 18 – Fluxograma representativo do sistema de produto de um calçado de couro .....	94
Figura 19 – Exemplo da aplicação do critério de alocação por massa.....	98
Figura 20 - Exemplo da aplicação do critério econômico de alocação.....	98
Figura 21 – Exemplo de processo “caixa-preta” .....	100
Figura 22 – Tratamento da multifuncionalidade por meio da subdivisão.....	100
Figura 23 – Elementos da fase de AICV .....	102
Figura 24 – Conceito de indicador de categoria .....	104
Figura 25 – Exemplo das modelagens <i>midpoint</i> e <i>endpoint</i> aplicadas para a categoria de impacto depleção da camada de ozônio .....	105
Figura 26 – Representação gráfica do Sistema de Produto do uso do óleo diesel .	122



Figura 27 – Representação gráfica do Sistema de Produto do uso da mistura B5 .123	
Figura 28 – Desempenho ambiental para cada uma das categorias de impacto avaliadas, segundo nível <i>midpoint</i> .....	198

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Oleaginosas e suas características .....	47
Tabela 2 – Vantagens e desvantagens do metanol e etanol para a produção de biodiesel no Brasil .....	49
Tabela 3 – Área Plantada, Produtividade e Produção da Soja na Safra 2010/2011 <sup>1</sup>	72
Tabela 4 – Balanço de oferta e demanda de farelo e óleo de soja no Brasil – Safras 2006/07 a 2010/2011, em mil toneladas .....	72
Tabela 5 – Produção mundial de óleos em 2008 .....	73
Tabela 6 – Produção brasileira de óleo e gorduras em 2008 .....	73
Tabela 7 – Exemplos de categorias de impacto segundo as modelagens <i>midpoint</i> e <i>endpoint</i> .....	106
Tabela 8 – Exemplos de categorias de impacto e respectivos resultados do indicador de categoria.....	109
Tabela 9 – Dados médios de produção e importação de petróleo em São Paulo...	129
Tabela 10 – Dados médios <sup>a</sup> de volume de petróleo processado nas refinarias paulistas e contribuição do petróleo extraído no estado de São Paulo .....	130
Tabela 11 – Inventário da extração de 1 kg petróleo .....	131
Tabela 12 – Dados médios <sup>a</sup> de produção de óleo diesel nas refinarias paulistas e importação.....	134
Tabela 13 – Dados médios de produção (em m <sup>3</sup> ) de derivados do petróleo nas refinarias paulistas .....	134
Tabela 14 – Distâncias de transporte (marítimo) do petróleo importado até o porto brasileiro.....	135
Tabela 15 – Distâncias de transporte (via oleoduto) do petróleo importado até as refinarias.....	135
Tabela 16 – Inventário da produção de 1 kg de óleo diesel após alocação .....	138
Tabela 17 – Terminais de armazenamento da Petrobras .....	140
Tabela 18 – Inventário da produção de 1 kg de óleo diesel .....	140
Tabela 19 – Cálculo dos fatores de emissão dos poluentes atmosféricos para o óleo diesel.....	142
Tabela 20 – Inventário do transporte de 100 km, em ônibus da Mercedes-Benz, com combustível óleo diesel .....	143

Tabela 21 – Produtos comerciais e i.a. adotados para a cultura de soja .....	146
Tabela 22 – Valores absolutos de área e transformação do solo entre as safras 2007/2008 e 2010/2011 .....	149
Tabela 23 – Valores médios de transformação e ocupação do solo pela soja.....	150
Tabela 24 – Emissões estimadas de CO <sub>2</sub> decorrentes do uso do solo pela soja....	154
Tabela 25 – Origem e teor de metais pesados de produtos agrícolas utilizadas na soja.....	157
Tabela 26 – Emissões de metais pesados para o solo pela cultura da soja .....	158
Tabela 27 – Distâncias de transporte dos insumos agrícolas da soja.....	162
Tabela 28 – Elementos do <i>Ecoinvent</i> adotados na produção de soja.....	163
Tabela 29 – Inventário da produção de 1 kg de soja.....	164
Tabela 30 – Referências consultadas com respectivos dados de extração do óleo de soja.....	166
Tabela 31 – Distâncias de transporte dos insumos da produção de óleo de soja...	169
Tabela 32 – Elementos do <i>Ecoinvent</i> adotados na produção de óleo de soja .....	169
Tabela 33 – Inventário da produção de 1 kg de óleo de soja após alocação .....	169
Tabela 34 – Caracterização do esquema de plantio de cana-de-açúcar adotado no estudo .....	171
Tabela 35 – Caracterização do esquema de colheita <sup>a</sup> de cana-de-açúcar adotada no estudo .....	172
Tabela 36 – Teor de nutrientes recomendado nos diferentes estágios da cana-de-açúcar .....	173
Tabela 37 – Tipo e quantidade de fertilizantes aplicados na cana-de-açúcar.....	173
Tabela 38 – Teor de nutrientes recomendado nos diferentes estágios da cana-de-açúcar .....	174
Tabela 39 – Consumo de óleo diesel por grupo de processos agrícola da cana-de-açúcar .....	174
Tabela 40 – Valores médios de transformação e ocupação do solo pela cana-de-açúcar .....	175
Tabela 41 – Fatores de emissão para a queima de óleo diesel em maquinários agrícolas.....	175
Tabela 42 – Fatores de emissão para a queima da palha anterior à colheita .....	177
Tabela 43 – Emissões estimadas de CO <sub>2</sub> decorrentes do uso do solo pela cana-de-açúcar .....	178

Tabela 44 – Origem e teor de metais pesados de produtos agrícolas utilizadas na cana-de-açúcar .....	179
Tabela 45 – Emissões de metais pesados para o solo pela cultura da cana-de-açúcar .....	180
Tabela 46 – Distâncias de transporte dos insumos agrícolas da cana-de-açúcar...	181
Tabela 47 – Dados da operação de 1 m <sup>3</sup> pelo sistema de aspersão da vinhaça ....	182
Tabela 48 – Elementos do Ecoinvent adotados na produção de cana-de-açúcar ..	183
Tabela 49 – Inventário da produção de 1 kg de cana-de-açúcar .....	183
Tabela 50 – Distâncias de transporte dos insumos da produção de etanol .....	188
Tabela 51 – Elementos do Ecoinvent adotados na produção de etanol.....	188
Tabela 52 – Inventário da produção de 1 kg de etanol anidro após alocação .....	189
Tabela 53 – Dados brutos da produção de biodiesel, no ano de 2011 .....	191
Tabela 54 – Distâncias de transporte dos insumos da produção de biodiesel.....	192
Tabela 55 – Elementos do Ecoinvent adotados na produção de biodiesel .....	192
Tabela 56 – Inventário da produção de 1 kg de biodiesel etílico de soja após alocação.....	193
Tabela 57 – Inventário da geração de 0,84135 kg da mistura B5 .....	195
Tabela 58 – Cálculo dos fatores de emissão dos poluentes atmosféricos para o B5 .....	196
Tabela 59 – Inventário do transporte de 100 km, em ônibus da Mercedes-Benz, com combustível B5.....	196
Tabela 60 – Resultados da Avaliação de Impacto, em nível <i>midpoint</i> , do transporte de 100 km, em ônibus da Mercedes-Benz .....	197
Tabela 61 – Resultados da Avaliação de Impacto, em nível <i>endpoint</i> , do transporte de 100 km, em ônibus da Mercedes-Benz, com óleo diesel .....	199
Tabela 62 – Resultados da Avaliação de Impacto, em nível <i>endpoint</i> , do transporte de 100 km, em ônibus da Mercedes-Benz, com mistura B5 .....	200
Tabela 63 – Principais processos elementares contribuintes para a categoria Mudanças Climáticas .....	202
Tabela 64 – Principais aspectos ambientais contribuintes para a categoria Mudanças Climáticas.....	203
Tabela 65 – Principais processos elementares contribuintes para a categoria Depleção do Ozônio Estratosférico .....	204

Tabela 66 – Principais aspectos ambientais contribuintes para a categoria Depleção do Ozônio Estratosférico .....	204
Tabela 67 – Principais processos elementares contribuintes para a categoria Toxicidade Humana .....	205
Tabela 68 – Principais aspectos ambientais contribuintes para a categoria Toxicidade Humana .....	205
Tabela 69 – Principais processos elementares contribuintes para a categoria Formação de Foto-oxidantes.....	206
Tabela 70 – Principais aspectos ambientais contribuintes para a categoria Formação de Foto-oxidantes.....	206
Tabela 71 – Principais processos elementares contribuintes para a categoria Formação de Material Particulado.....	207
Tabela 72 – Principais aspectos ambientais contribuintes para a categoria Formação de Material Particulado.....	207
Tabela 73 – Principais processos elementares contribuintes para a categoria Acidificação Terrestre.....	208
Tabela 74 – Principais aspectos ambientais contribuintes para a categoria Acidificação Terrestre.....	208
Tabela 75 – Principais processos elementares contribuintes para a categoria Eutrofização em Água Doce.....	209
Tabela 76 – Principais aspectos ambientais contribuintes para a categoria Eutrofização em Água Doce.....	209
Tabela 77 – Principais processos elementares contribuintes para a categoria Ecotoxicidade Terrestre .....	210
Tabela 78 – Principais aspectos ambientais contribuintes para a categoria Ecotoxicidade Terrestre .....	211
Tabela 79 – Principais processos elementares contribuintes para a categoria Ecotoxicidade em Água Doce .....	211
Tabela 80 – Principais aspectos ambientais contribuintes para a categoria Ecotoxicidade em Água Doce .....	212
Tabela 81 – Principais processos elementares contribuintes para a categoria Ocupação de Área Agrícola .....	212
Tabela 82 – Principais aspectos ambientais contribuintes para a categoria Ocupação de Área Agrícola.....	213

Tabela 83 – Principais processos elementares contribuintes para a categoria Transformação de Área Natural .....	214
Tabela 84 – Principais aspectos ambientais contribuintes para a categoria Transformação de Área Natural .....	214
Tabela 85 – Principais processos elementares contribuintes para a categoria Depleção de Água.....	214
Tabela 86 – Principais aspectos ambientais contribuintes para a categoria Depleção de Água.....	215
Tabela 87 – Principais processos elementares contribuintes para a categoria Depleção Fóssil.....	216
Tabela 88 – Principais aspectos ambientais contribuintes para a categoria Depleção Fóssil.....	216
Tabela 89 – Análise de sensibilidade medida em nível <i>endpoint</i> .....	219

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>ABIOVE</b>	Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais
<b>ABNT</b>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<b>ACV</b>	Avaliação do Ciclo de Vida
<b>AICV</b>	Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida
<b>Anfavea</b>	Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores
<b>ANP</b>	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
<b>API</b>	American Petroleum Institute
<b>BEN</b>	Balanco Energético Nacional
<b>CFC</b>	Cloro-fluor-carbono
<b>CH<sub>4</sub></b>	Metano
<b>CNPE</b>	Conselho Nacional de Política Energética
<b>CO</b>	Monóxido de carbono
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de carbono
<b>CONAB</b>	Companhia Nacional de Abastecimento
<b>DAP</b>	Fosfato de diamônio
<b>GEE</b>	Gás de Efeito Estufa
<b>HC</b>	Hidrocarbonetos
<b>ICV</b>	Inventário de Ciclo de Vida
<b>IPCC</b>	Intergovernmental Panel on Climate Change
<b>ISO</b>	International Organization for Standardization
<b>K<sub>2</sub>O</b>	Óxido de potássio
<b>MAP</b>	Fosfato de monoamônio
<b>MCT</b>	Ministério de Ciência e Tecnologia
<b>MP</b>	Material particulado
<b>N<sub>2</sub>O</b>	Óxido de dinitrogênio
<b>NH<sub>3</sub></b>	Amônia
<b>NMVOG</b>	Compostos Orgânicos Voláteis Não-Metano
<b>NO<sub>x</sub></b>	Óxidos de enxofre
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	Nitrato
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	Pentóxido de difósforo
<b>PNPB</b>	Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel
<b>SO<sub>2</sub></b>	Dióxido de enxofre

<b>SO<sub>x</sub></b>	Óxidos de enxofre
<b>SSP</b>	Superfostato simples
<b>TSP</b>	Superfosfato triplo
<b>UF</b>	Unidade Funcional
<b>UNICA</b>	União da Indústria de Cana-de-açúcar
<b>VOC</b>	Compostos Orgânicos Voláteis



## 1 INTRODUÇÃO

A disponibilidade de energia é um fator fundamental para o desenvolvimento de qualquer país. Nos séculos XIX e XX, predominaram quase que exclusivamente o uso das fontes fósseis, como o carvão mineral e, mais recentemente, o petróleo e seus derivados.

No entanto, com as preocupações relativas ao esgotamento das reservas mundiais e às fortes oscilações no preço destes combustíveis, aliadas a uma maior conscientização ambiental, imagina-se que este século XXI será caracterizado pela crescente utilização da chamada agroenergia – a energia renovável que vem da agricultura –, na qual os biocombustíveis possuem destacado papel.

Dentre os combustíveis oriundos da biomassa, atualmente dois deles despontam como estratégicos na substituição das alternativas fósseis, a saber: o etanol (álcool etílico) para o uso principalmente em automóveis leves; e o biodiesel, para utilização em veículos pesados, maquinários agrícolas, geradores de energia elétrica, entre outros.

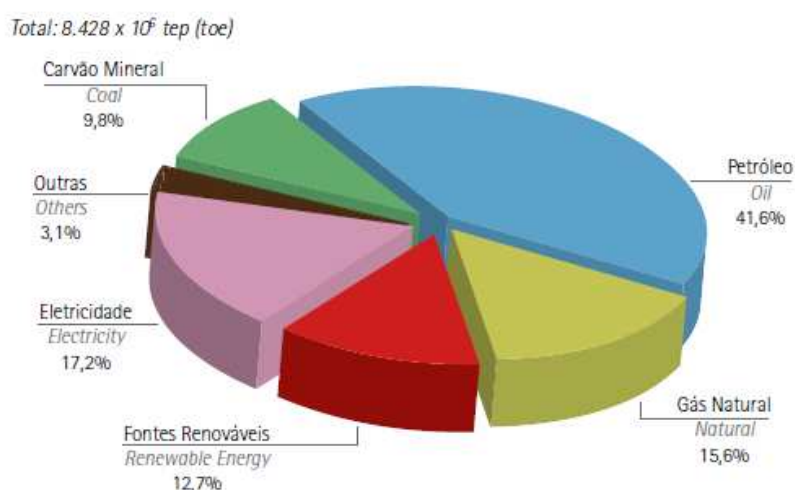
Dentro deste cenário, o Brasil é apontado por muitos como candidato natural para liderar a produção mundial de combustíveis renováveis. As razões que levam o país a esta favorável condição são: a) localização geográfica na faixa tropical e subtropical do planeta, que proporciona insolação em todo o território; b) grande oferta de terras aptas para a agricultura da energia; c) condições favoráveis de clima; d) disponibilidade de água doce, fator este que favorece a irrigação; e) experiência e domínio da tecnologia de produção (BRASIL, 2004a, 2005a).

A questão da disponibilidade de terras é um ponto bastante discutido em relação à expansão de biocombustíveis, porque uma corrente de opiniões teme que a agricultura energética avance em áreas destinadas à agricultura alimentar, o que poderia acarretar no aumento do preço dos alimentos no mercado internacional, além do desmatamento de alguns biomas; no caso do Brasil, principalmente o Cerrado e a Floresta Amazônica.

Cavalett (2008) defende que a produção de soja, principal opção na produção de biodiesel no país, já causou o desaparecimento de 57% do Cerrado e a parte remanescente se encontra bastante alterada, o que leva a uma perda de biodiversidade. Em relação à Amazônia, o autor afirma que a monocultura voltada

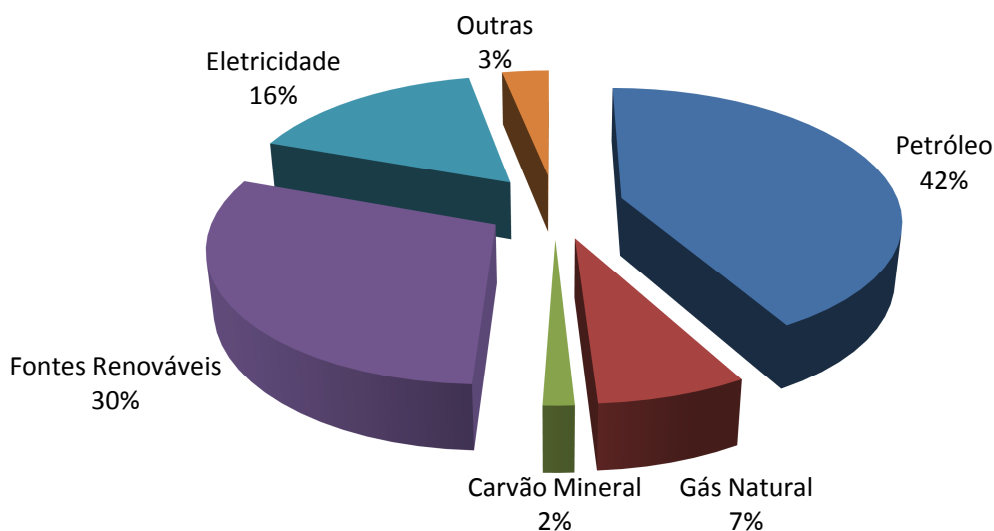
para exportação tem grande correlação com o processo de desmatamento da floresta. Por outro lado, Macedo e Nogueira (2004) apontam que para atender à produção de biodiesel para ser misturado ao óleo diesel em 5% (base volumétrica) com oleaginosas locais, seria necessário uma área de cerca de 3 Mha, sendo que a área de expansão de grãos corresponde a 90 Mha. Brasil (2005a) acrescenta que a agricultura de energia pode ser implantada em integração com a pecuária, áreas de recuperação de pastagens e áreas de reflorestamento, sem a necessidade de avançar sobre reservas florestais.

No que diz respeito ao debate sobre a relação entre o aumento do preço dos alimentos e expansão dos biocombustíveis, Cortez (2010) defende que a elevação está vinculada a razões complexas, que frequentemente pouco tem a ver com os biocombustíveis, tais como: falta de investimentos na agricultura; objetivos de curto prazo; especulação, injustiça social; e pobreza e mudanças de hábitos alimentares. Adicionalmente, o autor sinaliza que o presente debate tem sido dirigido por questões políticas, morais e éticas, e revestidas por interesses, ao invés de ciência. Voltando para a questão das fontes de energias comumente utilizadas, nos dias atuais ainda prevalece o consumo das opções não renováveis. As Figura 1 e Figura 2 ilustram a participação das diversas fontes energéticas no consumo final de energia no contexto mundial e nacional, respectivamente.



**Figura 1 – Consumo Final de Energia por Fonte: Mundo, em 2008**

Fonte: BRASIL, 2011a.



**Figura 2 - Consumo Final de Energia por Fonte: Brasil, em 2010**

Fonte: BRASIL, 2011a.

Percebe-se então que o nível de participação do petróleo na matriz nacional é semelhante ao do contexto mundial, em torno de 42%. Por outro lado, a participação das fontes renováveis no Brasil alcançou quase um terço do total energético, com destaque para o bagaço da cana-de-açúcar e o álcool etílico que somados totalizaram 18,4%, enquanto que no mundo a média é próxima de um oitavo. Outro fato que merece menção do contexto brasileiro é que praticamente 75% da oferta de energia elétrica provêm de origem hidráulica (BRASIL, 2011a).

Ainda que a energia de origem fóssil predomine nos dias atuais, as fontes renováveis vêm ocupando cada vez mais um papel de destaque no mercado de energia. Essa ascensão está muito ligada à preocupação com o esgotamento das reservas fósseis, dado o consumo acelerado destes insumos pela humanidade nas últimas décadas, bem como à questão ambiental, na qual as fontes renováveis são comumente citadas como causadoras de menor impacto no meio ambiente em relação às fontes fósseis. Soetaert e Vandamme (2009) sinalizam que o petróleo se esgotará nos próximos 50 anos, enquanto que as reservas de gás natural e carvão mineral se extinguirão em 65 e 200 anos, respectivamente.

Apoiadas nestas questões, atualmente as grandes empresas petrolíferas não se limitam a atuarem exclusivamente no ramo do petróleo, mas têm buscado alcançar um novo *status* de empresa de energia, razão esta que acaba demandando investimentos adicionais em outras fontes alternativas, com grande atenção para as renováveis. Corroborando esta moderna tendência, cabe citar dois exemplos, uma

de companhia internacional e outra nacional, que ilustram esta mudança no rumo dos negócios.

A companhia britânica BP, anteriormente chamada de *British Petroleum* hoje é conhecida como *Beyond Petroleum*, indicando que a sua atuação vai além (*beyond*) do setor petrolífero. No caso brasileiro, a Petrobras vem se tornando uma das maiores empresas do segmento de petróleo, mas sem deixar de investir paralelamente em outras formas de energia renovável, entre elas os biocombustíveis e as energias solar e eólica. Segundo informações do site da companhia brasileira, no Planejamento Estratégico de 2020, US\$ 1,3 bilhões serão investidos no desenvolvimento de energias renováveis (PETROBRAS, 2011).

O significativo crescimento econômico que o Brasil vem experimentando ao longo dos últimos anos, e a perspectiva de manutenção deste cenário, demandará um aumento expressivo na demanda de energia. Apoiando-se na crescente importância das fontes renováveis não é de se esperar que o suprimento desta necessidade seja apoiado no aumento, exclusivamente, de energia a partir de fontes fósseis.

As crises energéticas que abalaram o fornecimento mundial de energia, decorrentes dos dois grandes choques do petróleo (em 1973 e 1979), fizeram com que o Homem percebesse a sua perigosa dependência em relação às fontes fósseis e o papel vital que a energia ocupa em termos de sustentação do desenvolvimento. Segundo Parente (2003), os esforços para a superação destas crises energéticas, incidiram basicamente em duas linhas de ação: conservação ou economia de energia; e uso de fontes alternativas de energia.

O Brasil há algumas décadas vem atuando de forma expressiva nesta segunda linha, e assim como o etanol já se consolidou como uma alternativa à gasolina, o biodiesel apresenta um grande potencial para ser a opção renovável frente ao óleo diesel mineral e, assim, reduzir a dependência do setor de transportes em relação aos derivados do petróleo.

O biodiesel é um biocombustível produzido a partir de óleos vegetais ou gordura animal, que pode substituir, total ou parcialmente, o diesel de origem fóssil em motores de combustão ou em outro tipo de geração de energia (BRASIL, 2005b; 2006a).

A princípio, quando se pensa no biodiesel imagina-se seu uso exclusivamente como um combustível alternativo ao diesel do petróleo em veículos de carga ou pessoas;

porém, o mesmo pode ser utilizado na geração de energia elétrica, em especial em regiões isoladas, onde pode ser produzido a partir das oleaginosas locais.

Avaliando as oportunidades econômica, ambiental e, principalmente, social que a introdução de um mercado nacional de biodiesel poderia trazer para o país, o Governo Federal decidiu, em 06 de dezembro de 2004, pela criação do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB). O PNPB foi lançado com o objetivo de implementar e incentivar a produção e uso do biodiesel, promovendo a inclusão social de diversas regiões rurais do país (BRASIL, 2006b).

Na sequência do PNPB, foi promulgada, em Janeiro de 2005, a Lei N° 11.097, um marco legal para a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira. Isso porque tal dispositivo definiu os percentuais mínimos obrigatórios de adição de biodiesel ao óleo diesel comercializado ao consumidor final, em qualquer parte do território nacional (BRASIL, 2005b).

Segundo ANP (2011), a produção de biodiesel em 2008, ano que se iniciou a mistura obrigatória de 2%, foi de 1,17 bilhões de litros. Em 2010, ano que a adição de 5% de biodiesel ao diesel foi compulsória, a produção do biocombustível atingiu a casa dos 2,4 bilhões de litros. Tal crescimento, da ordem de 86%, demonstra a importância do biodiesel dentro do plano estratégico nacional. Em 2008, o uso de biodiesel evitou a importação de 1,1 bilhões de litros de diesel, o que resultou na economia de US\$ 976 milhões para o país (BRASIL, 2010a).

Em geral, ao se classificar uma fonte como renovável fica também a impressão, pelo menos em um primeiro instante, de que esta será compulsoriamente vantajosa nos méritos ambiental e social que sua equivalente fóssil. No entanto, para que isto se comprove é necessário que se faça a avaliação de seus desempenhos – ambiental, econômico e social – preferencialmente em âmbito sistêmico.

A avaliação do desempenho de qualquer produto, em termos da dimensão ambiental da sustentabilidade, deve levar em consideração todos os impactos ambientais que ocorrem ao longo do seu ciclo de vida, até que o produto cumpra a sua função. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é a única técnica da gestão ambiental que possibilita esta avaliação (SILVA; KULAY, 2007).

Diversas são as publicações que relatam melhorias ambientais decorrentes da substituição do biodiesel pelo diesel, em termos da redução de emissão atmosférica de dióxido de enxofre, monóxido de carbono, material particulado e hidrocarbonetos (BRASIL, 2004b; CAMPOS; CARMELIO, 2006; KNOTHE ET AL., 2006). Segundo

Brasil (2003), a redução da poluição pela substituição do diesel pelo biodiesel evitaria gastos de variada ordem, em especial relacionado ao setor de saúde. Estimativas apontadas neste relatório sinalizam que a substituição total do diesel pelo biodiesel proporcionaria a redução de custos da ordem de R\$ 192 milhões anuais, nas 10 principais cidades brasileiras, e em aproximadamente R\$ 873 milhões, em nível nacional.

No entanto, deve-se ter em mente que estas melhorias referem-se apenas à etapa de uso do produto, ou seja, durante a combustão dos combustíveis, para efeito da produção de energia. Por avaliar os impactos ambientais sob uma ótica sistêmica, incluindo a fase de uso, a ACV permite identificar com maior precisão qual alternativa acarreta menor impacto para o meio ambiente.

Cabe destacar também que o uso de biodiesel em substituição ao óleo diesel não traz apenas ganhos ambientais. Impactos decorrentes da contaminação do solo e da água em virtude do uso de pesticidas e herbicidas, e a transformação da vegetação natural para fins agrícolas são decorrências naturais da alternativa renovável que precisam ser avaliadas.

Diante desta necessidade de uma visão sistêmica sobre os impactos ambientais associados aos produtos, criou-se, no final da década de 1990, no Departamento de Engenharia Química da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, o Grupo de Prevenção da Poluição (GP2), sob a coordenação do professor Dr. Gil Anderi da Silva. O GP2, que inicialmente surgiu para atuar na área de prevenção da poluição, logo adotou a ACV como linha de pesquisa principal, apostando na importância da ferramenta e na necessidade de sua difusão junto aos diversos segmentos da sociedade.

Atualmente, o GP2 apresenta duas linhas de pesquisas voltadas para a ACV. A primeira que trabalha na elaboração de Inventários de Ciclo de Vida (ICV) de produtos, processos ou serviços, e que acaba por contribuir para o projeto de construção de um banco de dados brasileiro. A segunda linha de pesquisa enfoca a metodologia de ACV propriamente dita, buscando trabalhar em cima de temas que ainda geram discussões dentro da comunidade científica que trata do tema, e em adaptações dos modelos de impacto ambiental à realidade nacional.

A importância da existência de um banco de dados brasileiro se fundamenta na disponibilidade de uso de ICV de elementos comuns a outros estudos de ACV, que traz uma economia tanto de recurso quanto de tempo na execução do estudo. Por

sua vez, a busca por um melhor desenvolvimento da metodologia e adaptação dos modelos de impacto ao contexto brasileiro, tem por objetivo tornar a avaliação mais próxima do modelo físico que se pretende investigar, reduzindo as distorções nos resultados finais.

Apresentado o contexto, a realização do presente trabalho se justifica pela necessidade de avaliações claras, objetivas e bem embasadas da validade da substituição de fontes fósseis por equivalentes renováveis, em termos da melhoria de desempenho ambiental, realizadas segundo um enfoque sistêmico.

Apesar da produção nacional de biodiesel ter um forte apelo de inclusão social, este viés não será tratado nesta dissertação, uma vez que a ACV enfoca na avaliação da questão ambiental.

Como neste trabalho pretendeu-se avaliar os desempenhos ambientais de um combustível fóssil e outro renovável, a escolha da soja baseou-se no fato deste insumo agrícola ser a fonte de matéria-prima oleaginosa mais utilizada na produção do biodiesel brasileiro. A opção pela rota etílica, apesar de minoritária no país, em termos de volume de produção, deveu-se ao apelo ambiental favorável deste álcool em relação ao metanol.

## 2 OBJETIVOS

O objetivo desta dissertação de mestrado é comparar os desempenhos ambientais do óleo diesel com a da mistura B5 – 95% de óleo diesel mineral e 5% de biodiesel etílico de soja, em volume.

Dessa forma, procurou-se determinar quais benefícios e ônus, em termos de impactos ambientais, acarretados pela adição de 5% do éster etílico de soja ao óleo diesel.

Em decorrência da execução deste trabalho, ICV de elementos como: soja; óleo de soja; cana-de-açúcar; etanol anidro; biodiesel etílico de soja; óleo diesel; e operação de ônibus urbano foram elaborados e estarão disponíveis para uso em futuras ACV. Tal contribuição vai ao encontro da necessidade de criação e disponibilização de um banco de dados brasileiro para apoio a estudos desta natureza.



### **3 REVISÃO DA LITERATURA**

A etapa de revisão da literatura foi desenvolvida com vistas à aquisição de conhecimento sobre as questões que envolvem este trabalho. Neste contexto, a pesquisa bibliográfica englobou publicações que tenham como temas gerais: óleo diesel; biodiesel; e ACV.

Particularmente no que se refere ao biodiesel, a pesquisa estendeu-se para a fabricação de óleo de soja e etanol anidro, elementos necessários para a produção do biodiesel escolhido para o estudo.

#### **3.1 COMBUSTÍVEIS UTILIZADOS EM MOTORES DO CICLO DIESEL**

##### **3.1.1 Óleo Diesel**

O óleo diesel é um produto derivado do petróleo, que por sua vez é uma substância líquida composta por uma mistura de hidrocarbonetos (carbono e hidrogênio em sua composição); outros elementos são também encontrados no petróleo, mas que em quantidades bem inferiores (THOMAS, 2004):

- ✓ Hidrogênio (H): 11 a 14%;
- ✓ Carbono (C): 83 a 87%;
- ✓ Enxofre (S): 0,06 a 8%;
- ✓ Nitrogênio (N): 0,11 a 1,7%;
- ✓ Oxigênio (O): 0,1 a 2%; e
- ✓ Metais: até 0,3%.

Dada às condições – idade, pressão, temperatura, entre outras – em que cada reservatório de petróleo foi originado, é válido dizer que não existem dois tipos de petróleo iguais no mundo.

Existem várias formas de se classificar o petróleo, como, por exemplo, pela porcentagem de seus constituintes ou densidade. Em relação à porcentagem de seus constituintes, o mesmo é classificado em: parafínico (ideal para a produção de diesel); parafínico-naftênico, naftênico; aromático intermediário; aromático-naftênico; e aromático-asfáltico (SZKLO; ULLER, 2008).

Outra classificação bastante usual é aquela que se baseia na densidade volumétrica da substância, comumente medido pelo seu grau API<sup>1</sup>. Neste sistema, os petróleos são divididos em:

- ✓ Leves:  $API > 31,1$ ;
- ✓ Médios:  $22,3 < API < 31,1$ ;
- ✓ Pesados:  $10 < API < 22,3$ ; e
- ✓ Extra-Pesados:  $API < 10,0$ .

O petróleo no seu estado primário possui pouca, ou quase nenhuma, utilidade, e a obtenção de produtos secundários (derivados) de maior valor agregado ocorre por diferentes processos dentro de uma refinaria.

O óleo diesel é um destes derivados, caracterizando-se por ser um combustível largamente utilizado em veículos de carga pesada e em maquinários agrícolas. Os motores a ciclo diesel são indicados para veículos que necessitam de elevada potência e, por apresentarem maior durabilidade que os motores a gasolina (ciclo Otto), a preferência por sua opção também tem aumentado junto aos veículos de carga leve.

Dentro do setor de transporte, o óleo diesel ocupa papel de destaque no cenário nacional, dado que mais de 70% das cargas brasileiras são transportadas por meio de rodovias. No entanto, a escolha do modal rodoviário, em detrimento dos meios ferroviário e hidroviário, implica em maior consumo de combustível para o deslocamento de uma mesma carga ao longo de uma mesma distância (PARENTE, 2003).

O elevado consumo de diesel no transporte rodoviário brasileiro não é plenamente satisfeito com a produção nacional, o que demanda a importação deste produto. A importação de diesel, em 2011, alcançou o maior patamar nos últimos dez anos, com um total aproximado de 9,3 milhões de m<sup>3</sup> (ANP, 2012).

### **3.1.1.1 Histórico do Óleo Diesel**

O primeiro registro da utilização de um motor diesel data de agosto de 1893, e o nome foi dado em homenagem ao seu inventor, o alemão Rudolf Diesel. Porém,

---

<sup>1</sup> Escala hidrométrica criada pelo American Petroleum Institute (API) para medir a densidade relativa de óleos e derivados.

este motor foi originalmente abastecido com óleo de amendoim, uma vez que a obtenção de óleo diesel derivado do petróleo ainda não havia sido consumada.

Os primeiros motores do ciclo diesel continuaram a ser operados com o uso de óleos vegetais; apenas após a morte de Rudolf Diesel, em 1913, que a indústria do petróleo criou um novo tipo de combustível, batizado de óleo diesel. Este passou então a ser largamente utilizado nestes tipos de motores, em razão de ser mais barato frente aos seus concorrentes vegetais (KNOTHE ET AL., 2006).

A respeito da indústria do petróleo, o marco da exploração comercial de um poço ocorreu em 1859, em Tittusville, Pensilvânia (EUA). Tal poço foi operado pelo Coronel Edwin Drake e é considerado o primeiro da história petrolífera, com 21 metros de profundidade e produção de 2 m<sup>3</sup> de óleo /dia (THOMAS, 2004).

Na sua origem, a produção de petróleo ocorria fundamentalmente para a produção de querosene de iluminação, dada sua chama clara e queima com menos fumaça (SZKLO; ULLER, 2008). Conforme o crescimento do uso de óleo diesel no setor de transporte – e posteriormente também da gasolina –, a indústria do petróleo passou a focar seu negócio nos combustíveis para uso em automotores.

### **3.1.1.2 Processo de Produção de Óleo Diesel**

O óleo diesel é um derivado do petróleo, fato este que implica que a descrição do seu processo produtivo deva começar a partir da exploração do petróleo. Foge ao escopo desta dissertação descrever em detalhes a complexa cadeia petrolífera; sendo assim, nos parágrafos a seguir será apresentado, de maneira geral, o sistema de produção do óleo diesel.

A cadeia do petróleo envolve diversas atividades que vão além da extração propriamente dita do recurso natural. De acordo com Thomas (2004), existem as etapas *upstream*, caracterizadas pela exploração e produção; e as *downstream*, das quais merecem destaque o transporte e o refino.

A exploração compreende a fase de prospecção de petróleo, ou seja, a busca de formações geológicas que contenham o recurso e, obviamente, viáveis de serem manejadas.

Determinada a viabilidade de uma jazida, e antes de deixá-la em condições de produção (ou exploração), são necessárias as etapas de perfuração do poço e completação. A perfuração de um poço, por sonda, é realizada para que o petróleo

situado a diversos metros de profundidade possa alcançar a superfície, enquanto que a completação consiste no conjunto de operações destinadas a deixar o poço em condições econômicas e seguras de produção.

A produção de petróleo geralmente está associada à produção de gás natural<sup>2</sup> e água. Mede-se a relação entre as vazões de gás e de petróleo, na superfície, por meio da razão gás-óleo (RGO). Se a RGO for elevada é um sinal de que o reservatório se encontra com escassez de petróleo, ou que a parcela de componentes mais voláteis na mistura líquida é elevada.

Thomas (2004) afirma que além dos processos diretamente ligados à produção do óleo são necessárias as chamadas “facilidades de produção”. Estas se configuram em instalações voltadas para o processamento primário dos fluidos, onde ocorre a separação do óleo do gás e da água, remoção das impurezas em suspensão, tratamento da água para reinjeção ou descarte e tratamento dos hidrocarbonetos para posterior encaminhamento para as refinarias.

Geralmente os campos de produção, sejam eles do tipo *onshore* ou *offshore*, não são localizados próximos às refinarias e, portanto, é preciso realizar o transporte do petróleo. No caso da exploração em terra, recorre-se predominantemente ao transporte por meio de oleodutos e, em menor proporção, ao ferroviário; para a produção em mar é utilizada uma combinação entre embarcações (navios petroleiros) e oleodutos. Silva (2004) aponta que o modal aquaviário é o de maior participação no transporte petróleo, haja vista a predominância de produção concentrada na exploração do tipo *offshore*.

Ainda segundo Silva (2004), o transporte de petróleo é uma atividade que requer especial atenção quanto à segurança, dado que o derramamento do produto pode causar uma série de impactos negativos para o meio ambiente e os seres vivos que nele habitam.

O petróleo transportado até as refinarias sofre uma série de processos físicos e químicos, a fim de transformar o produto em um conjunto de derivados de aplicações diversas e grande valor comercial. Basicamente, os produtos gerados em uma refinaria podem ser divididos em três categorias (SZKLO; ULLER, 2008):

---

<sup>2</sup> A produção de gás natural pode estar associada ao petróleo e, dessa forma, recebe o nome de gás natural associado. Se a produção ocorre em uma jazida sem a presença, ou com pequenas quantidades, de petróleo ele é dito gás natural não-associado.

- ✓ Combustíveis: gasolina, óleo diesel, óleo combustível, gás liquefeito de petróleo (GLP), querosene de aviação (QAV), querosene de iluminação, coque de petróleo e óleos residuais;
- ✓ Produtos acabados não combustíveis: solventes, lubrificantes, graxas, asfalto e coque; e
- ✓ Intermediários da indústria química: nafta, etano, propano, butano, etileno, propileno, butileno, butadieno e benzeno/tolueno e xileno (BTX).

Assim como não existem dois petróleos iguais no mundo, também não há duas refinarias com mesmo esquema de refino. O conjunto de processos que ocorre em cada refinaria varia em função do tipo de petróleo que é processado e dos derivados que se pode obter, com qualidade e de forma economicamente viável (MARIANO, 2005).

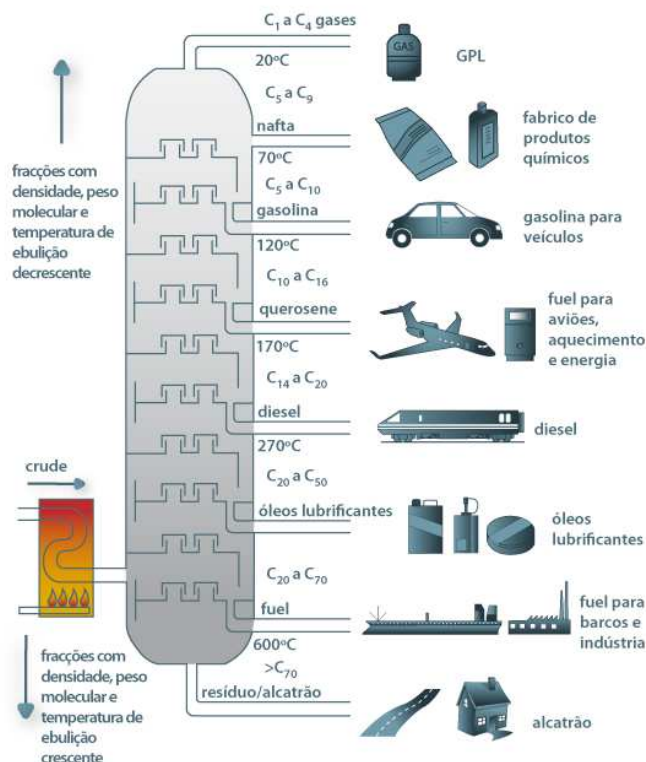
De maneira geral, Camacho e Matai (2009) indicam que o refino de petróleo é composto por três passos:

- a) **Separação**: divisão do petróleo em várias correntes (frações) por meio de processos físicos de destilação e extração por solvente;
- b) **Conversão**: transformação de frações oriundas da separação em produtos com maior valor de mercado via processos térmicos e catalíticos; e
- c) **Acabamento**: purificação das várias correntes de produtos por uma variedade de processos que essencialmente removem impurezas dos produtos.

O primeiro processo ao qual o petróleo é submetido chama-se *Dessalinização* ou *Dessalgação*, que visa à remoção de sais corrosivos, água, metais e sólidos em suspensão que poderiam prejudicar os processos posteriores de separação e conversão.

Após este tratamento inicial, o petróleo é aquecido a cerca de 300-400°C (temperatura máxima para não ocorrer decomposição térmica) e encaminhado para as torres de destilação. Primeiramente ocorre a *Destilação Atmosférica*, onde ao longo da torre se dá a separação do petróleo nas suas diversas frações pelas suas diferenças de ponto de ebulição. Os componentes mais leves, não removidos em nenhum ponto, saem pelo topo e são submetidos a outros processos para gerar novos produtos, como, por exemplo, o GLP. Já os componentes mais pesados (resíduos da coluna de destilação atmosférica, chamado de RAT), saem pelo fundo

da coluna na forma de asfaltos ou cru reduzidos (MARIANO, 2005). A Figura 3 apresenta os produtos obtidos na coluna de destilação atmosférica.



**Figura 3 – Esquema da Destilação Atmosférica**

Fonte:

[http://labvirtual.eq.uc.pt/siteJoomla/index.php?option=com\\_content&task=view&id=224&Itemid=415](http://labvirtual.eq.uc.pt/siteJoomla/index.php?option=com_content&task=view&id=224&Itemid=415).

O RAT da fase anterior é novamente aquecido a 400°C e conduzido para a coluna de Destilação a Vácuo, que por manter pressões muito baixas (0,01 a 0,05 atm) permite a obtenção de correntes, em temperaturas de ebulição mais baixas, que não seriam possíveis nas condições da destilação atmosférica. As correntes das torres a vácuo são: gasóleo leve e gasóleo pesado, que posteriormente são encaminhadas para as unidades de conversão a fim de se obter produtos de maior valor agregado. Não há saída de produtos interessantes no topo, mas no fundo, retira-se o resíduo de vácuo, conhecido como óleo combustível (MARIANO, 2005).

As frações que saem dos processos de destilação (resíduos de destilação e gasóleos) são submetidas a alguns processos de conversão – desasfaltação a propano, desaromatização a furfural, desparafinação e desoleificação, que não são relativos à produção de diesel e visam essencialmente à produção e acabamento de lubrificantes, a ponto de deixa-los adequados para o uso comercial. Os processos de

conversão são divididos em térmicos (fundamentados na ação de calor e pressão) e catalíticos (uso de catalisadores para acelerar as reações químicas).

O primeiro processo térmico é a *Visco-Redução*, cuja finalidade é reduzir a viscosidade dos derivados pesados para aumentar a quantidade de gasóleos, carga dos processos seguintes (CAMACHO; MATAI, 2009).

Na sequência, ocorre o *Craqueamento Térmico*, em que o gasóleo pesado e o resíduo de vácuo são tratados para a produção de gás, GLP e, principalmente, gasolina. Szklo e Uller (2008) afirmam que a visco-redução e o craqueamento térmico vêm sendo substituídos pelo processo de craqueamento catalítico, uma vez que este último trabalha com pressões menores e apresentar maior rendimento em derivados de maior interesse comercial (nafta e GLP ao invés de coque e gás combustível).

Como último processo térmico, tem-se o *Coqueamento Retardado* que transforma resíduo de vácuo em gasóleo, gasolina de coqueamento, diesel, gases combustíveis e coque de petróleo.

Passados os processos de conversão térmicos, iniciam-se os catalíticos (com o uso de catalisadores), começando pelo *Craqueamento Catalítico*. Este processo recebe os gasóleos, RAT e óleo desasfaltado e objetiva, fundamentalmente, a produção de gasolina de alta octanagem.

O *Hidrocraqueamento Catalítico*, que utiliza hidrogênio a altas temperaturas e pressões, é empregado para craquear as frações que não podem ser craqueadas no craqueamento catalítico (MARIANO, 2005). Esta unidade é talvez a mais versátil dentro de uma refinaria, sendo possível a produção de uma ampla gama de derivados, entre eles a nafta e o diesel com baixo teor de enxofre e alto índice de cetanas.

As unidades de *Hidrotratamento* e *Hidroprocessamento* não são voltadas para a produção de derivados, mas para a remoção de impurezas, tais como: enxofre; nitrogênio; haletos; e traços de metais que prejudicam a ação dos catalisadores nas unidades de craqueamento e hidrocraqueamento catalítico. Portanto, o hidrotratamento e o hidroprocessamento ocorrem antes destas unidades craqueadoras.

Ainda no conjunto de processos catalíticos, as refinarias empregam a *Alquilação* e *Polimerização* como meios de produção de gasolina de alta octanagem, e

*Isomerização e Reforma Catalítica* que alteram a estrutura molecular de alguns compostos com o intuito de atribuir a estes melhorias de qualidade.

À luz do que foi exposto nos parágrafos acima, o óleo diesel, objeto de estudo desta dissertação é produzido nos processos de destilação atmosférica (principalmente), coqueamento retardado e hidrocraqueamento catalítico. Porém, como aponta Szklo e Uller (2008), as refinarias brasileiras não apresentam unidades de hidrocraqueamento catalítico e, na ausência destas, opta-se por hidratar misturas de óleo leve de reciclo de craqueamento catalítico e gásóleo leve de coque.

### **3.1.1.3 Mercado de Diesel no Brasil**

Segundo dados da ANP, a produção brasileira de petróleo atingiu, em 2011, a marca de 122,2 milhões de m<sup>3</sup>, número este que coloca o país na 12<sup>a</sup> posição entre os maiores produtores mundiais. Do total da produção, 91% foram extraídos de campos marítimos. Para adequar a demanda, o país ainda importou 19,2 milhões de barris com as seguintes origens e participações (ANP, 2012):

- ✓ Nigéria: 47,4%;
- ✓ Arábia Saudita: 17,5%;
- ✓ Iraque: 8,4%;
- ✓ Argélia: 6,8%;
- ✓ Angola: 6,2%;
- ✓ Líbia: 6,1%; e
- ✓ Demais países: 7,7%.

Em 2011, o volume de petróleo refinado alcançou a marca de 108,3 milhões de m<sup>3</sup>. Atualmente, o parque de refino brasileiro é composto por dezesseis unidades que somadas apresentam uma capacidade de refino de 332,7 mil m<sup>3</sup>/dia. Do total processado, 79,1% foram de origem nacional e 20,9% importado<sup>3</sup>. De todas as refinarias, doze pertencem à Petrobras e responderam por 98,1% da capacidade total (ANP, 2012). Importante destacar que esta empresa também é a principal produtora de petróleo do país.

---

<sup>3</sup> Os 2% restantes correspondem aos resíduos de petróleo, resíduos de terminais e resíduos de derivados que são reprocessados nas unidades de destilação atmosférica juntamente com as cargas de petróleo e condensado.



Cabe destacar que as unidades de maior capacidade de refino se localizam na região Sudeste-Sul do país, próximas aos principais mercados consumidores de derivados do petróleo, com destaque para o estado de São Paulo.

Com relação ao perfil de refino nacional, Camacho e Matai (2009) colocam que o foco se baseia na maximização de produção de óleo diesel e GLP. O óleo diesel se justifica pelo grande participação deste combustível no transporte rodoviário, e o GLP em razão do seu grande uso para cocção residencial.

A produção de óleo diesel, em 2011, foi de 42,5 milhões de m<sup>3</sup> que, dentro do volume de derivados produzidos, representa em torno de 40% do total. No entanto, a produção nacional ainda não é suficiente para atender a demanda deste combustível, o que implica na necessidade de importação de óleo diesel. As regiões geográficas que mais contribuíram exportando óleo diesel para o Brasil, em 2011, foram (ANP, 2012):

- ✓ Estados Unidos: 35,3%;
- ✓ Índia: 33,8%;
- ✓ Holanda: 7,7%
- ✓ Coreia do Sul: 7,1%; e
- ✓ Outros países: 16,0%.

Em 2009, as vendas de diesel pelas distribuidoras somaram 44.298 mil m<sup>3</sup>, ano este que começou com a mistura B3 obrigatória e terminou com B4 – a obrigatoriedade da adição de biodiesel ao óleo diesel é apresentada no item 3.1.2.10.1. Segundo dados do Balanço Energético Nacional (BEN), no Brasil o consumo deste derivado pode ser dividido basicamente em três setores da economia: transportes; agropecuário; e de transformação (geração de eletricidade). O setor de transporte consumiu 78,7% do total, enquanto que o agropecuário e o de transformação demandaram outros 14,3% e 4,4%, respectivamente (BRASIL, 2010a).

### **3.1.2 Biodiesel**

De acordo com a Lei N° 11.097, de 13 de Janeiro de 2005, o biodiesel é um combustível derivado de biomassa renovável para uso em motores a combustão interna ou para outro tipo de geração de energia, que possa substituir parcial ou totalmente combustíveis de origem fóssil (BRASIL, 2005b). Ainda segundo Parente (2003), o biodiesel é constituído de uma mistura de ésteres metílicos ou etílicos de

ácidos graxos, obtidos da reação de transesterificação<sup>4</sup> de qualquer triglicerídeo com um álcool de cadeia curta, metanol ou etanol, respectivamente.

O biodiesel é miscível com o óleo diesel em qualquer proporção, sendo a mistura classificada como “BXX”, onde o termo “XX” representa o volume percentual do biodiesel adicionada ao óleo diesel. Assim, a designação B5 se refere ao combustível disponibilizado ao consumidor final, na proporção, em volume, de 95% de óleo diesel e 5% de biodiesel.

Segundo a mesma lei, foi prevista a adição progressiva e obrigatória de 2% até 5%, sendo esse último valor testado dentro do Programa de Testes coordenado pelo Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT), que contou com a participação da Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (Anfavea). No programa, verificou-se que a adição do biodiesel ao diesel mineral em até 5% não requer qualquer ajuste ou alteração nos motores veiculares. Macedo e Nogueira (2004) defendem que a mistura de até 20% de biodiesel em diesel pode ser utilizada sem que ocorram prejuízos aos motores convencionais. Porém, como ainda não existe consenso sobre este limite, misturas com acréscimos superiores ao B5 necessitam de maiores estudos técnicos que comprovem a não necessidade de adaptação nos motores diesel. Cabe destacar que a lei vigente não trata de misturas superiores ao B5, tanto em nível autorizativo quanto obrigatório.

O uso de B100, ou em mistura com o diesel em qualquer proporção, precisa atender às especificações contidas em norma. A especificação do biodiesel brasileiro, na condição de 5% de adição ao óleo diesel, é dada pela Resolução ANP Nº 4, de 02 de fevereiro de 2010.

### **3.1.2.1 Histórico do Biodiesel**

Considera-se como o marco inicial do uso de óleos vegetais em motor diesel, o ano de 1900, quando a companhia francesa Otto, na Feira Mundial de Paris, apresentou um motor diesel operando com óleo de amendoim (KNOTHE ET AL., 2006). O ponto a ser destacado de tal evento é que o motor inicialmente havia sido concebido para funcionar com óleo mineral, mas funcionou perfeitamente com o óleo vegetal.

---

<sup>4</sup>A transesterificação é a rota mais utilizada em nível mundial para a produção de biodiesel; porém, existem outros processos menos usuais para a produção de biodiesel, tais como craqueamento térmico (pirólise) e esterificação.

Rudolf Diesel, considerado o inventor do motor diesel, desde o princípio foi um eterno defensor do uso de óleos vegetais. Ainda que não coubesse a ele a ideia inicial do uso de fontes vegetais, o mesmo reconhecia a importância da energia vinda a partir da biomassa frente às fontes não renováveis.

Nas décadas que se sucederam a 1900, o uso de diferentes óleos vegetais continuou a ser testado, principalmente por países europeus que detinham colônias africanas. No entanto, o uso em larga escala desta alternativa não ocorreu de fato, muito em parte por causa dos baixos preços do óleo diesel de origem fóssil.

A chegada da Segunda Guerra Mundial deu um novo impulso à utilização de óleos vegetais, considerados combustíveis de emergência caso ocorresse à falta de abastecimento dos derivados do petróleo.

A utilização de óleos vegetais diretamente em motores diesel apresentou resultados satisfatórios ao longo destas décadas, mas por terem viscosidade cinemática superior ao óleo diesel acabavam por causar sérios problemas operacionais aos motores. Disso decorreram esforços em busca de meios para redução da viscosidade, que culminaram no desenvolvimento de técnicas processuais, entre elas a transesterificação (KNOTHE ET AL., 2006).

A primeira patente mundial do biodiesel é belga, do ano de 1937 (KNOTHE ET AL., 2006). A primeira patente brasileira foi concedida ao professor Expedito Parente em 1980, quando à época o biodiesel era chamado de prodiesel (PARENTE, 2003).

Aqui no Brasil, os primeiros registros do uso de óleos vegetais como combustíveis datam da década de 1920, e durante as décadas seguintes pouco foram os avanços na área.

Após 1980, estudos na Universidade Federal do Ceará, sob a coordenação do professor Expedito Parente continuaram a ser desenvolvidos; porém, com a diminuição do preço do petróleo no mercado internacional, o prodiesel não obteve destacado crescimento.

No início da década de 1990, iniciou-se o processo de industrialização do prodiesel na Europa, e o combustível passou a ser denominado biodiesel. Do final da década de 1990 até os dias atuais, a produção de biodiesel começou a ganhar escala comercial e firmar-se como um valioso combustível alternativo ao óleo diesel mineral.

### 3.1.2.2 Propriedades do Biodiesel

#### 3.1.2.2.1 Características físicas e químicas do biodiesel

A maioria das características físicas e químicas do biodiesel pouco variam no caso do produto ser produzido a partir de diferentes matérias-primas e álcoois. Tais propriedades também se aplicam entre óleo diesel e o biodiesel; ambos apresentam características similares, em especial no uso em motores de combustão do ciclo diesel (KNOTHE ET AL., 2006).

Como propriedades físicas do biodiesel, Parente (2003) e Knothe et al. (2006) destacam:

- ✓ Viscosidade: parâmetro importante para avaliação da potência do motor. Como a viscosidade do biodiesel se assemelha (é um pouco maior) ao do óleo diesel mineral, não há necessidade de qualquer adaptação ou regulação no sistema de injeção dos motores de ciclo diesel. Conforme mencionado anteriormente, a viscosidade muito alta pode causar problemas ao motor;
- ✓ Lubricidade: medida do poder de lubrificação de uma substância. A lubricidade é uma característica importante do combustível, uma vez que auxilia o sistema contra desgastes devido às altas tensões. Ao remover o enxofre do óleo diesel – tendência mundial que vem ocorrendo com o objetivo de reduzir as emissões atmosféricas de compostos de enxofre – ocorre a perda de lubricidade, que pode ser compensada pela adição do biodiesel;
- ✓ Ponto de névoa e de fluidez: o ponto de névoa é a temperatura em que o líquido, por refrigeração, começa a apresentar cristais visíveis (névoa). Ao baixar ainda mais a temperatura, os cristais ficam maiores e se aglomeram, não permitindo que o líquido escoie livremente. A temperatura em que isto ocorre é conhecida como ponto de fluidez. O ponto de névoa e de fluidez para o biodiesel etílico de soja são 1 °C e -4 °C, respectivamente. Estas propriedades são consideradas importantes no que diz respeito ao armazenamento e utilização do combustível. No entanto, no Brasil, em toda sua extensão territorial, as temperaturas não são suficientemente baixas a ponto de haver a necessidade de se preocupar com o ponto de névoa e de fluidez;

- ✓ Ponto de fulgor: temperatura na qual o líquido se torna inflamável. Esta propriedade é importante por questões de segurança, mas no caso do biodiesel este risco é menos acentuado em razão do mesmo apresentar ponto de fulgor superior a 150° C;
- ✓ Poder calorífico: propriedade que indica a quantidade de energia contida em uma determinada massa do combustível (ex: MJ/kg). O poder calorífico do biodiesel é próximo do óleo diesel, com uma ligeira vantagem para o derivado do petróleo;
- ✓ Índice de cetano: este índice é equivalente ao índice de octano (octanagem) dos combustíveis de motores do ciclo Otto (gasolina e etanol). Quanto maior o índice de cetano, melhor a qualidade de combustão no motor diesel. A faixa ideal no índice de cetano encontra-se entre 40 e 50. O índice de cetano do biodiesel é da ordem de 60, enquanto que o do diesel mineral varia entre 48 e 52. Em geral, um combustível com alta octanagem possui baixo número de cetano e vice-versa;
- ✓ Glicerina livre, ligada e total: avaliam a qualidade do processo de purificação do biodiesel. A glicerina livre é um parâmetro que monitora a quantidade de glicerol no biodiesel, impureza não removida no processo de transesterificação. A reação de transesterificação visa transformar triglicerídeos em ésteres (biodiesel), sendo os monoglicerídeos e diglicerídeos substâncias intermediárias do processo. A glicerina ligada é a soma dos mono, di e triglicerídeos residuais. Por fim, a glicerina total é composta pela soma das glicerinas livre e ligada.

As principais propriedades químicas do biodiesel a serem avaliadas, de acordo com Parente (2003) e Knothe et al. (2006) são:

- ✓ Teor de enxofre: o biodiesel, seja ele de óleo vegetal ou gordura animal, não apresenta enxofre em sua composição, o que implica em uma queima sem a emissão atmosférica de poluentes de enxofre;
- ✓ Poder de solvência: o biodiesel tem a capacidade de solubilizar um grande número de substâncias orgânicas, incluindo-se as resinas de tintas. Dessa forma, ao abastecer o veículo deve-se ter atenção para que o combustível não entre em contato com a pintura;

- ✓ Estabilidade à oxidação: o biodiesel quando em contato direto com o ar pode sofrer processo de oxidação, o que prejudica a qualidade do combustível principalmente em decorrência de longos períodos de armazenamento. Por essa razão, os tanques de armazenamento devem apresentar controle não só quanto à presença de ar, mas também em relação ao calor, traços de metais, antioxidantes e peróxidos.

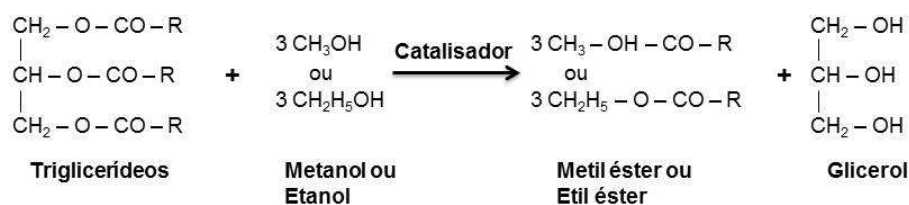
### 3.1.2.3 Processo de Produção de biodiesel

Os óleos vegetais ou gorduras animais são substâncias insolúveis em água e compostos essencialmente por triacilgliceróis (TAG ou triglicerídeos), que por sua vez, são compostos ésteres de diferentes ácidos graxos ligados ao glicerol.

A produção de biodiesel (um éster alquílico) ocorre por meio da reação química entre o óleo vegetal ou gordura animal com um álcool de cadeia curta, em geral metanol ou etanol. Para acelerar a reação utiliza-se um catalisador e como coproduto desta reação ocorre a formação de glicerol (KNOTHE ET AL., 2006; PARENTE, 2003).

Independentemente do álcool utilizado, a reação deve ser feita com excesso deste reagente, uma vez que desloca o equilíbrio da reação para a formação dos produtos, porém o excesso não deve ser tão grande porque isto dificulta a posterior separação do glicerol. Cortez (2010) indica que a razão molar entre o óleo vegetal e o etanol na proporção 1:6 e 1:12 apresenta resultados satisfatórios.

Conforme relatado anteriormente, existe mais de uma rota tecnológica para a produção do biodiesel em escala industrial. Nesta dissertação, decidiu-se por avaliar o processo via reação de transesterificação, que é a mais difundida mundialmente (PARENTE, 2003). Na Figura 4, é apresentada de maneira geral a reação de transesterificação.



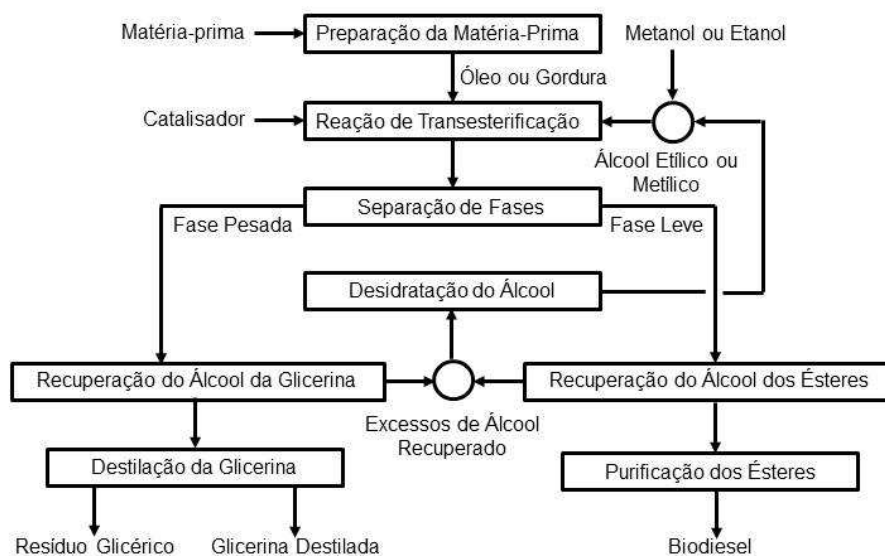
**Figura 4 – Reação de Transesterificação**

Fonte: Cortez, 2010.

De acordo com a empresa Dedini S.A. Indústrias de Base, para a produção de 1.000 kg de biodiesel são necessários 1.000 kg de óleo, pela rota metílica, ou 956 kg para a rota etílica. A quantidade de álcool requerida na reação é 100 kg e 154 kg, para as rotas metílicas e etílicas, respectivamente. O processo ainda gera um montante de glicerina igual a 117 kg (CORTEZ, 2010).

Embrapa (2010a) indica que a partir dos mesmos 1.000 kg de óleo, a transesterificação com o uso de etanol possibilita uma produção ligeiramente maior de biodiesel: 1.052 kg contra 1.004 kg de na rota metílica. A via etílica requer 500 kg de etanol, com 343 kg sendo posteriormente recuperados, e 20 kg de catalisador na forma de hidróxido de potássio, além de gerar 105 kg de glicerina. Por sua vez, a reação metílica emprega 200 kg de metanol, dos quais 91 kg são recuperados, e utiliza outros 12 kg do catalisador. A mesma quantidade de glicerina é produzida por esta rota.

As etapas do processo de produção de biodiesel são apresentadas na Figura 5.



**Figura 5 – Fluxograma da produção de biodiesel pelo processo de transesterificação**

Fonte: Parente (2003).

Analisando a Figura 5, nota-se que o ciclo de vida do biodiesel, no caso de fontes oleaginosas, se inicia nas atividades agrícolas que vão desde a preparação do solo até a colheita da matéria-prima.

Na usina produtora do biocombustível, o óleo, o catalisador e o álcool são conduzidos ao reator para que se proceda a reação de transesterificação, que

ocorre a aproximadamente 70°C e dura de uma a oito horas (MACEDO; NOGUEIRA, 2004).

De acordo com Knothe et al.(2006), a reação é geralmente realizada em duas etapas, sendo que na primeira aproximadamente 80% do álcool e do catalisador são adicionados. Antes de passar pelo segundo reator, remove-se a glicerina produzida na fase prévia e, na sequência, são adicionados os 20% restantes de álcool e catalisador. A vantagem de se empregar esta configuração é que a reação será completa, além de se observar demanda de menor quantidade de álcool.

Após a saída do segundo reator, é preciso que haja a separação do éster (fase leve) do glicerol (fase pesada). Esta separação é feita em geral por meio de decantadores ou centrifugas.

Esta separação de fases é muito importante para a qualidade do biodiesel, que apresenta maior valor, quanto maior for sua pureza (a remoção da glicerina torna o óleo vegetal mais fino e com menor viscosidade). Ferrari et al. (2005) afirmam que para a transesterificação ser satisfatória, os óleos devem possuir baixos níveis de ácidos graxos livres, a fim de se evitar que os mesmos reajam com o catalisador alcalino formando produtos saponificados.

Em cada uma das fases procede-se uma evaporação sob baixa pressão, ou destilação com o intuito de recuperar o excesso de álcool da reação e, posteriormente, reaproveitá-lo em uma próxima reação. A remoção do excesso de catalisador e eventuais sabões formados também ocorre, em geral por lavagem com água quente (PARENTE, 2003).

Finalmente, a glicerina é destilada, obtendo-se assim o coproduto do processo de transesterificação.

#### **3.1.2.4 Matérias-primas para a produção de biodiesel**

Mundialmente, a produção de biodiesel é largamente realizada tendo como matéria-prima os óleos vegetais. Gorduras<sup>5</sup> animais (sebo de boi, banha de porco ou gordura de frango) ou óleos de fritura utilizados podem substituir as oleaginosas; no entanto, a fabricação de biodiesel a partir destes materiais ainda é baixa em termos de volume de produção.

---

<sup>5</sup> Óleos e gorduras apresentam características similares, sendo que a diferença consiste basicamente no seu estado físico à temperatura ambiente: óleos são líquidos, enquanto as gorduras são sólidas.



O Brasil com condições agrícolas favoráveis possui potencial para que a produção de biodiesel possa ocorrer a partir de diferentes matérias-primas vegetais. Na Tabela 1 é apresentado o conjunto das oleaginosas mais comumente utilizadas na produção do biocombustível no Brasil, bem como seus valores de produtividade, porcentagem de óleo e rendimento.

**Tabela 1 – Oleaginosas e suas características**

Oleaginosa	Produtividade (t/ha)	Porcentagem de óleo (% <sub>m</sub> )	Rendimento (t óleo/ha)
Algodão	0,86 a 1,4	15	0,1 a 0,2
Amendoim	1,5 a 2,0	40 a 43	0,6 a 0,8
Dendê	15 a 25	20	3 a 6
Girassol	1,5 a 2,0	28 a 48	0,5 a 0,9
Mamona	0,5 a 1,5	43 a 45	0,5 a 0,9
Pinhão manso	2 a 12	50 a 52	1 a 6
Soja	2 a 3	17 a 20	0,2 a 0,4

Fonte: Adaptado de Sebrae (2007).

Pela Tabela 1 é possível perceber que cada fonte vegetal apresenta característica própria em relação à produtividade e quantidade de óleo passível de ser extraído para produzir biodiesel. Dessa forma, não basta selecionar uma alternativa apenas com base no maior potencial de óleo, já que outros fatores devem ser levados em consideração, tais como: matéria-prima melhor adequada às particularidades de clima e solo local; produtividade; custo de produção; e condições de armazenamento (KNOTHE ET AL., 2006).

De fato, existem diversas opções de oleaginosas que se adaptam melhor às diferentes regiões do país; diversas instituições de pesquisa vêm dedicando esforços para associar cada alternativa à sua respectiva região, e assim aumentar a disponibilidade de óleo vegetal no país. A Figura 6 apresenta as regiões brasileiras com as respectivas fontes vegetais mais adequadas para serem utilizadas na produção de biodiesel.



**Figura 6 – Potencial das oleaginosas nas Regiões do Brasil**

Fonte: Brasil, 2006c.

Analisando a Figura 6, pode-se imaginar um cenário com o abastecimento de óleo vegetal a partir de diferentes regiões. Por exemplo, o Centro-Oeste e Sul com a soja (aproveitando a realidade de já serem grandes produtoras); o Norte com o dendê, que dentre todas as opções de oleaginosas é aquela que possui maior rendimento de óleo por hectare; o Nordeste com a mamona, tirando proveito do fato desta espécie crescer em condições mais áridas, como a dessa região; e o Sudeste com pinhão manso, que assim como o dendê é uma das opções com melhor rendimento em óleo.

### 3.1.2.5 Álcool empregado na transesterificação

O processo de transesterificação demanda a utilização de um álcool, que pode ser o metanol, predominantemente uma fonte fóssil<sup>6</sup>, ou etanol, uma alternativa renovável. A tecnologia predominantemente utilizada no mundo é a transesterificação metílica, que sob os pontos de vista técnico e econômico é mais vantajosa que a etílica. O problema do uso do etanol, na forma anidro, se dá em razão da maior dificuldade em separar a glicerina, aliada ao seu maior consumo na reação (BRASIL, 2006a; PARENTE, 2003). Na Tabela 2 são apresentadas as vantagens e desvantagens do uso de cada um destes combustíveis.

<sup>6</sup> O metanol é produzido largamente a partir do gás natural, uma fonte de origem fóssil. Em pequenas quantidades ele pode até ter origem renovável, por meio da gaseificação de biomassa.

A opção, em âmbito mundial, pelo metanol seguiu estes critérios de viabilidade; além disso, sua maior disponibilidade em relação ao etanol em países principalmente da União Européia, dada a limitação de áreas de cultivo para fontes alcoólicas com fins energéticos foi fator igualmente decisivo.

No Brasil, ainda que questões técnicas e econômicas favoreçam o metanol, a oferta de álcool combustível é muito significativa, ao mesmo passo que o país importa metanol. Em 2010, o volume de metanol importado foi 2,74 vezes maior que aquele produzido no país (ABIQUIM, 2011; BRASIL, 2011b).

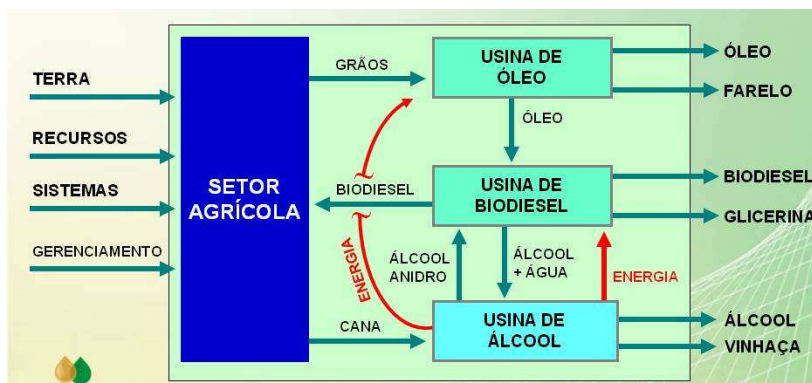
No entanto, dados do Anuário da ANP relacionados à produção de biodiesel indicam que a via etílica ainda não está muito difundida no país; das 54 empresas que produziram B100 em 2010, exatas 51 utilizaram a rota metílica, o que representou 96,7% da produção total de biodiesel. Os demais 3,3% do volume total foram obtidos com as únicas três empresas que adotam a rota etílica.

**Tabela 2 – Vantagens e desvantagens do metanol e etanol para a produção de biodiesel no Brasil**

<b>Alcool</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Metanol	1- Menor custo 2- Menor consumo 3- Menor tempo de reação 4- Menor temperatura de reação 5- Não higroscópico 6- Melhor conversão do óleo em biodiesel	1- Não renovável 2- Risco à saúde 3- Produto importado 4- Não biodegradável
Etanol	1- Maior rendimento 2- Maior oferta 3- Renovável 4- Biodegradável	1- Maior consumo 2- Maior custo 3- Higroscópico 4- Maior tempo de reação 5- Maior temperatura de reação 7- Pior conversão do óleo em biodiesel

Fonte: Brasil (2006); Parente (2003).

Ainda na questão da rota etílica, Barbosa (2006) indica que a integração das usinas produtoras de óleo, etanol e biodiesel traz uma valiosa sinergia para toda a cadeia produtiva, conforme ilustra a Figura 7.



**Figura 7 – Integração das plantas industriais de óleo, álcool e biodiesel**

Fonte: Barbosa, 2006.

Os benefícios desta integração variam desde a maximização da utilização de terras, máquinas agrícolas e mão-de-obra na fase agrícola, até a maximização de processos industriais semelhantes, minimização de investimentos nas plantas, aproveitamento de subprodutos nas usinas de etanol e biodiesel e otimização de energia na fase industrial.

### 3.1.2.6 Catalisadores

A transesterificação pode ser executada com o uso de catalisadores ácidos, básicos ou enzimáticos. Catalisadores básicos levam a uma reação mais rápida frente aos catalisadores ácidos (dos quais o ácido sulfúrico é o mais empregado), além de apresentar melhores rendimentos, e causar menores problemas relacionados à corrosão dos equipamentos. Por outro lado, a presença de água e graxos livres prejudica o rendimento da reação acelerada por catalisadores básicos, ao interagir com esses últimos na forma de reações paralelas e indesejáveis das quais resultam géis e sabões (MACEDO; NOGUEIRA, 2004).

O hidróxido de sódio vem sendo mais utilizado do que o hidróxido de potássio por apresentar menor peso molecular (o que significa menor quantidade necessária de catalisador), ser mais barato e seus sais serem menos solúvel no biodiesel.

Catalisadores enzimáticos quando comparados com os ácidos e básicos apresentam vantagens como: menor sensibilidade à presença de água, recuperação do catalisador e separação do biodiesel. No entanto, o alto custo das enzimas ainda é uma barreira para o uso em massa deste material.

### 3.1.2.7 Glicerina

Inicialmente, cabe discorrer a respeito dos termos glicerol e glicerina. Define-se glicerol como o componente químico puro 1,2,3-propanotriol. Por sua vez, chama-se glicerina o produto comercial purificado que contém em geral mais de 95% de glicerol (KNOTHE ET AL., 2006). Diferentes tipos comerciais de glicerina não se diferenciam apenas no teor de glicerol, mas em função de outras características, tais como: odor, cor e traço de impurezas.

A glicerina é utilizada como insumo na fabricação de uma ampla gama de produtos, tais quais:

- ✓ Alimentos: devido ao fato de ser não-tóxico e facilmente digerido, o glicerol é usado na fabricação de balas, bolos, gorduras, margarinas, entre outros;
- ✓ Medicamentos e cosméticos: maior uso industrial da glicerina, sendo componente de capsulas e alguns remédios, e muito usado em detergentes, sabões e cremes dentais;
- ✓ Tabaco: a glicerina é usada para tornar as fibras do fumo mais resistentes, evitando perdas, e também entra na composição dos filtros dos cigarros;
- ✓ Têxteis: amaciar e aumentar a flexibilidade das fibras têxteis;
- ✓ Materiais de embalagem: em especial o uso em embalagens de carne;
- ✓ Lubrificantes: utiliza-se o glicerol como material lubrificante em situações onde um óleo não se aplica;

Nos dias atuais, a glicerina ainda se apresenta como uma incógnita na cadeia produtiva do biodiesel, sendo questionado se o mercado conseguirá absorver a sua produção. Por outro lado, pode-se imaginar também que o aumento na produção de biodiesel eleve a oferta de glicerina e, com isso, o preço deste material possa se reduzir. Com a queda no preço, viabiliza-se o uso da glicerina em novos processos que até então utilizavam produtos semelhantes, gerando novos negócios.

Parente (2003) diz que, em último caso, a glicerina ao invés de ser destinada para aterros sanitários, poderia ser transformada em metanol, através de uma reforma com vapor, voltando para o ciclo produtivo.

### 3.1.2.8 Vantagens e desvantagens do biodiesel em relação ao diesel

A substituição, parcial ou integral, do óleo diesel pelo biodiesel na visão da sustentabilidade deve levar em consideração às variáveis econômica, ambiental e social. O biodiesel apresenta uma série de vantagens quando comparado ao óleo diesel, e as principais delas são descritas a seguir:

- ✓ Combustível de origem renovável, o que permite reduzir a dependência de derivados fósseis;
- ✓ Biodegradável;
- ✓ Menor emissão da maioria de poluentes atmosféricos durante a queima do combustível;
- ✓ Elevado ponto de fulgor, portanto, maior segurança no manuseio; e
- ✓ Excelente lubricidade. Esta qualidade do biodiesel pode alavancar a exportação deste produto para outros países, em especial da União Européia, uma vez que o governo destes países vem restringindo a utilização de diesel com enxofre. A redução de enxofre acarreta na perda de lubricidade no óleo diesel, o que pode ser compensada pela adição do biodiesel, que não possui este elemento químico em sua composição.

No lado social, o apelo pelo biodiesel fundamenta-se na geração de emprego e consequente melhoria das condições de vida que famílias de agricultores passariam a ter com a participação na cadeia produtiva do biodiesel. De acordo com Brasil (2004b), estudos realizados por diversos Ministérios mostraram que a substituição de 1% de óleo diesel por biodiesel com origem na agricultura familiar possibilita a geração de 45 mil empregos no campo, sendo que cada emprego tem uma renda média anual de R\$ 4.900,00. Estendendo a visão para além da área rural, e admitindo que cada emprego criado no campo proporcione mais três na cidade, o número de empregos chegaria à faixa de 180 mil.

Olhando a questão econômica, a justificativa pelo uso do biodiesel em detrimento ao óleo diesel justifica-se pelo fato do Brasil ainda importar esse derivado de petróleo. Dessa forma, o incentivo na produção do combustível renovável permite que o país reduza suas dependências externas e, portanto, economize divisas com esta importação em particular. Em 2008, foram economizados US\$ 976 milhões com o uso de biodiesel em substituição ao óleo diesel (ANP, 2012). À parte dos números pode-se entender que o crescimento e fortalecimento de um mercado de biodiesel, em todos os seus níveis, é bom para o crescimento da economia brasileira.

Valorar todos os benefícios dos biocombustíveis não é uma tarefa tão simples de se executar. Conforme IEA (2004), os custos de produção são razoavelmente de fácil identificação, mas dada a complexidade na quantificação dos benefícios (ambientais, sociais e econômicos) o valor de mercado pode não refletir adequadamente o valor destas opções.

No que diz respeito às desvantagens do biodiesel, as mais citadas são (KNOTHE ET AL., 2006):

- ✓ Problemas de ignição na partida e desempenho operacional em temperaturas baixas (0 a 2 °C); e
- ✓ Custo de produção mais elevado, e ainda que seja utilizado o óleo vegetal mais barato, o desempenho econômico do biodiesel é sempre inferior, o que significa que os custos de produção desta opção ultrapassam aqueles referentes ao do derivado do petróleo. A viabilização e produção em larga escala do biodiesel requerem, necessariamente, a tributação sobre os combustíveis fósseis e/ou incentivos fiscais ao longo da sua cadeia produtiva do biocombustível.

Além dos problemas operacionais e econômicos identificados acima, o biodiesel, assim como outros biocombustíveis, são recorrentemente questionados por demandarem grandes quantidades de terras que poderiam ser utilizadas para a produção de alimentos.

Defendendo a viabilidade da expansão da agricultura de energia conciliada com aquela voltada para fins alimentícios, Brasil (2004b) cita que o atendimento aos 2% da mistura obrigatória demandaria apenas 1% da área plantada e disponível para a agricultura no país.

Um dos grandes argumentos daqueles que questionam o uso de terras para fins energéticos é que esta prática, por diminuir a oferta de solo para a produção de alimentos, acaba por acarreta o aumento do preço desses produtos. Contrário a esta corrente, Cortez (2010) defende que o aumento dos preços está vinculado a razões complexas que frequentemente pouco tem a ver com os biocombustíveis, por exemplo: falta de investimentos na agricultura, objetivos de curto prazo, especulação, injustiça social e pobreza e mudanças de hábitos alimentares. Ainda sinaliza que o presente debate tem sido dirigido por questões políticas, morais e éticas, e revestidas por interesses, ao invés de ciência.

Em um estudo da Agência Internacional de Energia sobre biocombustíveis para o transporte, foram feitas estimativas da quantidade de terras agricultáveis necessárias para a produção de uma dada quantidade de etanol e biodiesel, nos EUA e na União Européia, no período de 2000 a 2020 (EIA, 2004).

A substituição de 5% (em 2010) e 10% (em 2020) da gasolina por etanol utilizado em transporte rodoviário demandaria aproximadamente de 10 a 60% da produção norte-americana de grãos, que neste caso não poderiam ser utilizados para a produção de alimentos. Em relação ao total de área agricultável, nos EUA algo como 8% das terras em 2000 seria necessária para esta substituição de 5% da gasolina; em 2020, a substituição dos 10% tomaria 14% das terras. No caso da Europa, estes números seriam 5 e 8% em 2010 e 2020, respectivamente.

Em um cenário ainda mais desfavorável à agricultura alimentícia, a troca do óleo diesel pelo biodiesel em 2010, no mesmo nível de 5%, implicaria em uma demanda de 60% do total da produção de soja nos EUA e 100% da demanda projetada de colza e girassol na União Européia. Em 2020, nos dois locais, faltariam terras para atender à demanda imaginada. Em termos de áreas agricultáveis, nos EUA e na Europa seria semelhante: de 13 a 15% em 2010, e quase 30% em 2020. A quantidade maior de solo necessária para a produção de biodiesel se deve em razão do maior rendimento por hectare das fontes vegetais do etanol frente aos seus similares do biodiesel.

Ainda segundo o estudo, a quantidade de área necessária para atender à produção de biodiesel, tanto nos EUA quanto na União Européia, é preocupante. Não se pode afirmar com certeza que esta mesma situação se aplicaria ao Brasil, uma vez que o país apresenta uma área disponível maior que estes países.

Apresentado todo este arrazoado, o que se pode depreender é que a expansão da produção de biocombustíveis deve ser feita de maneira planejada e controlada para não afetar a produção de alimentos, possivelmente em terras não utilizáveis para este último fim, e buscando sempre um maior rendimento das fontes vegetais por hectare de solo.

### **3.1.2.9 Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB)**

O Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB) foi lançado pelo Governo Federal em 06 de dezembro de 2004. Apoiando-se na crescente demanda



por combustíveis renováveis e no potencial brasileiro para atender parte expressiva dessa necessidade, o programa se propunha ainda a gerar empregos e renda na agricultura familiar, reduzir disparidades regionais, contribuir para a economia de divisas e melhorar as condições ambientais (BRASIL, 2006b).

O PNPB não privilegia matérias-primas ou rotas tecnológicas, reconhece as diversidades regionais e incentiva a produção de oleaginosas que melhor se adequem às características locais de clima e solo. Segundo Brasil (2006b), o PNPB apresenta em um balizador rígido: o biodiesel deve atender às especificações físico-químicas estabelecidas pelo Governo, por meio da ANP. Caso contrário, o biodiesel não pode ser comercializado e misturado ao diesel mineral.

Ainda que as variáveis econômica e ambiental fossem importantes para o PNPB, pode-se entender que a questão social recebeu maior atenção por parte do Governo Federal, considerando que o sucesso do programa levaria à inclusão social por meio da geração de renda nas localidades rurais mais carentes.

No Relatório Final do Grupo de Trabalho Interministerial (BRASIL, 2003), que serviu de base para o lançamento do PNPB, supunha-se que se a cada três empregos criados na cidade um fosse criado no campo, a participação de 1% da agricultura familiar no mercado de B5 possibilitaria a criação de algo em torno de 180 mil empregos diretos e indiretos.

Dessa forma, estabeleceu-se que os produtores de biodiesel que comprassem matérias-primas de agricultores familiares poderiam ter desconto na carga tributária federal. As empresas enquadradas nesta situação teriam uma identificação especial, conhecida como Selo Combustível Social.

O Selo Combustível Social foi lançado em 30 de Setembro de 2005, através da Instrução Normativa nº 02, que dispõe sobre os critérios e os procedimentos relativos ao enquadramento de projetos de produção de biodiesel ao Selo Combustível Social (SEBRAE, 2007).

A concessão do Selo Combustível Social fica a cargo do Ministério do Desenvolvimento Agrário (MDA), e para sua obtenção as empresas devem ser juridicamente constituídas sob as leis brasileiras e produzir e comercializar o biodiesel mediante as seguintes condições (BRASIL, 2006a; SEBRAE, 2007):

- ✓ Adquirir percentuais mínimos de matéria-prima junto a agricultores familiares, de acordo com as seguintes especificações: 50% da região Nordeste e Semi-

Árido, 30% das regiões Sudeste e Sul e 10% das regiões Norte e Centro-Oeste;

- ✓ Firmar contratos com agricultores familiares estabelecendo prazos e condições de entrega da matéria-prima e respectivos preços; e
- ✓ Apresentar plano de assistência e capacitação técnica dos agricultores familiares, a ser desenvolvido pela empresa produtora de biodiesel ou por instituições por ela contratada.

A obtenção do Selo Combustível Social adicionalmente permite às empresas a participação nos leilões de compra do biodiesel realizados pela ANP. Percebe-se então que este certificado é peça fundamental para o sucesso dos negócios das produtoras de biodiesel.

À luz do que foi apresentado acima, não se pode negar que o discurso do Governo Federal para a implantação do PNPB abordava diversas questões importantes para o crescimento do país; porém, é preciso avaliar se os objetivos foram realmente cumpridos. Nessa ótica, Brieu (2009) faz um balanço dos primeiros quatro anos do programa, desde seu lançamento até o final de 2008, avaliando o PNPB segundo as três vertentes da sustentabilidade: econômica, ambiental e social.

A respeito da justificativa econômica, o autor fundamenta sua análise a partir de duas premissas: a) 1 L de óleo vegetal produz 1 L de biodiesel; b) esse 1 L de biodiesel evita a importação de 1 L de óleo diesel, ao mesmo tempo que inviabiliza a exportação de 1 L de óleo de soja. Comparando os preços médios de importação do óleo diesel com os preços médios de exportação de óleo de soja, percebeu-se que esta substituição trouxe prejuízo econômico para o Brasil em 2008, dado que o valor de mercado do óleo esteve sempre superior ao do derivado fóssil.

No enfoque ambiental, a melhoria ocorre, mas não tão expressiva quanto, de fato, poderia ocorrer. Motivo: a produção nacional se baseia na soja, que é uma oleaginosa que não apresenta uma captura de CO<sub>2</sub> tão eficiente quanto outras espécies. Somada a esta justificativa, o autor ainda lembra que a mistura do biodiesel ao óleo diesel ainda é pequena, não acarretando, assim, grandes melhorias da qualidade do ar.

Finalmente, a justificativa social, a grande motivadora do PNPB, foi estudada e, mais uma vez, o autor questiona o sucesso do programa. Analisando as premissas para a obtenção do Selo Combustível Social com a produção nacional, apenas 23 % da produção são adquiridas a partir da agricultura familiar. O grande problema está no

fato da produção brasileira ser majoritariamente realizada a partir da soja (agricultura do tipo empresarial) e do sebo bovino, que são conhecidas por não terem um grande apelo de inclusão social, ao contrário de outras espécies vegetais como o dendê ou a mamona. Cabe ainda citar o comentário de Marcello Brito, do Grupo Agropalma, ao jornal Valor Econômico: “*Falamos de biodiesel como uma oportunidade de inclusão da agricultura familiar, mas quem na agricultura familiar produz sebo ou soja?*” (BRIEU, 2009).

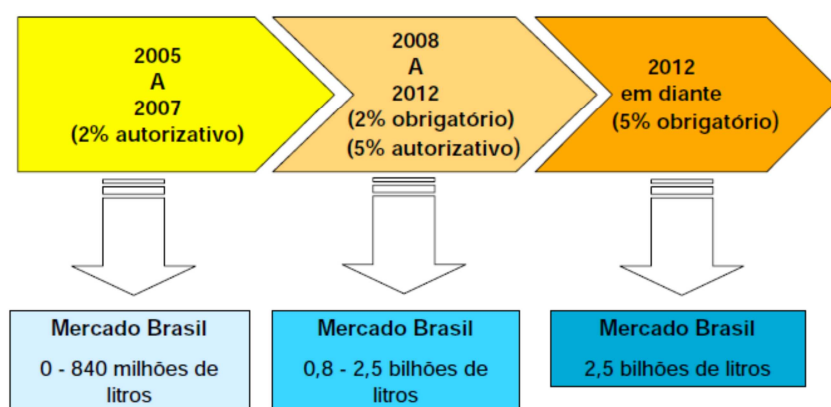
Diante destas considerações, o autor defende que houve um erro na forma como foi conduzido o PNPB, a partir da soja (cultivo predominantemente na forma de monocultura) e sebo bovino, o que torna difícil afirmar que o programa tenha tido sucesso no que diz respeito à inclusão social das famílias brasileiras mais pobres.

### 3.1.2.10 Produção de Biodiesel no Brasil

#### 3.1.2.10.1 Lei N° 11.097/2005

A produção de biodiesel no Brasil, em escala comercial, começou a ganhar espaço com o lançamento do PNPB. No entanto, foi com a promulgação da Lei N° 11.097, de Janeiro de 2005, que a produção de biodiesel passou a ser obrigatória.

Esta lei, que dispõe sobre a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira, fixou percentagens mínimas obrigatórias, em volume, da adição de biodiesel ao óleo diesel comercializado com o consumidor final, em qualquer parte do território nacional (BRASIL, 2005b). Os prazos e percentagens mínimas obrigatórias foram definidas conforme mostra a Figura 8.



**Figura 8 – Percentagens mínimas obrigatórias e prazos da adição do biodiesel ao óleo diesel**  
Fonte: Queiroz, 2006.

A Lei N° 11.097 definiu que a partir de 1° de Janeiro de 2008 a mistura do biodiesel ao diesel deveria ser obrigatória em 2%, e que a partir do início de 2012 esse valor passaria para 5%. Porém, também ficou determinado que estes prazos poderiam ser reduzidos, caso o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) assim o julgasse, observados os seguintes critérios:

- I. a disponibilidade de oferta de matéria-prima e a capacidade industrial para a produção de biodiesel;
- II. a participação da agricultura familiar na oferta de matérias-primas;
- III. a redução das desigualdades regionais;
- IV. o desempenho dos motores com a utilização do combustível;
- V. as políticas industriais e de inovação tecnológica.

De 2005 até 2008, a adição ocorreu efetivamente de forma autorizativa e, apenas a partir de 1° de Janeiro de 2008, passou a vigorar de forma obrigatória. Valendo-se do seu direito e poder, o CNPE estabeleceu percentuais mínimos obrigatórios intermediários ao intervalo entre 2 e 5%. Dessa forma, por meio da Resolução N° 2, de 13 de Março de 2008, este organismo estabeleceu o mínimo obrigatório de 3% para a mistura, que começou a vigorar a partir de 01 de Julho de 2008.

Em 27 de Abril de 2009, a mesma Resolução N° 2 trouxe nova alteração ao fixar valor de 4% de adição do biodiesel ao diesel; a partir de 01 de Julho de 2009, esta passou a ser compulsória.

Por fim, o CNPE ainda antecipou o último percentual mínimo obrigatório estabelecido na Lei N° 11.097. Por meio da Resolução N° 6, de 16 de Setembro de 2009, o diesel comercializado ao consumidor deveria ter 5% de biodiesel. Esta determinação vigora desde 01 de janeiro de 2010, portanto, dois anos antes daquela inicialmente prevista na lei.

Vale ressaltar uma outra providência importante da Lei N° 11.097, Capítulo IV, Art. 7°:

fica instituída a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - ANP, entidade integrante da Administração Federal indireta, submetida ao regime autárquico especial, como órgão regulador da indústria do petróleo, gás natural, seus derivados e biocombustíveis, vinculado ao Ministério de Minas e Energia (BRASIL, 2005b).

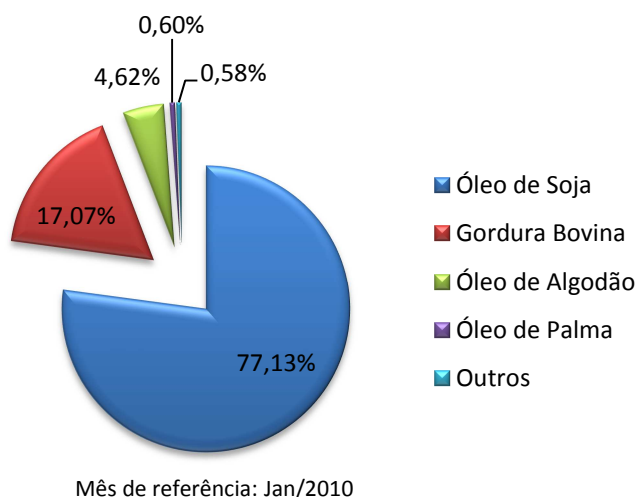
A importância deste artigo se fundamenta na atribuição dada à ANP na cadeia produtiva dos biocombustíveis que ficou responsável por especificar e fiscalizar a qualidade dos combustíveis e garantir o abastecimento do mercado, em defesa do interesse dos consumidores. Além disso, a Agência também executa as diretrizes do CNPE para os biocombustíveis (BRASIL, 2005b).

No caso específico do biodiesel, a ANP tem as funções de regular, autorizar e fiscalizar as atividades relacionadas à produção, armazenagem, importação, exportação, distribuição, revenda e comercialização. Ou seja, a ANP arbitra e dispõe sobre praticamente todas as etapas relacionadas ao produto desde a produção até a utilização do biodiesel (BRASIL, 2005b).

### **3.1.2.10.2 Capacidade Produtiva e Produção Nacional**

A Figura 8 indica o potencial produtivo de biodiesel no Brasil, de acordo com o cronograma original da Lei N° 11.097. Na fase autorizativa de 2% da mistura, estimava-se que o mercado poderia ser abastecido com 840 milhões de litros. De fato, a produção deste ao final de 2007 e 2008 alcançou, respectivamente, os volumes de 0,40 e 1,17 bilhões de litros (ANP, 2012). Entre 2008 e 2012, previa-se que a produção alcançaria de 0,8 a 2,5 bilhões de litros; em 2009 dados oficiais do Governo apontam a geração de 1,61 bilhões de litros; em 2010, a produção atingiu 2,38 bilhões de litros; e em 2011, o total alcançou 2,64 bilhões de litros (ANP, 2012). Também a título projetional, de 2012 em diante, 2,5 bilhões de litros estariam disponíveis para o consumidor final; diante dos números atuais de produção, tudo indica que esse valor será facilmente atendido.

Em relação às matérias-primas utilizadas para a produção de biodiesel no país, a soja ainda predomina amplamente frente às demais oleaginosas ou gorduras animais, como pode ser visualizado na Figura 9. O biodiesel de soja representa mais de 75% da produção total brasileira do biocombustível.



**Figura 9 – Matérias-primas utilizadas na produção de biodiesel**  
 Fonte: Adaptado de ANP, 2012.

Um estudo realizado pela Fundação Getúlio Vargas (FGV) a pedido da União Brasileira do Biodiesel (UBRABIO), projeta um cenário para a mistura B20, no qual seriam necessários 10 milhões toneladas de óleo de soja, que representaria a diminuição da participação de soja dos atuais 80% para a faixa dos 70% do volume total. Esta redução se baseia na premissa que outras oleaginosas, tão exaltadas quando do lançamento do PNPB, passariam por uma expansão na produção. No entanto, percebe-se que mesmo com esta redução de aproximadamente 10%, a soja ainda se manterá como carro-chefe do programa de biodiesel brasileiro (UBRABIO, 2010).

Apesar da necessidade de incentivo a outras culturas, a soja talvez tenha sido a melhor escolha para dar início ao PNPB, uma vez que a mesma apresenta aspectos positivos na sua cadeia produtiva: extensão de terra e expressiva escala de produção; mercado internacional que demanda esta commodity; e cadeia produtiva altamente organizada (BRASIL, 2006b; ABIOVE, 2009).

De acordo com informações da ANP, 64 plantas produtoras de biodiesel autorizadas corresponderam, em fevereiro de 2010, por uma capacidade total de 13.219,33 m<sup>3</sup>/dia (ANP, 2012).

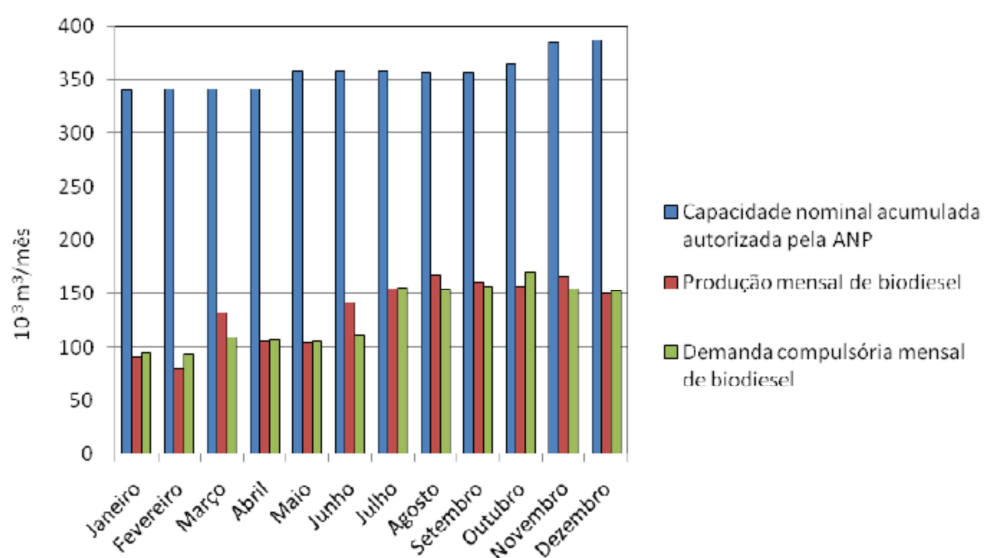
Deste total de usinas, 48 possuem Autorização para Comercialização de biodiesel, o que totaliza uma produção de 11.759,83 m<sup>3</sup>/dia. Levando em conta as plantas autorizadas para construção e ampliação da capacidade, a produção teria um acréscimo de 2.372,21 m<sup>3</sup>/dia; isso, sem contar as inúmeras solicitações de novas

plantas que ainda se encontravam em processo de análise por parte da ANP (ANP, 2010b).

Apesar da produção de biodiesel no Brasil vir aumentando nos últimos anos, a capacidade produtiva das indústrias representa mais que o dobro daquilo que, de fato, é disponibilizado ao consumidor final. Tal fato deixa claro que a produção nacional de biodiesel está abaixo da capacidade nominal das indústrias produtoras, o que revela uma oportunidade para a geração de maiores quantidades do combustível, sem a necessidade de construção de novas usinas (ANP, 2012).

Esta capacidade ociosa das plantas de biodiesel provavelmente ocorre em razão da sazonalidade da produção das oleaginosas, em especial da soja, ociosidade esta que poderia ser reduzida se as usinas produzissem a partir de outras fontes, no período de entressafra da soja.

A Figura 10 ilustra bem este comportamento ocioso do setor, em um gráfico do ano de 2009, que mostra a capacidade nominal, a produção mensal e a demanda compulsória de biodiesel.



**Figura 10 – Evolução da Capacidade Nominal, Produção Mensal e Demanda Compulsória Autorizada pela ANP no ano de 2009**

Fonte: ANP, 2012.

Brasil (2003) reforça esta ideia ao afirmar que as plantas industriais brasileiras possuem ampla flexibilidade em termos de tamanho e matéria-prima utilizada, com pequenas ou nenhuma modificação necessárias para o incremento da produção.

Pela Figura 10, é possível perceber ainda que a produção brasileira acompanha a demanda compulsória de biodiesel, podendo-se imaginar que se houver expansão da produção, as percentagens de adição do biodiesel ao diesel poderiam ser elevadas em patamares acima dos atuais 5%.

### **3.1.2.10.3 Leilões Públicos da ANP**

Conforme atribuído na Lei N° 11.097, cabe à ANP organizar e realizar leilões públicos de compra de biodiesel. Os leilões foram criados para estimular o desenvolvimento da cadeia produtiva e do mercado consumidor de biodiesel, garantindo assim que as refinarias e distribuidoras pudessem obter as quantidades suficientes de biodiesel para a comercialização da mistura BXX nas proporções da lei.

Os leilões funcionam da seguinte forma: primeiro é estabelecido um preço máximo de referência e, a partir deste preço, as empresas produtoras de biodiesel ofertam suas quantidades. Vencem os leilões as empresas que oferecem o combustível ao menor preço, sempre respeitando os padrões de qualidade exigidas pela ANP. Cabe a própria ANP arrematar as melhores propostas do leilão e posteriormente o combustível deve ser adquirido pelas empresas produtoras e importadoras de petróleo para que a mistura obrigatória seja realizada.

Os volumes ofertados e arrematados em cada leilão público podem ser verificados junto à ANP (ANP, 2012).

### **3.1.2.11 Produção de Biodiesel no Mundo**

Os países da União Européia juntamente com os EUA são os maiores produtores mundiais de biodiesel. De acordo com dados estatísticos do *European Biodiesel Board*, a produção total da União Européia em 2010 atingiu a marca de 10,9 bilhões de litros, sendo que a Alemanha (3,25 bilhões de litros), França (2,17 bilhões de litros) e Espanha (1,05 bilhões de litros) foram os três maiores produtores (EBB, 2012). Nos EUA, no mesmo ano de 2010, a produção estimada de biodiesel foi de 315 milhões de galões<sup>7</sup> (1,19 bilhões de litro) (NBB, 2012).

---

<sup>7</sup> Nos EUA, a unidade de produção é galões. 1 L = 0,2642 galões.



Na União Europeia, a principal fonte vegetal é a colza (canola), enquanto nos EUA, o óleo de soja é o predominante; nos EUA, os óleos de fritura dos estabelecimentos de alimentação complementam a oferta de matéria-prima para a produção de biodiesel.

A liderança europeia na produção mundial de biodiesel foi alcançada com base em forte incentivos fiscais e legislação ambiental cada vez mais restritiva. A União Europeia estabeleceu que a partir de 2010, 5,75% do consumo local de combustíveis deve ser feito via fontes renováveis. Em 2020, este percentual passará a 8%. No Brasil, o diesel ainda conta com baixa tributação, o que dificulta a competitividade do biodiesel.

Cabe informar que a Alemanha é o único país a ofertar o biodiesel puro aos seus consumidores, realidade esta possibilitada pela ampla rede de abastecimento e intensiva campanha publicitária em favor do produto (PARENTE, 2003).

O autor relata a estratégia alemã para incentivar o uso de biodiesel sem mistura no país. De início, as bombas dos postos de combustível apresentavam dois bicos, um para óleo diesel e outro, com um selo verde, para o abastecimento de biodiesel. Os usuários misturavam os dois combustíveis nas diversas proporções – sempre com o biodiesel a preços mais vantajosos – até a escolha final do biodiesel na sua forma pura. Hoje, o biodiesel se encontra disponível em milhares de postos espalhados por todo o país.

À parte dos mercados europeu e americano, o biodiesel vem ganhando espaço, ainda que de forma mais tímida, em alguns países asiáticos. Conforme cita Brieu (2009), a Indonésia e a Malásia tem potencial para se tornarem importantes atores no mercado mundial de biodiesel por dominarem a produção de óleo de palma (a oleaginosa que possui o maior rendimento de óleo por hectare) no planeta. Na Malásia, desde 2007 o óleo diesel é comercializado com a adição de 5% de biodiesel de palma.

Na América Latina, o único país que figura entre os principais produtores mundiais de biodiesel, além do Brasil, é a Argentina, que em 2010 ocupou o 4º lugar entre os maiores produtores mundiais, com 1,7 bilhões de litros. O diferencial da produção argentina é que todo o biocombustível produzido no país é voltado para a exportação (CASTRO ET AL., 2010).

## 3.2 ÓLEO DE SOJA

### 3.2.1 Características da cultura de soja

A cultura da soja teve origem na região leste da China, por volta do séc. XI a.C. No Brasil, os primeiros registros de sua utilização datam do início da década de 1880, no estado da Bahia (BIODIESELBR, 2010).

A soja é uma leguminosa produzida prioritariamente para a produção de torta ou farelo – quase 80% da sua composição da soja é farelo –, que são direcionados para alimentação mundial como fonte de proteína. Segundo Lazzarotto e Hirakuri (2009), apenas 6,2% do consumo mundial de soja em grão é realizado de forma *in natura*.

O farelo é largamente utilizado na composição de ração que, por sua vez, serve de alimento para a produção de carnes. Como subproduto da obtenção da torta ou farelo, obtém-se o óleo cru, que posteriormente dá origem ao óleo refinado e lecitina de soja (agente emulsificante que faz a ligação entre as fases aquosa e oleosa). O óleo de soja, bem como outros óleos vegetais, tradicionalmente é utilizado na alimentação humana, mas recentemente vem adquirindo *status* de fonte energética para a produção de biodiesel.

Interessante perceber pela informação apresentada no parágrafo acima que a expansão da lavoura de soja está condicionada a uma maior demanda por carnes bovinas, de aves e suínas, e não pela questão do óleo e seus derivados, como é o caso do biodiesel.

A soja é uma das principais culturas agrícolas dentro do cenário da agricultura brasileira, apresentando fatores de destaque como: grande extensão de área e escala de produção; mercado internacional que demanda esta commodity; e cadeia produtiva altamente organizada (BRASIL, 2006a; ABIOVE, 2009).

A expansão da cultura de soja é vista como um risco para a preservação da Floresta Amazônica, conforme coloca Cavalett (2008) ao afirmar que a monocultura voltada para a exportação tem grande correlação com o desmatamento do bioma. Temendo que esta associação envolvendo a soja e o desmatamento da Amazônia pudesse repercutir de maneira negativa junto aos compradores internacionais, a Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais (ABIOVE) e a Associação Nacional dos Exportadores de Cereais (ANEC) assumiram compromisso conjunto, chamado de

Moratória da Soja, de não comercializar soja plantada depois de 2006, proveniente de áreas que foram desflorestadas, localizadas dentro do bioma Amazônico. Esta iniciativa teve duração original de dois anos, mas vem sendo continuamente renovada (ABIOVE, 2007).

### **3.2.2 Cultivo da soja**

A soja é um grão que se desenvolve de maneira ideal na faixa de temperatura entre 20 e 30° C, sendo que temperaturas abaixo de 10° C e acima de 40° C prejudicam, ou até impedem, o seu crescimento (BIODIESELBR, 2010).

A altura ideal da plantação deve superar os 60 cm, condição que favorece a minimização das perdas de grãos durante o processo de colheita mecanizada. Em termos de necessidade de água, cada ciclo requer de 450 a 800 mm, faixa que depende das condições climáticas, do manejo da cultura e da duração do ciclo de produção. A semente de soja necessita absorver, no mínimo, 50% de seu peso em água para assegurar boa germinação (EMBRAPA, 2010b).

O ciclo da planta (número de dias da emergência à maturação) apresenta grande diversidade, variando de 70 dias para as mais precoces e 200 dias para as mais tardias. No Brasil, de modo geral, os ciclos variam entre 100 e 160 dias, dependendo da região em que ocorre o cultivo (BIODIESELBR, 2010).

O sistema de rotação de culturas, no qual ocorre uma alternância de espécies vegetais em uma mesma área ao longo do tempo, é preferível em relação à monocultura. O uso extensivo desta última tende a provocar: perda de qualidade do solo; erosão e condições favoráveis para o crescimento de ervas daninhas; pragas e doenças, malefícios estes que acabam por diminuir a produtividade da plantação (EMBRAPA, 2010b).

Mandarino e Roessing (2001) e Gonçalves et al. (2007) citam que a rotação pode ser feita entre diferentes espécies vegetais ou associada à áreas de pastagem. Para a soja, são boas opções de culturas antecessoras e sucessoras o milho, o trigo e o girassol. Atenção deve ser dada para culturas que possuem restrição quanto a anteceder (tremoços) ou suceder (girassol e canola) a plantação de soja.

Para o sistema de rotação de culturas é ideal o uso do plantio direto, com o objetivo de produzir palha e resíduos para o sistema produtivo. De acordo com Gonçalves et al. (2007); Brasil (2010b) e Franchini (2010), o plantio direto é uma prática

conservacionista, com três princípios básicos: ausência de preparo do solo e cobertura permanente do terreno e rotação de culturas, onde a semeadura é feita diretamente sobre a palhada da cultura anterior, o que proporciona a redução do impacto das gotas de chuva e da temperatura do solo, conservação da umidade do mesmo e melhor controle de plantas daninhas.

Brasil (2010b) coloca que apesar do plantio direto ser o sistema mais adequado em busca da sustentabilidade da soja brasileira, muitas regiões ainda apresentam práticas de preparo do solo, que requerem preparos primários (aração, escarificação ou gradagem pesada) e secundários (gradagens niveladoras) e o uso de semeadoras equipadas com grades de disco duplo.

Franchini (2010) reitera que o plantio direto é importante para a preservação ambiental, tanto na conservação do solo e redução da erosão, porém é feito de maneira parcial porque o produtor usa pouco a rotação de cultura.

Para Thones (2008), os fazendeiros brasileiros são líderes na técnica plantio direto e ABIOVE (2007) coloca que a produção de soja a partir do plantio direto representa mais de 80% do total nacional.

Entre as ameaças que a cultura da soja está sujeita, as plantas daninhas ocupam papel de destaque no que se refere à perda da produtividade de espécies vegetais; o cuidado com o seu controle é fundamental para o sucesso agrícola. Considerada uma invasora, por crescerem em locais indesejados, estas representam um mal para a lavoura ao competirem pelos elementos essenciais para o desenvolvimento da cultura comercial: luz solar; água; e nutrientes.

O combate às invasoras é comumente feito por meio da aplicação de herbicidas, que deve ser feita com os devidos cuidados para evitar-se o desperdício do material e a contaminação de outros ambientes. Também é de suma importância ter um conhecimento prévio sobre os tipos de plantas daninhas habitantes na região, a fim de decidir-se pelo correto tipo de herbicida.

Outro problema recorrente que a cultura de soja está sujeita é o ataque de insetos e pragas; neste caso, faz-se uso de inseticidas, que são escolhidos de acordo com o inseto/praga a ser combatido. Especial atenção durante a sua aplicação e o manejo das embalagens deve ser adotada, a fim de se evitar a propagação do elemento para a fauna, flora e comunidade local.

Similar ao problema de insetos e pragas, o cultivo desta oleaginosa também está exposta ao ataque de fungos que causam diversos tipos de doenças na plantação.

O sistema de combate mais empregado neste caso consiste da aplicação de fungicidas, e a mesma atenção relatada na aplicação e descarte dos inseticidas deve ser dada para este tipo de defensivo agrícola.

Não obstante os perigos causados por plantas daninhas, insetos e pragas e fungos, ainda é comum problemas de acidez com os solos brasileiros; tal adversidade, quando em elevado grau, prejudica a produtividade da agricultura. Para sua correção, utiliza-se a técnica de calagem, que consiste na aplicação uniforme de calcário desde a superfície do solo até 20 cm de profundidade, com o objetivo de estabilizar o pH entre 5,8 e 6,0 (EMBRAPA, 2010b).

Quanto à demanda nutricional para o crescimento da soja, o nitrogênio (N) é o elemento mais dependente. De acordo com Embrapa (2010b), para produzir 1000 kg de grãos são necessários 83 kg de N. Outros nutrientes importantes, como potássio e fósforo, medidos respectivamente em termos de  $K_2O$  e  $P_2O_5$ , respondem por 38 e 15,4 kg por 1000 kg de grãos, respectivamente.

As plantas obtêm o nitrogênio via fertilizantes nitrogenados, ou pela fixação biológica. Esta última é a principal fonte para a cultura de soja, sendo realizada por meio das bactérias do gênero *Bradyrhizobium*, que captam o N atmosférico e o transformam em formas assimiláveis para posterior absorção pelas raízes da soja. O contato das bactérias com as sementes se dá pela aplicação de um inoculante (processo de inoculação), diretamente nas sementes ou por aspersão no sulco, e deve ser feita sempre antes da semeadura (EMBRAPA, 2010b).

Conforme Crispino et al. (2001), a soja brasileira, diferentemente de outras espécies vegetais, não necessita de adubação nitrogenada, sendo que todo o N é obtido pelo processo de fixação biológica.

O cultivo de soja no Brasil apresenta características de plantio e colheita distintas dependendo da região geográfica, Centro-Sul ou Norte-Nordeste, conforme mostra a Figura 11.

SOJA		2009						2010												
		JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV		
Centro-Sul	Plantio					P	P	P	P											
	Colheita											C	C	C	C					
NNE	Plantio							P	P	P	P									
	Colheita													C	C	C	C			

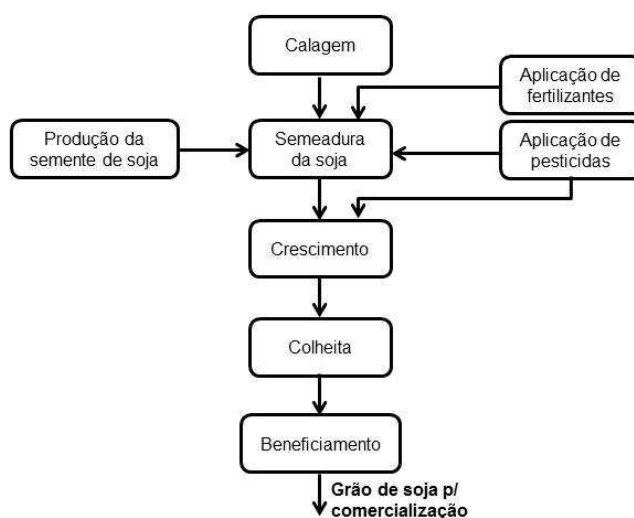
Legenda: P concentração do plantio    C concentração da colheita

**Figura 11 – Calendário de Plantio e Colheita da Soja**  
Fonte: EMBRAPA, 2010b.

Respeitar a época de semeadura e a duração do ciclo de crescimento da planta é de fundamental importância, a fim de que a mesma possa se desenvolver nos períodos de chuva e temperatura mais adequados.

A produção de grãos de soja inicia-se na fabricação das sementes, e estas, por sua vez, são submetidas a um tratamento inicial via aplicação de fungicida e inoculante antes da semeadura.

A Figura 12 apresenta um fluxograma da produção de grãos de soja, considerando a adoção do sistema de plantio direto.



**Figura 12 – Fluxograma simplificado da produção de grãos de soja**

Após a semeadura direta (a uma profundidade de 3 a 5 cm) geralmente ocorrem processos de acidificação no solo, combatidos por meio da calagem, que consiste na aplicação direta de calcário no solo (BRASIL, 2010b).

Além da correção do solo, é preciso que sejam fornecidos nutrientes e minerais para a germinação e desenvolvimento da soja. Tais produtos são obtidos via aplicação de fertilizantes minerais.

Uma vez que a soja atinge seu estado de maturação, segue-se a fase de colheita da produção, que no caso da soja é realizada integralmente de forma mecanizada.

Realizada a etapa de colheita da soja, os grãos são direcionados para uma unidade de beneficiamento, onde sofrem processos de secagem e beneficiamento. O primeiro processo visa estabelecer o nível de umidade entre 13 e 14%, enquanto que o beneficiamento é feito para remover residuais materiais estranhos, classificar

os grãos pelo tamanho e embalar o produto para posterior armazenamento e transporte.

### **3.2.3 Extração do óleo de soja**

A fase industrial de produção do óleo de soja envolve uma sequência de processos que podem ser agrupados em duas grandes etapas: a primeira que é a obtenção do óleo bruto, com a torta e o farelo como produtos; a segunda, o refino do óleo bruto, com vistas a adequar o produto para consumo alimentício.

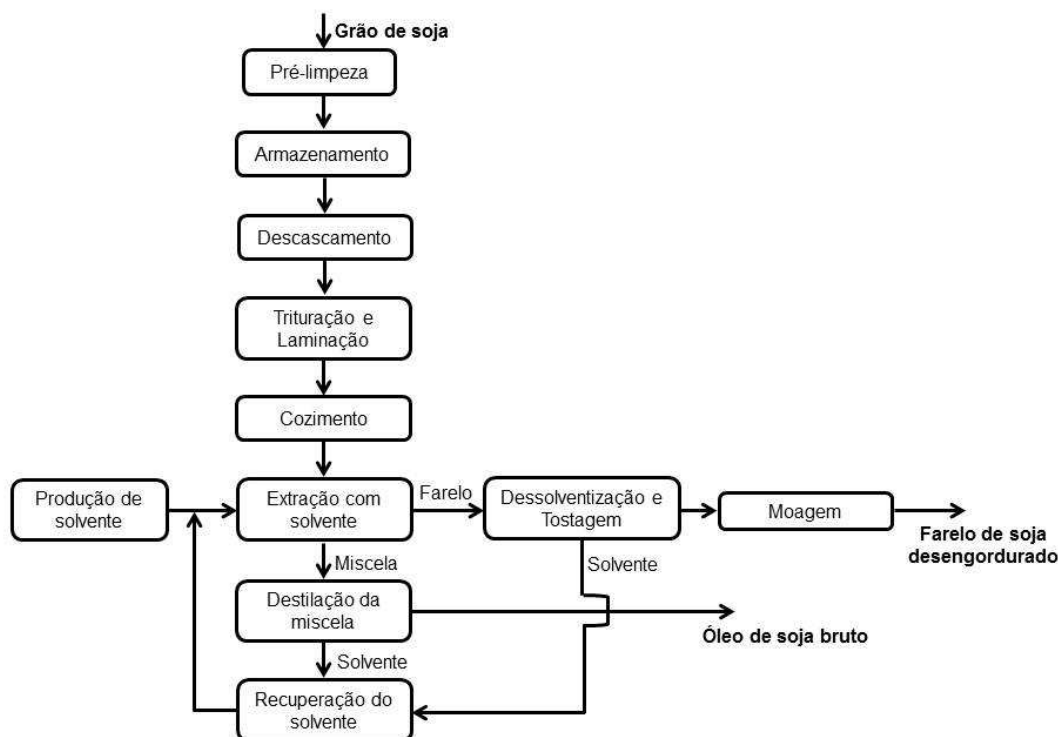
Para a produção de biodiesel, não há a necessidade de se proceder ao refino do óleo bruto (FREITAS, 2005 apud EPE, 2007).

A extração do óleo vegetal pode ocorrer por meio de um processo misto, que combina prensagem mecânica e extração por solvente, ou tão somente por ação do solvente.

A diferença entre estas duas rotas tecnológicas se dá pela existência de um processo mecânico adicional no processo misto, que primeiramente extrai parte do óleo bruto por ação de prensas contínuas. A extração por processo misto é característico das plantas industriais mais antigas, sendo que atualmente vem ocorrendo uma preferência pelas usinas que extraem o óleo bruto apenas por extração com solvente.

Segundo Tandy apud Sartori (2007), oleaginosas com alto teor de óleo (maiores que 30%) utilizam inicialmente o processo de extração por prensagem para reduzir o teor de óleo até cerca de 15%, enquanto que a extração por solvente é utilizada para extrair o restante possível (o teor residual é inferior a 1%). No caso de oleaginosas com menor teor de óleo, como é o caso da soja, utiliza-se exclusivamente a extração por solvente. A

Figura 13 ilustra o fluxograma da produção de óleo bruto por meio da extração por solvente.



**Figura 13 – Fluxograma simplificado da produção de óleo bruto**

Os grãos de soja que chegam à planta de extração de óleo são inicialmente submetidos a um processo de pré-limpeza com vistas à remoção de impurezas mais grosseiras. Este procedimento é realizado com o uso de máquinas especiais dotadas de peneiras vibratórias. Removidas as impurezas dos grãos, a soja deve ser armazenada em condições adequadas para evitar sua deterioração (MORETTO; FETT, 2009).

Após as fases de pré-limpeza e armazenamento, os grãos de soja são encaminhados para as etapas efetivas do processo de obtenção do óleo. Primeiramente, procede-se o descascamento, em que a casca é quebrada pela ação de batedores, ou facas giratórias, e separada da polpa por peneiras vibratórias e insuflação do ar.

Na sequência, a polpa é submetida aos processos de trituração e laminação, que se prestam a aumentar a superfície de saída do óleo. Estas etapas devem ser executadas o mais breve possível, para evitar a perda de qualidade do óleo e da torta.

Concluída a laminação, o material é conduzido para o seu cozimento, que visa o rompimento das paredes celulares para facilitar a saída do óleo. Neste processo, a temperatura é elevada de 70 para 105°C e a umidade mantida em torno de 20% (MANDARINO; ROESSING, 2001).



Em sucessão ao cozimento, o material é encaminhado para a etapa de extração do óleo, por meio da ação de solvente, em geral utiliza-se o hexano. O solvente é posteriormente recuperado da mistura óleo-solvente, chamada miscela; a torta, ou farelo, que contém menos de 1% de óleo, é submetido a uma moagem e, em seguida, ensacado.

A separação entre óleo e solvente é realizada via processo de destilação da miscela. O farelo, por sua vez, é submetido às etapas de dessolventização e tostagem, no intuito de tornar o material apto para o uso em rações ou outros fins.

### **3.2.4 Dados da produção de grão e óleo de soja**

Os EUA, Brasil e Argentina são os maiores produtores mundiais de soja. De acordo com o USDA (2011), na safra de 2009/2010, os EUA produziram 35,1% do total de soja no mundo, enquanto o Brasil aportou 26,5%. A produção de soja na Argentina totalizou cerca de 21%.

Entre os países importadores, a China e aqueles que compõem a União Européia responderam por aproximadamente 72% do total mundial; apenas a China importou 57,5% do volume total.

Em termos nacionais, segundo Conab (2011), na safra 2010/2011 foram produzidas 75,3 milhões de toneladas, em uma área ocupada de 24,2 milhões de hectares. Lazzarotto e Hirkuri (2009) analisando dados do IBGE e da Conab, para área ocupada pela commodity, afirmam que o Brasil detém 22,6% da área mundial, sendo que dentro do território nacional a cultura representa apenas 2,4% do espaço produtivo disponível. Dentro da área total de produção de grãos no país, aproximadamente 45% é ocupada para a produção de soja.

A produtividade média da soja brasileira se aproxima dos 3.000 kg/ha, sendo que nos estados do Centro-Oeste e no Paraná, os valores ultrapassam este valor (CONAB, 2011).

Em termos nacionais, o destaque na produção fica para o Centro-Oeste, com um total de 33,9 milhões de toneladas, equivalentes na safra 2010/2011, a 45% do total nacional. A outra região tradicionalmente produtora de soja é o Sul, que respondeu por 28,5 milhões de toneladas (37,9%).

Dentre os estados brasileiros, os maiores produtores são, respectivamente, Mato Grosso, Paraná e Rio Grande do Sul. Apenas o estado do Mato Grosso respondeu

por 27,1% da produção nacional; os outros dois estados, somados, acrescentaram mais 35,9% à produção total de soja no país, na safra 2010/2011.

Em termos de área plantada e de produtividade Mato Grosso ocupou a maior área; já o Paraná respondeu pela maior produtividade, como demonstra a Tabela 3.

**Tabela 3 – Área Plantada, Produtividade e Produção da Soja na Safra 2010/2011<sup>1</sup>**

Região/UF	Área (em mil ha)	Produtividade (em kg/ha)	Produção (em mil t)
<i>Norte</i>	645,5	3.063,0	1.977,2
RR	3,7	2.800,0	10,4
RO	132,3	3.215,0	425,3
PA	104,8	3.000,0	314,4
TO	404,7	3.032,0	1.227,1
<i>Nordeste</i>	1.945,7	3.213,0	6.251,5
MA	518,2	3.087,0	1.599,7
PI	383,6	2.983,0	1.144,3
BA	1.043,9	3.360,0	3.507,5
<i>Centro-Oeste</i>	10.819,4	3.137,0	33.938,9
MT	6.398,8	3.190,0	20.412,2
MS	1.760,1	2.937,0	5.169,4
GO	2.605,6	3.140,0	8.181,6
DF	54,9	3.200,0	175,7
<i>Sudeste</i>	1.636,9	2.824,0	4.622,1
MG	1.024,1	2.845,0	2.913,6
SP	612,8	2.788,0	1.708,5
<i>Sul</i>	9.133,5	3.124,0	28.534,6
PR	4.590,5	3.360,0	15.424,1
SC	458,2	3.250,0	1.489,2
RS	4.084,8	2.845,0	11.621,3
<b>Brasil</b>	<b>24,181,0</b>	<b>3.115,0</b>	<b>75.324,3</b>

Nota: <sup>1</sup>dados preliminares

Fonte: Conab, 2011.

Em relação aos dois principais derivados da soja, o Brasil vem aumentando a sua produção. A Tabela 4 apresenta dados sobre os mercados de farelo e óleo de soja no país, entre as safras 2006/07 e 2010/11.

**Tabela 4 – Balanço de oferta e demanda de farelo e óleo de soja no Brasil – Safras 2006/07 a 2010/2011, em mil toneladas**

Produto	Safra	Produção	Importação	Consumo	Exportação
Farelo	2006/07	22.021	193	9.944	12.224
	2007/08	24.111	111	11.325	12.899
	2008/09	24.164	113	11.845	12.530
	2009/10	23.549	47	11.644	12.038
	2010/11	27.154	36	12.900	14.155
Óleo	2006/07	5.512	26	3.238	2.261
	2007/08	6.047	101	3.647	2.521
	2008/09	6.187	8	4.098	2.136
	2009/10	5.963	41	4.518	1.456
	2010/11	6.973	2	5.393	1.610

Fonte: ABIOVE, 2011.

Apesar da produção e consumo terem crescido no período, os dados da Tabela 4 sinalizam que o farelo tem maior destaque para a exportação do que o óleo. A utilização do óleo de soja na produção de biodiesel pode ser a razão do maior consumo interno deste produto.

O óleo de soja é de grande importância no âmbito mundial, perdendo atualmente apenas para o de dendê no que diz respeito ao total de produção. No ano de 2008, segundo *Oil World Annual* apud Marborges Agroindústria S.A. (2010), a produção de óleo de soja foi de 36,8 milhões de toneladas, 23,1% do total mundial. Na Tabela 5 apresentam-se os dados sobre a produção mundial de óleo a partir de diferentes fontes.

**Tabela 5 – Produção mundial de óleos em 2008**

Origem	Produção (em mil toneladas)	Contribuição (%)
Algodão	5.023	3,1
Amendoim	4.341	2,7
Colza	19.836	12,4
Coco	3.052	1,9
Girassol	10.795	6,8
Mamona	582	0,4
Milho	2.356	1,5
Oliva	2.944	1,8
Palma	43.124	27,0
Palmiste	5.030	3,1
Sebo	8.529	5,3
Soja	36.856	23,1
Outros	17.273	10,8
Total	159.741	100

Fonte: Oil World Annual apud Marborges Agroindústria S.A (2010)

No mesmo período, a produção brasileira de óleo vegetal atingiu a marca de 8,1 milhões de toneladas, sendo que o óleo advindo da soja foi o maior contribuinte com um total de 6,3 milhões toneladas, 77% da produção nacional (OIL WORLD ANNUAL APUD MARBORGES AGROINDÚSTRIA S.A., 2010). Na Tabela 6 são informadas as principais fontes para a fabricação de óleo e gordura no Brasil em 2008.

**Tabela 6 – Produção brasileira de óleo e gorduras em 2008**

Origem	Produção (em mil toneladas)	Contribuição (%)
Soja	6.266	77,04
Sebo	569	7,00
Banha	397	4,88
Algodão	277	3,40

Palma	220	2,70
Outras	404	4,98

Fonte: Adaptado de Oil World Annual apud Marborges Agroindústria S.A (2010).

Observando os dados apresentados na Tabela 6, fica evidente o papel de destaque da soja frente às demais fontes para a produção de óleo e gordura. Em termos de oleaginosas, o algodão é a segunda maior produção, enquanto que o óleo de palma – líder mundial – é apenas a terceira opção vegetal para a produção de óleo no país. Comparando os dados da Tabela 6 com aqueles apresentados na Figura 9, percebe-se que o valor da contribuição da soja na produção de óleo e gordura é semelhante à participação do óleo de soja na produção de biodiesel. Este fato não ocorre ao acaso, uma vez que a produção de biodiesel se baseia na oferta de óleo disponível; ainda que o PNPB incentive a diversificação de fontes vegetais para o biocombustível, a soja atualmente é o grande motor para a expansão da produção brasileira de biodiesel.

### 3.3 ETANOL

#### 3.3.1 Características do etanol de cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma espécie vegetal composta de colmos e outras partes – denominadas genericamente de palha (ou palhiço) da cana (ponteiro, folhas verdes e folhas secas) –, conforme ilustrado na Figura 14.

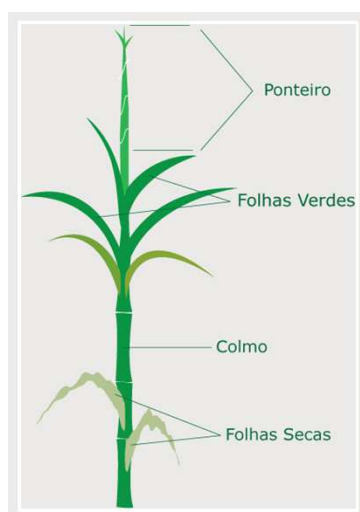


Figura 14 – Aspecto geral da cana-de-açúcar

A cultura é classificada como semiperene, onde cada plantio possibilita mais de um corte, sendo a média de cinco cortes em seis anos. Após esse período, é recomendável a cultura de alguma outra espécie vegetal pelo período de uma safra, e então novamente o plantio da cana. Assim como outras espécies vegetais, a cultura da cana apresenta características particulares dependendo da região onde for cultivada. No Norte-Nordeste, a safra vai de setembro a março, enquanto que na região Centro-Sul, o período fica entre os meses de abril e novembro (CORTEZ, 2010).

A cana colhida deve ser processada nas plantas industriais em até 72 horas após a colheita, com vistas a assegurar a qualidade do material. Dessa forma, não há estocagem da cana para a produção de etanol nos meses entre safras. Durante esse período, de quatro meses em geral, ocorrem atividades de manutenção dos equipamentos.

O etanol, ou álcool etílico, é um produto do processo de fermentação ou de síntese química, e é utilizado no mundo todo para diversos fins, tais como: insumo de processos industriais; produção de bebidas; e combustível para motores. Esta última aplicação possui principal destaque, na qual o etanol se apresenta como um substituto da gasolina em motores de ciclo Otto (SOUSA; MACEDO, 2010).

No Brasil, o uso de etanol em veículos automotores teve início na década de 1920, porém a produção em escala industrial ganhou impulso em meados da década de 1970, com a introdução do Programa Nacional do Álcool (Proálcool), em 1975. O programa foi introduzido pelo Governo Federal com o objetivo de estimular a produção e o uso de etanol como combustível alternativo à gasolina, em decorrência da crise mundial de petróleo que ocorria à época (CORTEZ, 2010; SOUSA; MACEDO, 2010).

Durante os primeiros dez anos, o Proálcool foi considerado como um sucesso, sendo que em 1985, 95% dos veículos leves eram abastecidos com álcool hidratado; porém a partir do final da década de 1980, o programa passou a entrar em declínio, em razão da baixa nos preços do petróleo e a expansão do preço do açúcar no mercado internacional (CORTEZ, 2010).

Após a introdução dos motores *flex fuel*, em março de 2003, a produção de etanol voltou a crescer no âmbito nacional. Segundo dados da Anfavea, no ano de 2010 as vendas de modelos *flex fuel* foi da ordem de 94% e 54% para automóveis e veículos comerciais leves (*vans*), respectivamente (ANFAVEA, 2011).

O etanol pode ser comercializado no país em duas formas: anidro, álcool praticamente puro – com algo em torno de 0,5% de água em volume – que é misturado com a gasolina pura<sup>8</sup> em uma proporção de 20 a 25% em volume; e hidratado, no qual a parcela de água se situa na casa de 5% do volume total, sendo esta forma utilizada diretamente nos motores de combustão interna.

No Brasil, o etanol é produzido, em escala comercial, exclusivamente a partir da cana-de-açúcar. Segundo Dedini apud Queiroz (2006), a cana é uma grande fonte energética, uma vez que uma tonelada deste produto fornece o mesmo conteúdo de energia que 1,2 barris de petróleo.

Cabe ressaltar que esta estimativa não leva em consideração o aproveitamento total de energia da cana pelo uso adicional de bagaço e palha. Macedo e Nogueira (2004) afirmam que a cada 100 milhões de toneladas de cana-de-açúcar é possível gerar aproximadamente 9.000 GWh de energia excedente à rede, o que equivale a 3% do consumo nacional.

O etanol ( $C_2H_6O$ ), por apresentar uma cadeia carbônica menor que a gasolina ( $C_8H_{18}$ ), tem a característica de gerar uma combustão com menor liberação de energia quando comparada com o combustível de origem fóssil. Por outro lado, por apresentar um átomo de oxigênio em sua estrutura molecular, a sua queima é mais completa e limpa.

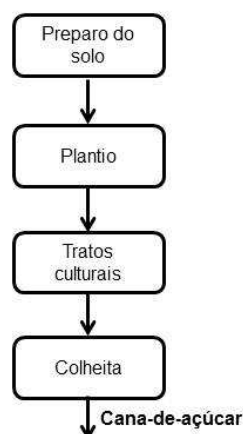
Esta queima mais limpa é recorrentemente citada como uma vantagem da substituição da gasolina pelo álcool. Macedo e Nogueira (2004) e Cortez (2010) indicam que a combustão do etanol é caracterizada pela: ausência de chumbo e enxofre; e menor emissão de particulados, gases de efeito estufa (GEE) e compostos orgânicos voláteis (VOC). Adicionalmente a isto, o álcool ainda apresenta maior octanagem, além de ser biodegradável e menos tóxico.

### **3.3.2 Cultivo da cana-de-açúcar**

O cultivo da cana-de-açúcar é composto, de maneira geral, a partir de quatro grandes etapas agrícolas, conforme ilustra a Figura 15.

---

<sup>8</sup> A gasolina na sua forma pura é chamada de gasolina A. Após a mistura com o etanol anidro, a gasolina é denominada gasolina C, que é a forma comercializada nos postos de combustíveis em todo o país.



**Figura 15 – Etapas do cultivo da cana-de-açúcar**

O preparo do solo consiste de um conjunto de operações que tem por finalidade deixar o solo nas melhores condições para o crescimento e o desenvolvimento do vegetal. De acordo com CGEE (2009), no preparo do solo é comum a realização de ações de: aração; gradagem (eliminação dos torrões e espaços vazios); subsolagem (rompimento de camadas muito compactas do solo); e calagem.

Estas ações de preparo do solo são realizadas para o plantio da chamada planta-cana. Após o 1º corte, o canavial é manejado para o cultivo da cana-soca que se desenvolve a partir da soqueira (base e raízes restante do último corte). Um ciclo completo da plantação de cana-de-açúcar envolve o corte de uma safra de planta-cana e, posteriormente, de quatro a cinco cortes de cana-soca.

O plantio da cana envolve as operações de sulcação, distribuição e cobrimento das mudas e adubação (CGEE, 2009). De acordo com Ometto (2005), o plantio da planta-cana é realizado, prioritariamente, de modo manual (ao invés de mecanizado), com a abertura de canais no solo (sulcos) de aproximadamente 25 a 30 cm, onde as mudas são colocadas e cobertas. A aplicação de adubos no canavial encerra a fase de plantio da cana. Na cultura canavieira, o uso de fertilizantes industriais é reduzido quando comparada com outras culturas vegetais em virtude do aproveitamento de resíduos industriais, tais quais: torta de filtro; vinhaça; e cinzas.

Os tratos culturais da cana visam proteger a plantação contra o ataque de ervas daninhas e pragas e doenças. Esses males são combatidos com a pulverização de herbicidas e outros defensivos agrícolas. O emprego de pesticidas nos canaviais brasileiros é baixo, sendo que a maior parte das pragas e doenças são combatidas com controle biológico e programas de melhoria genética (SOUSA; MACEDO, 2010).

A última etapa que ocorre efetivamente em solo agrícola é a colheita da plantação, que consiste de cinco operações simples: corte dos colmos na base; corte dos ponteiros; alimentação dos colmos para o interior da colhedora; retirada das folhas; e picagem.

Historicamente, a colheita da cana no Brasil era praticada quase que exclusivamente de forma manual após a queima do canavial. De acordo com Cortez (2010), a queima da cana era realizada para facilitar o corte manual e repelir animais venenosos (aranhas e serpentes); porém esta prática tem seus prejuízos uma vez que pode danificar o tecido celular da cana, bem como alterar a qualidade do solo e do ar do local.

Atualmente, a colheita mecanizada tem avançado significativamente no setor, principalmente no maior estado produtor do país, São Paulo, em razão de leis federais e estaduais que estabelecem cronogramas para a eliminação das queimadas. No caso específico de São Paulo, a Secretaria de Meio Ambiente (SMA) e a UNICA assinaram um protocolo em 2007, com o objetivo de reduzir progressivamente as áreas de queima dos canaviais, com um aumento correspondente da área mecanizada (SÃO PAULO, 2007).

A cana colhida é então transportada para as usinas, usualmente por meio de treminhões com capacidade de carga variável entre 15 e 58 toneladas (CGEE, 2009).

### **3.3.3 Produção de etanol**

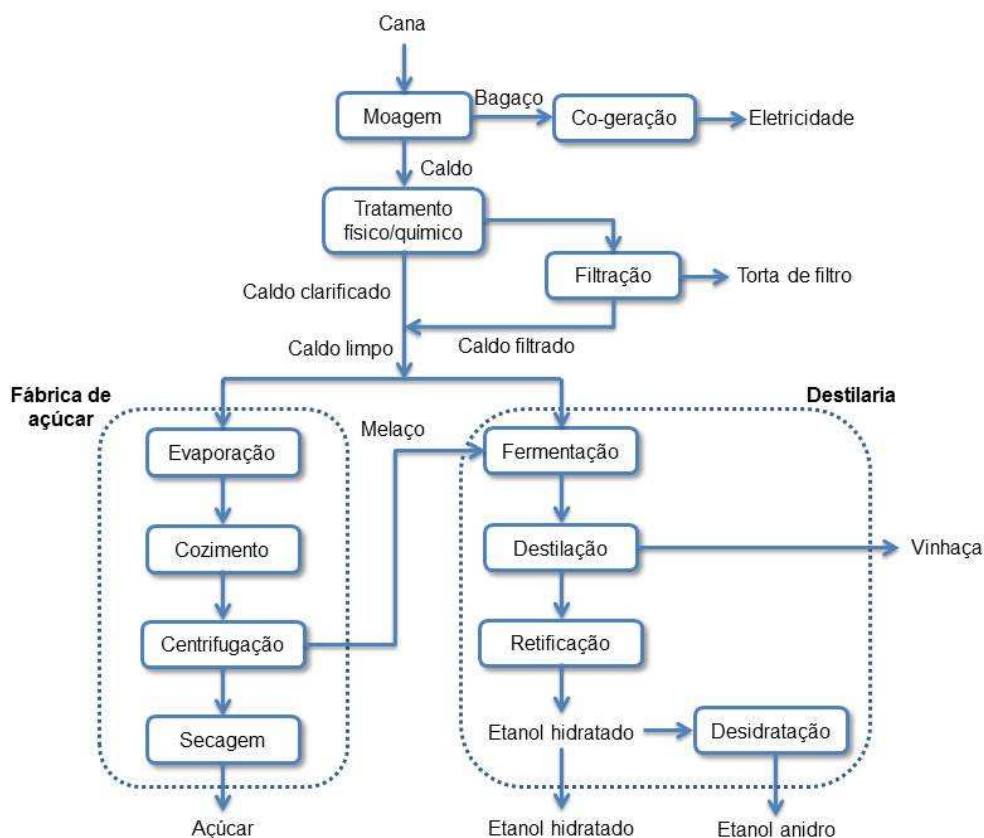
As plantas industriais que processam a cana-de-açúcar podem ser classificadas em usinas ou destilarias. As usinas são aquelas que detêm tecnologia para produzir tanto etanol quanto açúcar, ao passo que as destilarias só geram etanol.

Nas usinas, o direcionamento a favor de uma das opções depende principalmente da demanda do mercado. A decisão também sofre influência dos períodos de chuva, uma vez que em épocas úmidas a sacarose na cana apresenta níveis mais baixos, sendo preferível maximizar a produção de etanol. Em geral, a sacarose total contida na cana é repartida igualmente para a produção de etanol e açúcar, e a substituição de um produto pelo outro varia na faixa entre 5 a 10% (CORTEZ, 2010). Em uma usina típica, uma tonelada de cana produz 57 kg de açúcar, 50,6 L de etanol, 140 kg de bagaço seco e outros 140 kg de palha (CORTEZ, 2010). No caso



das destilarias, algumas têm capacidade de produzir 85 litros de etanol anidro por tonelada de cana (CGEE, 2009).

A Figura 16 ilustra a produção de açúcar e etanol em uma usina. No caso de destilaria, o perfil da destilaria é similar, com exceção da fábrica de açúcar.



**Figura 16 – Fluxograma da produção de açúcar e etanol na usina**

Fonte: Elaborado a partir de Seabra (2008).

Nas plantas industriais, os colmos procedentes dos canaviais inicialmente são colocados em esteiras que os conduzem para o processo de limpeza das impurezas, que pode ser realizada a úmido ou a seco. Em geral, se a cana for de corte manual (cana inteira), a limpeza é por lavagem, enquanto que se houver sido executado o corte mecanizado, a limpeza é feita por meio de jatos de ar (para evitar a perda de sacarose pela lavagem).

Após a limpeza, segue-se o preparo da cana, quando a mesma é picada e pulverizada para facilitar a etapa seguinte de moagem.

A moagem consiste no processo de extração do caldo da cana, por ação de rolos de pressão e alimentação, com a geração de bagaço de cana como sub-produto. De acordo com CGEE (2009), a extração de açúcares varia de 94 a 97,5% e a umidade final do bagaço fica em torno de 50%.

O bagaço é utilizado no processo industrial para a geração de energia; atualmente, as usinas produtoras de álcool são autossuficientes na produção de energia térmica e elétrica dada a queima deste material. Por meio de co-geração, as plantas são capazes de produzir energia em quantidade suficiente para abastecer todos os seus processos industriais. Em algumas usinas mais modernas, ainda ocorre um excedente de eletricidade, que é vendida para a rede de abastecimento.

A eletricidade obtida a partir da queima do bagaço é vista como uma importante opção para o planejamento energético do Brasil, uma vez que esta energia poderia abastecer à população em épocas que as usinas hidrelétricas têm sua capacidade de geração reduzida. O período de colheita da cana ocorre justamente na época de baixa pluviosidade (junho a novembro), quando os reservatórios atingem seus níveis inferiores; dessa forma, o aproveitamento desta fonte possibilita que não haja uma descontinuidade no fornecimento de energia elétrica no país (SOUSA; MACEDO, 2010).

Atualmente, a eletricidade é gerada apenas pelo processamento do bagaço; o enorme potencial energético contido na palha ainda não é aproveitado.

Para Sousa e Macedo (2010), outro ponto a favor da eletricidade da cana reside no fato da maior parte das usinas estarem localizadas no estado de São Paulo, o que reduz os custos e perdas com a transmissão para que a energia chegue ao principal centro consumidor brasileiro.

O caldo que sai da etapa de moagem passa por um tratamento, por aquecimento e decantação, para remoção de impurezas residuais. O processo de decantação gera um lodo que é submetido à filtração a vácuo, sendo que o líquido resultante da filtração retorna ao processo e a fração sólida (torta de filtro) é aproveitada como fertilizante na própria lavoura canavieira. No processo de fabricação de açúcar outro efluente também é gerado, o melaço, que é aproveitado na produção de etanol (OMETTO, 2005).

Uma vez tratado o caldo, ele é conduzido para a etapa de fermentação, em que sofre ação de leveduras, cujo produto é um substrato açucarado, conhecido como vinho (caldo da cana fermentado). O vinho precisa passar pelo processo de centrifugação, para recuperação das leveduras, antes de ser encaminhado para a etapa de destilação.

A destilação do vinho é realizada em colunas de pratos, sendo que na primeira ocorre a geração de álcool de 45° a 50° GL (fração em volume), conhecido como

flegma; outra corrente, a vinhaça, deixa a unidade como efluente do processo. Segundo Sousa apud Vianna (2006), por apresentar grande teor de matéria orgânica e potássio a vinhaça pode ser utilizada no campo para a fertirrigação. No entanto, CGEE (2009) sinaliza que dado seu alto valor poluente este uso deve ser controlado, a fim de não provocar impactos ambientais negativos no solo, nascentes e lençóis freáticos.

Na sequência, a flegma é conduzida para outra coluna de retificação, que apresenta como produto final o álcool hidratado, com 97° GL (OMETTO, 2005).

Como última etapa da fase industrial de produção de etanol anidro, o álcool hidratado passa por um processo de desidratação, quando o teor de água no álcool passa de 5% para 0,5%, em termos volumétricos.

Cabe informar que a descrição apresentada se baseia na produção de etanol a partir do processamento dos colmos da cana-de-açúcar, não considerando o aproveitamento de bagaço ou palha para a geração do álcool.

### **3.3.4 Dados da produção de cana-de-açúcar e etanol**

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar. Segundo Conab (2011), a safra 2010/2011 atingiu produção de 623,9 milhões toneladas, em uma área correspondente a 8,0 milhões de hectares. O estado de São Paulo ocupa papel de destaque na indústria sucroalcooleira, sendo responsável por 54,1% da área e produzindo 58% do total da cana brasileira.

Ainda de acordo com Conab (2011), a produtividade média da cana nesta safra foi de 77.446 kg/ha (São Paulo obteve 83.021 kg/ha) e, do total da produção, 48% e 52% foram destinadas para a fabricação de açúcar e etanol, respectivamente.

No que diz respeito ao etanol, o Brasil é o 2º maior produtor mundial deste biocombustível, ficando atrás apenas da produção dos EUA. Se for analisada apenas a geração de etanol de cana-de-açúcar, o produto brasileiro lidera a produção mundial (cabe lembrar que o etanol norte-americano é derivado do milho).

Durante a safra 2010/2011, o volume total produzido foi de 27,6 bilhões de litros, dos quais 8 bilhões de litros foram etanol anidro, e outros 19,6 bilhões de litros de etanol hidratado (CONAB, 2011).

### 3.4 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)

#### 3.4.1 Conceito de Ciclo de Vida

A preocupação com o meio ambiente e os impactos que as ações humanas acarretam no mesmo é uma ação relativamente recente, tanto para a sociedade quanto para o setor empresarial.

Dentro das organizações, a questão ambiental originalmente era desconsiderada, o que implicava que pouca, ou nenhuma medida, era tomada a fim de minimizar os impactos ambientais decorrentes da produção industrial. Fatores como: legislações que restringem a emissão de certos poluentes; o aumento da pressão da sociedade; e disputa de mercado forçaram as empresas a considerar que a variável ambiental fosse incluída nos seus negócios.

A primeira etapa de conscientização seguiu uma postura chamada reativa, na qual as ações eram voltadas basicamente para atender aos padrões da legislação; por exemplo, pelo tratamento de efluentes industriais e emissões atmosféricas antes dos seus lançamentos no meio ambiente (KIPERSTOK ET AL., 2002).

No entanto, essas medidas isoladas de tratamento, além de acarretarem custos adicionais às instituições, não são suficientes para eliminar ou mesmo reduzir os problemas ambientais. A partir desta constatação, verificou-se que era preciso investir também na prevenção dos impactos ambientais, por meio da adoção de iniciativas que visam um menor consumo de recursos e a minimização na geração de rejeitos, na linha de que *“é melhor prevenir do que remediar”*.

Acontece que esta postura de prevenção da poluição ainda não é a ideal; conforme Silva e Kulay (2010), as mesmas estão limitadas ao ambiente interno das organizações, caracterizando um *foco sobre o processo*.

Estes autores lembram que a produção de bens de consumo final leva ao consumo de recursos materiais e energéticos, e que os impactos ambientais destas etapas a montante da cadeia produtiva não são contemplados quando se foca sobre o processo. O olhar, neste caso, deve ser mais abrangente, segundo um *foco sobre o produto*.

O foco sobre o produto leva em consideração os impactos ambientais decorrentes desde a extração de recursos naturais até a produção dos bens de consumo, porém ainda há de se incluir os prejuízos para o meio ambiente decorrentes das etapas de

uso, reuso, reciclagem e disposição final destes produtos. Somente com a consideração de todas estas etapas, a montante e a jusante da cadeia produtiva, a questão ambiental é corretamente tratada. Produtos são feitos para atender a um desejo ou a uma necessidade e, por esta razão, a avaliação deve ser baseada no *foco sobre a função do produto* (SILVA; KULAY, 2010).

Essa visão sistêmica pode ser entendida como o conceito de ciclo de vida, onde todas as etapas associadas a um produto são levadas em consideração, desde a extração dos recursos naturais, passando pela sua produção e uso, até a sua disposição final. Esse pensamento do ciclo de vida (em inglês *Life Cycle Thinking*) pode ser utilizado para avaliar tanto aspectos ambientais quanto econômicos e sociais (BAUMANN; TILLMAN, 2004; BENOÎT; MAZIJN, 2009).

Entender a importância do LCT é o primeiro passo que as organizações podem tomar para incorporar o conceito de ciclo de vida na gestão de seus negócios. A adoção de práticas gerenciais que buscam aplicar o LCT é conhecida como *Life Cycle Management (LCM)* (BAUMANN; TILLMAN, 2004; BENOÎT; MAZIJN, 2009).

Para a efetividade do LCM é necessário o uso de ferramentas de medição; aquela que avalia o mérito ambiental é conhecida como Avaliação de Ciclo de Vida (ACV).

A norma nacional ABNT ISO 14040:2009 define ACV como: *compilação e avaliação das entradas, saídas e dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida* (ABNT, 2009a).

À parte da definição normativa, entende-se que a ACV é uma técnica da Gestão Ambiental que quantifica as entradas e saídas<sup>9</sup>, de matéria e energia, e os respectivos impactos ambientais associados, segundo uma abordagem sistêmica de ciclo de vida. A ACV é, em essência, uma técnica de diagnóstico, na qual os resultados podem ser utilizados como subsídio para tomada de decisões em busca da melhoria do desempenho ambiental.

### **3.4.2 Aplicações da ACV**

Diferentes autores apresentam variadas aplicações para a ACV; algumas delas, no entanto, são recorrentemente citadas (SCHENCK, 2000; GUINÉE ET AL., 2001;

---

<sup>9</sup> Nesta dissertação, entradas e saídas representam aspectos ambientais. A ABNT NBR ISO 14001:2004 define aspecto ambiental como: *“elemento das atividades, produtos ou serviços de uma organização que pode interagir com o meio ambiente”*.

BAUMANN; TILLMAN, 2004; CURRAN, 2006; ABNT, 2009a; SILVA; KULAY, 2010); a saber:

- ✓ Desenvolvimento e aperfeiçoamento de produtos e processos;
- ✓ Identificação de oportunidades de melhoria;
- ✓ Planejamento estratégico;
- ✓ Ações de *marketing*;
- ✓ Instrumento para a elaboração de políticas públicas;
- ✓ Suporte para programas de rotulagem e declaração ambiental;
- ✓ Comparação entre produtos que exerçam a mesma função.

Considerando a ampla gama de possibilidades de uso dos resultados de um estudo de ACV, fica evidente a importância da ferramenta na tomada de ações que, em sua essência, objetivam a melhoria da relação entre as atividades humanas e o meio ambiente. A ACV é, de fato, um importante instrumento para o diagnóstico da situação ambiental associada ao ciclo de vida de um produto. A partir dos resultados por ela gerados, medidas podem ser tomadas para a contínua busca da melhoria de desempenho ambiental.

Sendo assim, a ACV pode ser entendida como um *meio* e não como um *fim*, dado que ela, de maneira isolada, não resolve problemas ambientais.

### **3.4.3 Limitações da ACV**

Apesar da ampla gama de aplicações que a ACV se presta no trato da questão ambiental, a ferramenta apresenta ainda limitações, tanto de caráter metodológico quanto da necessidade de grande número de dados (SILVA; KULAY, 2007).

A ACV ainda não possui uma metodologia universal de execução dos estudos. Tal fato implica que alguns procedimentos são tomados com base em critérios subjetivos do executante do estudo. Como consequência desta subjetividade, inconsistências podem ser originadas, levando a alterações nos resultados finais.

Para Kulay (2008), o contorno da subjetividade requer que haja total e absoluta transparência na elaboração do relatório do estudo, por meio da declaração explícita de todas as premissas e hipóteses assumidas durante o desenvolvimento da ACV. Adicionalmente, este autor defende a necessidade da promoção de esforços intelectuais com o objetivo de desenvolver e consolidar um método de execução dos estudos que permita a obtenção de resultados consistentes e reprodutíveis.

Ainda como uma limitação de fundo metodológico, a ferramenta carece de modelos de avaliação de impacto que permitam avaliar de maneira, no mínimo razoável, os impactos ambientais decorrentes das ações humanas.

Atualmente existem alguns modelos disponíveis para a comunidade de ACV, que são comumente adotados nos estudos desta natureza (PRÉ CONSULTANTS, 2001; GUINÉE ET AL., 2001; POTTING; HAUSCHILD, 2004; GOEDKOOP ET AL., 2009). No entanto, estes modelos não são perfeitos, seja porque não contemplam todos os impactos ambientais existentes, seja em razão de não considerarem a questão da regionalidade na magnitude dos mesmos. Particularmente neste último ponto, a quantificação de um determinado impacto ambiental pode estar diretamente relacionada ao local onde ocorre; portanto, a utilização de um modelo que não seja adequado pode levar a resultados inconsistentes. Assim como indicado por Kulay (2008) no trato da subjetividade da ACV, a superação desta limitação se dá por meio de investimentos de caráter intelectual, com vistas à construção de modelos de impacto ambiental mais bem adequados à realidade que se prestam a modelar.

A terceira limitação da ACV diz respeito a grande quantidade de dados necessários para representar o ciclo de vida de um produto. Elevado número de informações implica em um alto custo de execução do estudo. Para contornar esta limitação, esforços vêm sendo empreendidos na construção de banco de dados para auxílio à execução de estudos de ACV.

Os bancos de dados são constituídos por inventários de ciclo de vida comuns aos ciclos de vida de diversos produtos. No entanto, não deve ser feito o uso indiscriminado destes bancos de dados sem uma prévia análise das condicionantes que lhe são características. A não observância de tal ação pode acarretar em resultados inconsistentes no estudo (KULAY, 2008).

#### **3.4.4 Metodologia de ACV**

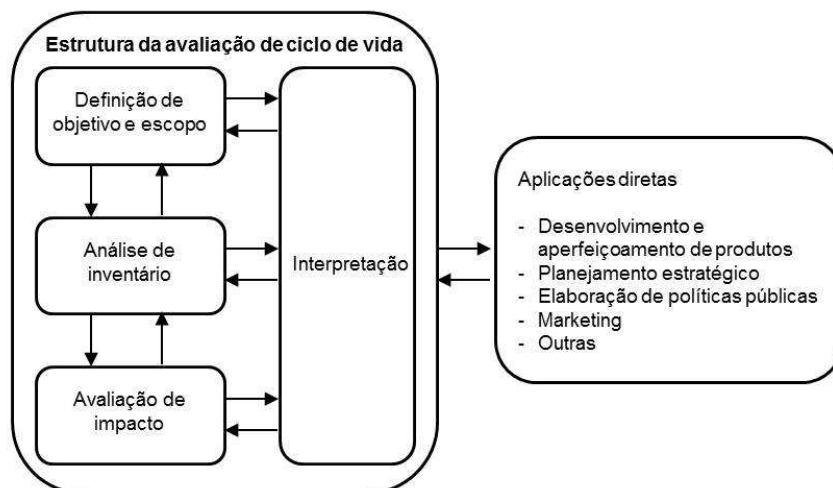
Segundo Silva e Kulay (2010), a ACV é uma técnica muito nova que não apresenta uma metodologia de execução universalmente consolidada; de maneira geral, os estudos seguem uma estrutura básica comum dada pelas normas ISO da série 14040.

De acordo com ABNT (2009a), os estudos de ACV compreendem quatro fases:

- a) Definição de objetivo e escopo;

- b) Análise de inventário;
- c) Avaliação de Impacto; e
- d) Interpretação.

A forma como cada uma destas fases interage entre si é ilustrada na Figura 17.



**Figura 17 – Fases de uma ACV**

Fonte: ABNT, 2009a.

Ao olhar atentamente para a Figura 17 percebe-se a natureza iterativa de um estudo de ACV (representada pelas setas duplas interligando as fases), o que significa que as ações tomadas em uma fase preliminar podem (ou precisam) serem revistas no decorrer do estudo, à medida que outras decisões de fundo metodológico forem sendo tomadas. De acordo com Comissão Europeia (2010), inicialmente estabelece-se o objetivo do estudo, e na sequência são definidos os requisitos de escopo que balizam a execução das fases de Análise de inventário e Avaliação de impactos.

#### **3.4.4.1 Definição de Objetivo e Escopo**

A definição de objetivo e escopo é a primeira etapa de um estudo de ACV. As definições estabelecidas nesta fase orientam a execução de todo o trabalho das etapas seguintes.

##### **3.4.4.1.1 Objetivo do estudo de ACV**



O objetivo de uma ACV é determinado pelo estabelecimento das *razões, aplicação pretendida e público-alvo* do estudo.

Informações a respeito do solicitante, do executante e outras partes envolvidas no estudo de ACV também são recomendáveis na definição do objetivo (COMISSÃO EUROPEIA, 2010a; GUINÉE ET AL., 2001). O envolvimento de *stakeholders* no estudo é fundamental para que aspectos importantes do ciclo de vida dos produtos possam ser identificados durante os trabalhos, e não apenas após a sua conclusão, quando todo o esforço em relação a tempo e orçamento já foram gastos (SCHENCK, 2000).

A definição clara do objetivo do estudo é fundamental para o sucesso da ACV, visto que a partir dele são definidos os aspectos iniciais do escopo; estes, por sua vez, estabelecem o quadro para a realização do inventário e da avaliação de impactos ambientais.

Esta primeira fase da ACV deve ser feita em conjunto entre o requisitante e o executor do estudo. O papel do primeiro é declarar ao executor a aplicação, as razões e o público do estudo, enquanto cabe ao executor informar as possíveis diferenças no resultado do estudo em razão do uso de diferentes abordagens metodológicas (BAUMANN; TILLMAN, 2004).

#### **3.4.4.1.2 Escopo do estudo de ACV**

Definido o objetivo da ACV, parte-se para a definição do escopo, que segundo ABNT (2009b) é constituído de catorze itens a serem estabelecidos:

##### *a. O sistema de produto*

O sistema de produto é o conjunto de processos elementares, com fluxos elementares e de produto, desempenhando uma ou mais funções definidas e que modela o ciclo de vida de um produto (ABNT, 2009a).

A norma define ainda *processo elementar* como sendo o menor elemento considerado na análise de inventário de ciclo de vida para o qual dados de entrada e saída são quantificados; e *fluxo elementar* como material ou energia retirado do meio ambiente e que entra no sistema de estudo sem transformação previa por

interferência humana, ou material e energia que é liberado no meio ambiente pelo sistema em estudo sem sofrer transformação subsequente por interferência humana. Da definição normativa, entende-se que o sistema de produto é a representação da realidade física do ciclo de vida de um produto, com a identificação de todas as unidades (processos elementares) e os fluxos que cada uma destas unidades troca entre si (fluxos de produto) e com o meio ambiente (fluxos elementares).

*b. As funções do sistema de produto ou, no caso de estudos comparativos, dos sistemas*

A função do produto indica o uso a que o mesmo se destina para efeito da elaboração do estudo. Em algumas situações um produto pode ter mais de uma função (serve a mais de um propósito), como, por exemplo, o celular que na sua essência é um dispositivo para efetuar ligações, mas também possui usos de agenda, câmera fotográfica, filmadora, entre outras.

A função deve ser claramente informada e, caso um sistema seja multifuncional, as demais funções não consideradas no estudo devem ser justificadas e reportadas.

Vale lembrar que um dos mais difundidos usos da ACV se dá como ferramenta de comparação entre alternativas, desde que as mesmas executem a mesma função.

No caso da multifuncionalidade em estudos comparativos, ABNT (2009a) recomenda que alternativamente à simples não consideração das outras funções, pode-se adotar uma abordagem que inclui dentro das fronteiras do sistema de produto outro sistema alternativo que execute a mesma função.

Um exemplo desta situação ocorreria em um estudo que se propõe a comparar uma impressora comum com uma impressora multifuncional (que além de ser impressora, também pode ser utilizada como *scanner* e copiadora). Ao sistema de produto da impressora comum seriam adicionados outro dois ciclos de vida: 1) de um aparelho que só tem a função de *scanear*; 2) de outro que só faz cópias. Tal sistema estendido seria comparado com aquele da impressora multifuncional.

*c. Unidade funcional*

A unidade funcional (UF) é a quantificação do exercício da função (SILVA; KULAY, 2007). Isto quer dizer que a UF especifica melhor, de forma quali e quantitativa, a função do produto. Usando-se a UF, como base de cálculo, é que os dados de entrada e saída do sistema de produto são quantificados.

Associado à unidade funcional está o fluxo de referência, que especifica a quantidade de produto necessária para atender a unidade funcional estabelecida. A precisão na transformação da unidade funcional para o fluxo de referência exige que se conheça o desempenho técnico do produto (SILVA; KULAY, 2007).

Em estudos de ACV de um único produto, não é muito relevante o conhecimento do fluxo de referência, uma vez que o que define os dados a serem coletados é a unidade funcional. Porém, em estudos comparativos deve-se ter o cuidado de estabelecer uma unidade funcional comum a todas as alternativas, e determinar cada um dos respectivos fluxos de referência com base no desempenho técnico dos produtos.

#### *d. A fronteira do sistema*

A fronteira do sistema define quais etapas do ciclo de vida, processos elementares ou até mesmo, entradas e saídas, são incluídas no estudo de ACV. Segundo Guinée et al. (2001), a definição das fronteiras do sistema é imprescindível para separar o sistema em estudo do restante do mundo e inclui três tipos de fronteiras distintas:

- ✓ Fronteira entre o sistema de produto e o meio ambiente (interação por meio de fluxos elementares);
- ✓ Fronteira entre os processos relevantes e os irrelevantes; e
- ✓ Fronteira entre o sistema de produto em estudo e outros sistemas (interação por meio de produtos intermediários, finais ou rejeitos).

Para Silva e Kulay (2010), a efetiva definição das fronteiras do sistema de produto ocorre por meio da elaboração de modelos representativos da realidade. A elaboração de tais modelos deve obedecer a um compromisso entre a precisão dos resultados e a viabilidade prática de execução do estudo.

É útil descrever o sistema e suas fronteiras usando um fluxograma de processo que mostre os processos elementares e suas inter-relações, cada um com suas respectivas entradas e saídas. No entanto, no início do estudo em geral é improvável que sejam conhecidos todos os detalhes do ciclo de vida e, sendo assim, um fluxograma genérico nesta etapa é recomendável. A partir do refinamento das informações no decorrer dos trabalhos, um fluxograma mais detalhado é desenhado (BAUMANN; TILLMAN, 2004).

Ainda dentro das fronteiras do sistema, ABNT (2009a) trata sobre o uso de critérios para inclusão preliminar de entradas e saídas. Há um conjunto de três critérios:

- ✓ Massa: inclusão de todas as entradas (ou saídas) cuja contribuição cumulativa superar uma porcentagem definida da entrada (ou saída) de massa do sistema de produto que está sendo modelado;
- ✓ Energia: similar ao critério acima, porém usando valores de energia ao invés de mássicos; e
- ✓ Significância ambiental: aplicado para verificar se as entradas (ou saídas) excluídas preliminarmente pelos critérios de massa e energia não influem significativamente nos resultados finais, segundo um critério de relevância ambiental.

A aplicação de critérios de inclusão deve ser devidamente justificada e reportada no estudo de ACV.

#### *e. Procedimentos de alocação*

Um processo é chamado multifuncional quando apresenta mais de uma entrada, ou saída (caso mais comum), de produtos de valor comercial. As saídas que não tem relevância comercial para o sistema (não tem valor de mercado para ser comercializado) é nomeada liberação<sup>10</sup> (emissões atmosféricas, efluentes líquidos e resíduos sólidos).

Quando ocorre a geração de coprodutos em um processo elementar surge a questão de como atribuir a carga ambiental (entradas e saídas) entre o produto de interesse e os coprodutos, que não são relevantes para o sistema de produto em estudo. Esse tópico dentro da metodologia de ACV é conhecido como alocação.

Existem diferentes abordagens metodológicas para lidar com a alocação, que serão discutidas posteriormente neste documento. ABNT (2009a) sugere as seguintes opções:

1. A alocação deve ser evitada, sempre que possível, por meio da: a) divisão do processo elementar multifuncional em dois ou mais subprocessos, e coleta dos dados de entrada e saída relacionados a esses subprocessos; b) expansão do sistema de produto de modo a incluir as funções adicionais relacionadas aos coprodutos.

---

<sup>10</sup> Será seguida a definição da norma ABNT NBR ISSO 14040:2009, que define como liberações: “emissões para a atmosfera e descargas para os corpos d’água e para o solo”.

2. No caso da impossibilidade de se evitar a alocação, convém que as entradas e saídas do sistema sejam subdividas entre seus diferentes produtos, de maneira a refletir as relações físicas (massa ou energia) entre eles.
3. Quando uma relação física não puder ser utilizada, convém que a alocação seja feita por outras relações, como por exemplo, valor econômico.

Qualquer que seja o critério de alocação escolhido, o mesmo deve ser aplicado de forma uniforme ao longo do estudo e reportado no relatório final.

*f. Metodologia de AICV e tipos de impactos*

Neste item do escopo devem constar informações a respeito da fase de Avaliação de impacto, quais sejam: categorias de impacto; indicadores das categorias consideradas; e o modelo de avaliação de impactos ambientais adotado. Estes itens estão apresentados no capítulo que trata da fase de Avaliação de impacto.

*g. Interpretação a ser utilizada*

Cabe informar quais técnicas (verificações de completeza, sensibilidade, consistência, entre outras) pretende-se utilizar na fase de Interpretação dos resultados. Um melhor entendimento acerca destas será dado no capítulo que trata da fase de Interpretação.

*h. Requisitos de dados*

Muitos são os dados a serem coletados em um estudo de ACV e os requisitos de dados tratam a respeito do tipo (medido, calculado ou estimado) e fonte (primário ou secundário) de dados a serem coletados, de acordo com o objetivo e escopo estabelecidos.

*i. Pressupostos*

Conforme destacado anteriormente, não existe uma metodologia de execução de estudos de ACV universalmente consolidada. Alguns pontos ainda estão em discussão na comunidade internacional, o que implica na necessidade do executante tomar certas decisões de fundo metodológico. Uma vez que diferentes decisões podem alterar significativamente os resultados de uma ACV, cada escolha, ou premissa, deve ser devidamente justificada e reportada. É importante informar

todos os pressupostos adotados no estudo para que este possa ser reproduzido por um terceiro, de forma que os mesmos resultados sejam alcançados.

*j. Escolha de valores e elementos opcionais*

A metodologia de ACV envolve tanto questões objetivas (ou científicas) quanto subjetivas, das quais a decisão sobre a alocação é um exemplo.

Em função das decisões subjetivas poderem gerar divergências de opiniões, é recomendável que as mesmas sejam documentadas para que se os resultados finais do estudo possam ser melhor interpretados.

Cabe destacar que as escolhas metodológicas na ACV não são arbitrárias; em sua essência, devem ser tomadas de acordo com o propósito do estudo (BAUMANN; TILLMAN, 2004).

*k. Limitações*

Um estudo de ACV pode estar sujeito a limitações de diversas naturezas, sejam de ordem financeira, temporal, ou na obtenção de dados de qualidade. Qualquer limitação identificada pelo executante do estudo deve ser reportada no relatório final.

*l. Requisitos de qualidade dos dados*

A disponibilidade de dados, bem como sua qualidade, é fundamental para o sucesso de um estudo de ACV. Para tanto, é preciso que sejam definidos alguns requisitos de qualidade dos dados, os quais devem guardar sempre consonância com o objetivo e escopo da ACV.

ABNT (2009a) define um conjunto de requisitos de qualidade dos dados, dos quais três merecem destaque:

- ✓ **Cobertura temporal:** definição da idade dos dados, ou seja, qual o intervalo de tempo para o qual os dados refletem a realidade estudada. O período estabelecido não deve ser muito anterior à época de execução do estudo. Segundo Curran (2006), este deve ser longo o suficiente para não sofrer influência de desvios ou variações nas condições normais de operação de uma atividade (paradas para manutenção, situações emergenciais e flutuações nos níveis de produção);
- ✓ **Cobertura geográfica:** indica a área geográfica para a qual os dados coletados são válidos. Por exemplo: os dados são válidos para a produção

média nacional; ou se aplicam apenas para o caso de certa planta industrial; e

- ✓ **Cobertura tecnológica:** descreve qual a tecnologia (ou *mix* de tecnologias) que os dados estão associados.

Outros requisitos de qualidade dos dados também são importantes em estudos de ACV:

- ✓ **Precisão:** medida da variabilidade dos valores de dados para cada dado expresso;
- ✓ **Completeza:** porcentagem de dados primários em relação ao conjunto total de dados;
- ✓ **Representatividade:** avaliação qualitativa quanto ao grau em que o conjunto de dados reflete a realidade física dada pelas coberturas temporal, geográfica e tecnológica;
- ✓ **Consistência:** avaliação qualitativa quanto ao grau de uniformidade com que os procedimentos metodológicos foram aplicados no estudo; e
- ✓ **Reprodutibilidade:** avaliação qualitativa se as informações reportadas são suficientes para que o estudo seja reproduzido.

#### *m. Tipo de revisão crítica, se aplicável*

Ainda como item de escopo, cabe informar se é previsto o processo de revisão crítica do estudo, seja por especialista interno ou externo. Em qualquer um destes casos, a revisão deve ser conduzida por um especialista não envolvido com a condução da ACV. As constatações e recomendações feitas pelo revisor devem ser incluídas no relatório final do estudo (ABNT, 2009a).

#### *n. Tipo e formato do relatório requerido para o estudo*

Como último item do escopo, a norma cita a validade de informar o tipo e formato do relatório, de modo que os resultados, dados, métodos, pressupostos e limitações possam ser apresentados de forma completa, precisa e imparcial. Se o estudo objetiva a afirmação comparativa para comunicação pública, requisitos adicionais devem ser considerados (ABNT, 2009a).

### **3.4.4.2 Análise de Inventário**

Concluída a fase de Definição de objetivo e escopo, as bases para a quantificação das entradas e saídas do sistema de produto estão estabelecidas. Assim, deve-se partir para a fase de Análise de Inventário.

A construção do Inventário de ciclo de vida (ICV) é a fase que mais consome tempo e recursos em um estudo de ACV, dado o enorme volume de informações que precisam ser obtidas. Diante desta situação, Baumann e Tillman (2004) afirmam que na coleta de dados é fundamental a procura pelos dados certos, não apenas coletá-los.

A Análise de Inventário consiste basicamente em duas etapas: *coleta de dados* e *tratamento dos dados* (SILVA; KULAY, 2010).

#### 3.4.4.2.1 Coleta de dados

A coleta de dados corresponde ao levantamento das informações do ciclo de vida do produto, dados estes que devem obedecer aos requisitos de qualidade definidos na fase de escopo. Os dados a serem levantados devem trazer informações quantitativas, bem como de natureza qualitativa, que descrevem os requisitos de qualidade a que estão associados.

Previamente à coleta é fundamental a construção de um fluxograma (ou mesmo o refino do fluxograma inicial), respeitando a definição das fronteiras estabelecidas na fase de escopo. Um fluxograma consiste nos processos elementares e seus respectivos dados de entrada e saída, como exemplifica a Figura 18.

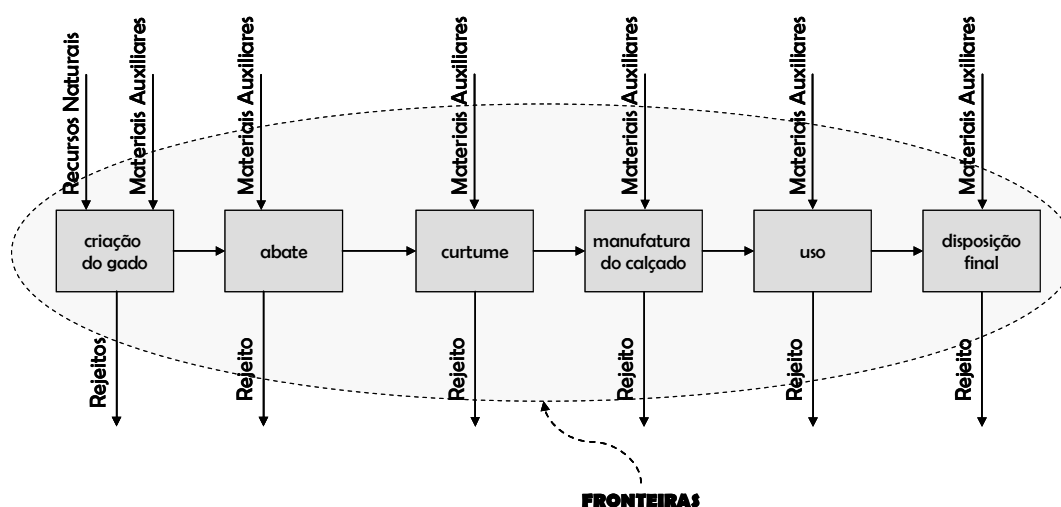


Figura 18 – Fluxograma representativo do sistema de produto de um calçado de couro  
Fonte: Kulay, 2008.



Com base no fluxograma parte-se para a coleta (e documentação) dos dados, que segundo Curran (2006) e Silva e Kulay (2010) podem ser obtidos: diretamente nos locais de produção (dados primários); por meio de fontes indiretas que não medições de campo (dados secundários); simulações; ou mesmo em contato com especialistas. A utilização de dados primários, desde que corretamente medidos, são preferíveis frente aos secundários por retratar de forma mais fiel à realidade do modelo estudado.

Na maioria dos casos os dados primários estão indisponíveis, ou simplesmente inexistem; dessa forma, uma mescla entre dados primários e secundários são adotados. Em estudos de ACV, comumente recorre-se ao uso de bancos de dados internacionais embutidos nos *softwares* de apoio a estudos de ACV. No entanto, não se deve utilizar estas fontes sem antes fazer uma análise crítica, uma vez que as coberturas geográfica, temporal e tecnológica podem não representar a realidade a qual se pretende modelar (SILVA; KULAY, 2007).

Ainda nesta questão sobre a utilização de dados primários ou secundários, Guinée et al. (2001) definem *foreground processes* como aqueles processos nos quais dados primários coletados no local da produção são utilizados. Por outro lado, *background processes* são os processos nos quais dados mais genéricos são usados. Curran (2006) coloca que o *foreground* refere-se à parte do sistema de produto de maior interesse no estudo e o *background* se liga ao *foreground* por meio de dados agregados nos quais plantas e processos individuais às vezes não são identificados. Para Comissão Européia (2010), os processos *background* não estão sob controle direto ou influência do produtor e, na impossibilidade de coletar estes dados primários, admite-se que existe certa homogeneidade do mercado e, portanto, dados médios são utilizados.

A coleta de dados geralmente é feita com o uso de planilhas ou formulários cujo objetivo é orientar o fornecedor dos dados com relação às informações requeridas para o estudo. Este formulário deve conter todos os aspectos ambientais relacionados a um processo elementar, ou seja, as entradas e saídas de matéria e energia e os produtos e coprodutos. Informações sobre as fontes dos dados (medido, calculado ou estimado) e sobre os requisitos de qualidade dos dados também devem constar nos formulários.

A elaboração do formulário cabe ao executante da ACV e as informações nele solicitadas devem ser claras (e explicativas) a ponto de não deixar dúvidas para o

fornecedor dos dados. O uso de planilhas eletrônicas facilita a documentação dos dados e agiliza a troca de informações entre as equipes envolvidas.

Ainda dentro do tema coleta de dados, existe um debate sobre a inclusão de dados relativos a bens de capital e mão-de-obra. Bens de capital se referem à infraestrutura necessária para a operação das unidades produtivas, tais como: as plantas industriais, maquinários, veículos de carga, estradas e rodovias, etc. Pelo conceito de ciclo de vida, os aspectos ambientais da construção destes elementos deveriam ser considerados. Nas ACV atribucionais – conceito explicado no item 3.4.4.6 –, normalmente não são incluídos nos inventários em função da questão viabilidade *versus* precisão e em razão das suas baixas influências nos resultados (possuem vida útil longa e a parcela da carga ambiental referente à UF se torna insignificante), constatação esta feita em estudos mais antigos. No caso das ACV consequenciais – também explicado no item 3.4.4.6 –, os processos afetados pela tomada de decisão, e que necessitam investimentos em bens de capital, devem ser considerados (BAUMANN; TILLMAN, 2004 e CURRAN, 2006).

Discussão similar ocorre sobre a inclusão de aspectos ambientais das atividades regulares dos trabalhadores. A rigor, cargas ambientais associadas às ações rotineiras dos trabalhadores, tais como: locomoção para o trabalho; e geração resíduos alimentares nas refeições e efluentes domésticos deveriam ser incluídas. A mesma fundamentação adotada no trato dos bens de capital se aplica no caso da mão-de-obra (BAUMANN; TILLMAN, 2004; CURRAN, 2006).

#### **3.4.4.2.2 Tratamento dos dados**

O processo de coleta de dados geralmente gera um conjunto enorme de informações que estão na forma bruta. Estes dados brutos ainda não estão prontos para compor o ICV, cabendo então ao executor da ACV verificar se os requisitos de qualidade foram atendidos, aplicar balanços de massa, etc., e depois, correlacionar os dados validados à unidade funcional (ou fluxo de referência). Esta etapa do estudo de ACV é conhecida como tratamento dos dados.

A validação é um procedimento realizado com o intuito de verificar se não existem inconsistências nos dados coletados, tanto no que diz respeito à representatividade

dos mesmos de acordo com os requisitos de qualidade definidos no escopo quanto em relação aos valores numéricos.

Diversos processos elementares estão conectados entre si; em geral, a saída de um processo é a entrada de outro. Logo, é preciso correlacionar todos os aspectos ambientais do sistema de produto ao produto em estudo, ou seja, o fluxo de referência. Tal procedimento de ajuste dos dados ao fluxo de referência é chamado por Silva e Kulay (2007) de *redução a uma base comum*.

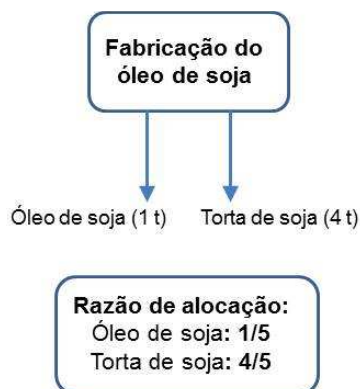
Durante esta etapa de correlação ao fluxo de referência pode ser identificada a presença dos chamados processos multifuncionais, que são aqueles em que há a saída de mais de um produto. As saídas que não são de interesse para o estudo (coprodutos) abandonam as fronteiras do sistema em direção a outros sistemas de produto. Se um produto deixa de pertencer ao ciclo de vida de um sistema em estudo, não seria justo que ele carregasse consigo as cargas ambientais que lhe cabem. Na ACV, o trato deste impasse é conhecido como alocação.

Na verdade, a alocação não ocorre apenas nos casos de saídas múltiplas em um processo elementar. Segundo Baumann e Tillman (2004), a alocação é encontrada em três situações:

- ✓ Quando em um processo elementar ocorrem múltiplas saídas;
- ✓ Quando em um processo elementar ocorrem múltiplas entradas. Esta situação da alocação ocorre, por exemplo, no aterro sanitário; neste local ocorre não apenas a entrada do produto de estudo, mas também de outros materiais para tratamento. Os consumos e liberações que ocorrem na operação deste processo devem ser alocadas entre as diferentes entradas; e
- ✓ Quando um produto após esgotar a sua função original é reciclado em outro sistema de produto, ao invés de seguir para a sua disposição final. Esta situação é conhecida como reciclo aberto.

A realização da alocação envolve o uso de critérios que refletem o peso de cada uma das saídas, segundo alguma relação entre elas. Os critérios comumente utilizados em estudos de ACV são: massa, energia ou valor econômico.

A alocação por critério de massa leva em consideração a contribuição, em massa, de cada uma das saídas (ou entradas) do processo multifuncional. Como exemplo, ilustra-se a situação da Figura 19, que aborda os produtos do processo de fabricação de óleo de soja.



**Figura 19 – Exemplo da aplicação do critério de alocação por massa**

Fonte: Silva e Kulay (2007).

No processo de fabricação do óleo de soja são geradas 1 t de óleo e 4 t de torta de soja. Aplicando o critério de massa, tem-se uma saída total de 5 t, o que implica que 1/5 da massa total é óleo; os 4/5 restantes, torta. Por esta razão de alocação, toda a carga ambiental dos processos elementares anteriores à fabricação do óleo de soja seria dividida entre o óleo e a torta, na proporção dada pela razão de alocação.

A alocação por critério de energia segue a mesma linha de raciocínio do critério mássico, porém se adequa melhor no caso de produtos de caráter energético. Dessa forma, os produtos são medidos pelo seu conteúdo de energia.

O terceiro critério para se realizar a alocação fundamenta-se no valor econômico dos produtos. Utilizando o mesmo exemplo do óleo de soja, a alocação por critério econômico requer que sejam levantados preços de mercado dos produtos para que se possa estabelecer a razão de alocação, conforme exemplifica a Figura 20.



**Figura 20 - Exemplo da aplicação do critério econômico de alocação**

Fonte: Silva e Kulay (2007).

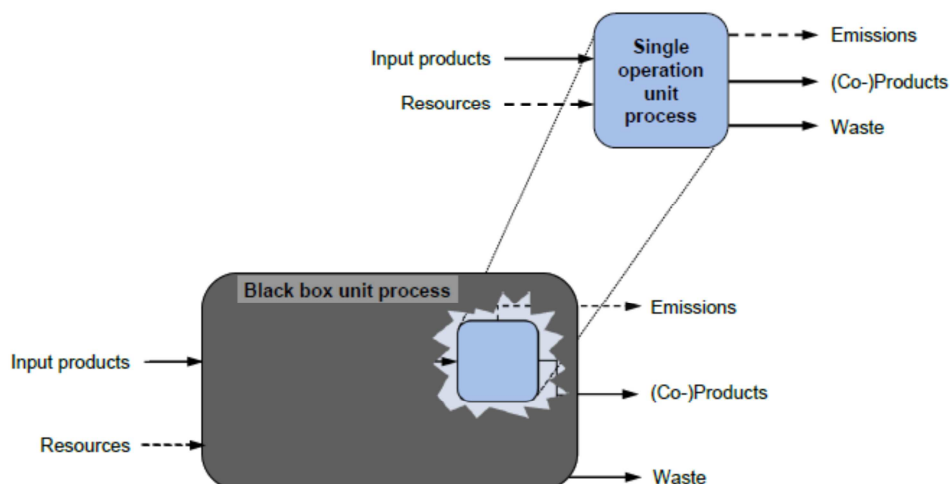
Neste exemplo do óleo de soja, percebe-se que a aplicação do critério econômico no traz um maior equilíbrio na repartição da carga ambiental entre os produtos; ao óleo de soja são associados 20% dos impactos ambientais no caso da alocação; pelo critério econômico, este valor se eleva a 43% da carga total.

Conforme anteriormente apresentado na discussão dos itens de escopo, ABNT (2009b) informa que quando a alocação for necessária, deve-se dar prioridade ao uso de critérios físico (massa ou energia) e, na impossibilidade da utilização destes, pode se recorrer à alocação por critério econômico. A razão disto é que o desempenho ambiental do produto, quando utilizado critério econômico de alocação, fica dependente das constantes flutuações nos valores de mercado, enquanto que uma relação física é característica do produto e independe da economia (SILVA; KULAY, 2007).

No entanto, a mesma norma recomenda ainda que, sempre que possível, a alocação seja evitada. Nas situações em que se objetiva a não realização da alocação, a multifuncionalidade deve ser resolvida por meio da divisão do processo elementar em dois ou mais processos, procedimento aqui chamado de “*subdivisão*”, ou pela expansão do sistema de produto de modo a incluir a função adicional relacionado ao coproduto, procedimento aqui chamado de “*expansão do sistema*” (COMISSÃO EUROPÉIA, 2010).

A decisão de se fazer, ou evitar, a alocação é uma das questões que definem o uso das abordagens atribucional e consequencial (LUND ET AL., 2010). Em ACV atribucional, a alocação é tratada por meio da subdivisão ou aplicação de critérios de alocação; nos estudos com abordagem consequencial a multifuncionalidade é evitada pela expansão do sistema.

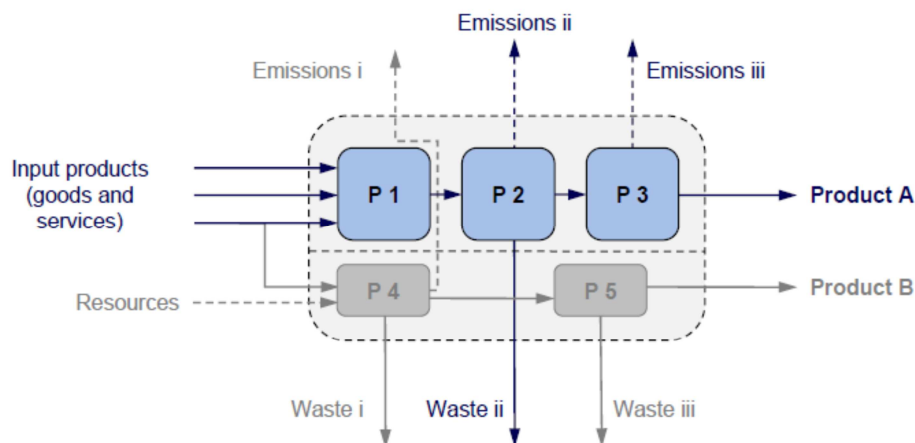
A subdivisão é viável nos casos onde a multifuncionalidade ocorre em processos do tipo “caixa-preta” (agregação de uma sequência de processos elementares em um único processo elementar), conforme ilustra a Figura 21.



**Figura 21 – Exemplo de processo “caixa-preta”**

Fonte: Comissão Européia, 2010.

A subdivisão se refere à coleta dos dados associados apenas aos processos elementares contidos na caixa-preta que interessam ao sistema de produto em estudo. Os aspectos ambientais relacionados aos processos elementares que não pertencem ao sistema de produto não são incluídos no inventário. A Figura 22 ilustra um exemplo da subdivisão para o trato da multifuncionalidade.



**Figura 22 – Tratamento da multifuncionalidade por meio da subdivisão**

Fonte: Comissão Européia, 2010.

Pelo exemplo da Figura 22, apenas os processos P1, P2 e P3 interessam para o estudo (Produto A); dessa forma, as entradas (*input products*), emissões ii, emissões iii e resíduo ii devem ser coletados. Os recursos (*resources*), emissões i, resíduo i e resíduo iii, associados ao produto B não precisam ser quantificados.

Para Comissão Européia (2010), a subdivisão é o meio correto e exato de resolver o problema da alocação, porém só é viável se for possível a divisão do processo

caixa-preta em outros processos elementares. Ainda de acordo com Comissão Europeia (2010), a expansão do sistema é a outra alternativa para se evitar a alocação; de forma geral, consiste em adicionar um função não provida pelo sistema (expansão no sentido literal) ou subtrair uma função não requerida, substituindo-a por uma semelhante (substituição pela expansão do sistema).

Na expansão do sistema, primeiramente identifica-se o coproduto de interesse do processo multifuncional para, na sequência, serem identificados meios de produção alternativos. Se um processo elementar necessariamente gera os produtos A e B, e apenas o A é de interesse para o estudo, a expansão do sistema se dará pela busca de um sistema alternativa que contemple tão somente o produto B como saída; identificado este sistema alternativo, o mesmo é incorporado às fronteiras do estudo. Curran; Mann e Norris (2005) colocam que os produtos que substituem o coproduto são definidos como os produtos específicos mais prováveis para participarem do mercado se a demanda aumenta ou diminui. Os impactos ambientais causados pelo fornecimento destes produtos são quantificados e, posteriormente, substituídos do total de impactos ambientais causados pelo processo multifuncional.

A substituição, algebricamente falando, consiste em subtrair os aspectos ambientais associados ao ciclo de vida do produto específico do total de aspectos ambientais do ICV do sistema original, que contém o processo onde é gerado o coproduto. Assim, a carga ambiental total do processo multifuncional continua no sistema – não há alocação para o coproduto –, porém há um “desconto” da carga que vem junto com o produto substituinte.

Concluída a redução dos dados a uma base comum (o fluxo de referência), incluindo a execução da alocação, ou expansão do sistema, quando necessária, os aspectos ambientais podem ser apresentados, por processos elementares, em uma tabela, a qual Kulay (2008) chama de *tabela de valores consolidados*. A construção desta tabela de valores consolidados encerra a fase de Análise de inventário e o produto gerado é chamado de Inventário de Ciclo de Vida (ICV).

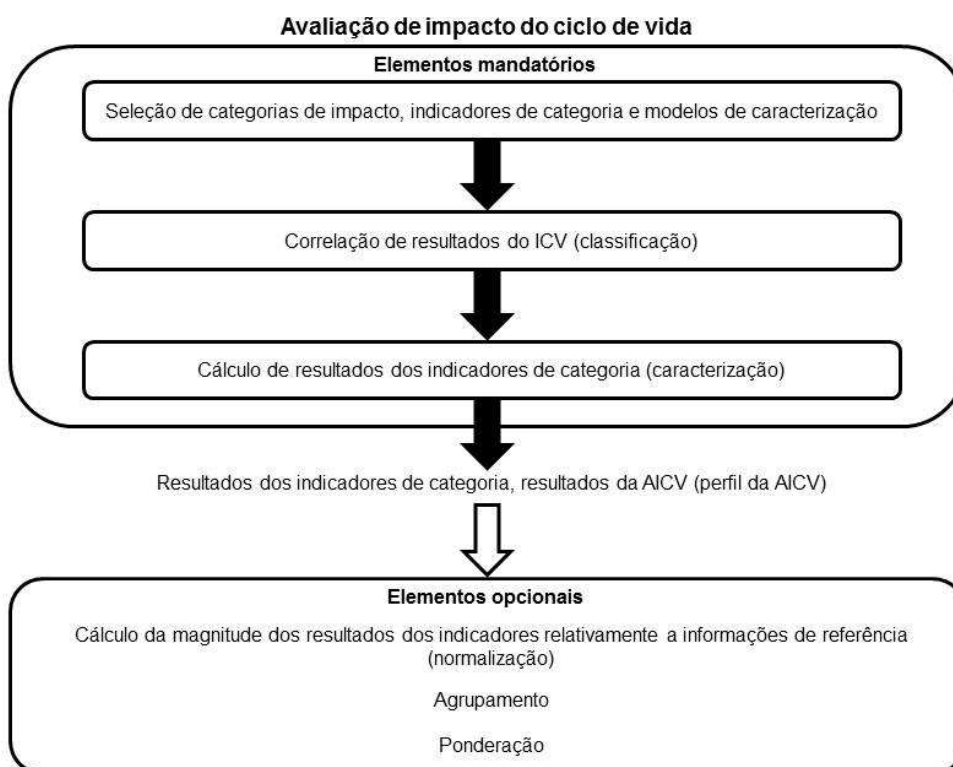
De posse dos resultados do ICV segue-se para a próxima fase do estudo de ACV, que é a Avaliação de impacto. Caso um estudo não contemple a Avaliação de impacto, este é um estudo de ICV e não de ACV (ABNT, 2009a).

#### **3.4.4.3 Avaliação de Impacto**

A terceira fase de um estudo de ACV é chamada de Avaliação de impacto. Nesta, os aspectos ambientais coletados e tratados do ICV são relacionados aos seus respectivos impactos ambientais. Baumann e Tillman (2004) entendem que a apresentação dos resultados na forma de impactos ambientais, ao invés de aspectos ambientais, leva a uma maior compreensão da questão ambiental, bem como facilita a comunicação.

A Avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) na ACV é feita com a descrição de impactos ambientais potenciais, uma vez que estes não são específicos no tempo e no espaço, e são relacionados à unidade funcional (GUINÉE ET AL., 2001). Schenck (2000) completa o raciocínio reportando que a quantificação dos impactos ambientais por meio de indicadores de categoria não é uma medida real dos efeitos ambientais; mas sim, trata-se da medida de algo que a maioria dos cientistas acredita ser correlata com os efeitos reais; ou seja, é uma simplificação do mundo real.

A AICV é composta por elementos mandatórios e opcionais, como mostra a Figura 23. Os últimos são assim classificados em função do uso de valores e subjetividade para seu cumprimento.



**Figura 23 – Elementos da fase de AICV**  
Fonte: ABNT, 2009a.



#### **3.4.4.3.1 Seleção de categorias de impacto, indicadores de categoria e modelos de caracterização**

A associação dos dados do ICV aos impactos potenciais do ciclo de vida de um produto requer que sejam determinadas as categorias de impactos ambientais a serem avaliadas. Entende-se por categorias de impacto ambiental os diferentes efeitos que as ações antrópicas causam no meio ambiente e na saúde humana, podendo ser exemplificadas: mudança climática; eutrofização; acidificação; depleção da camada de ozônio; toxicidade humana; uso do solo; entre outras (SILVA; KULAY, 2007; COMISSÃO EUROPÉIA, 2010).

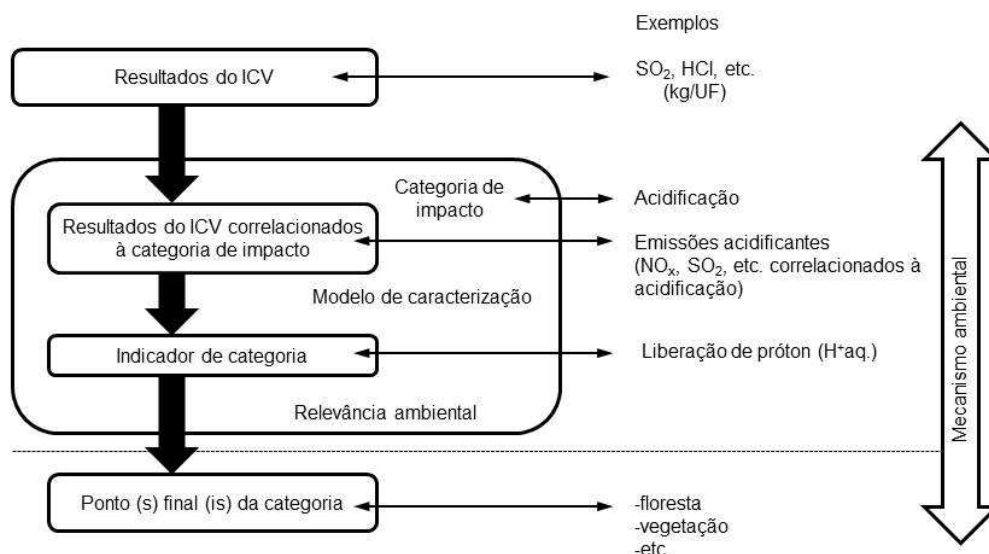
A seleção das categorias de impacto deve estar alinhada com o objetivo do estudo, e a documentação da lista das categorias deve ser feita na definição de escopo.

Em relação às categorias de impacto, cabe uma discussão a respeito da questão do uso do solo na avaliação de impactos ambientais, assunto este que ainda não apresenta um consenso na comunidade científica de ACV.

Primeiramente, o mesmo termo, uso do solo, é duplamente utilizado como aspecto e categoria de impacto ambiental, o que se configura em uma primeira divergência em termos de terminologia. Acontece que a discussão vai além da simples diferença de termos; Baumann e Tillman (2004) questionam se o solo é parte da natureza ou um sistema técnico de produção, ou até mesmo ambos, o que corrobora a dificuldade em descrever efeitos no uso da terra na avaliação de impacto.

Os efeitos da modificação do uso solo é um dos debates mais incisivos que vêm ocorrendo dentre os especialistas de ACV. No atual estágio da metodologia não existe um modelo amplamente aceito para sua modelagem, mas diversas proposições têm sido oferecidas para discussão (MATTSSON ET AL., 2000; LINDEIJER, 2000; DUBREUIL ET AL., 2007; KOELLNER; SCHOLZ, 2007; SCHMIDT, 2008; KØLVERPRIS ET AL., 2008).

O indicador de categoria representa uma medida comum na qual os diferentes aspectos ambientais de uma determinada categoria de impacto são relacionados. A Figura 24 ilustra este conceito via exemplo da categoria acidificação.



**Figura 24 – Conceito de indicador de categoria**

Fonte: ABNT NBR ISO 14040, 2009.

Pela Figura 24, o indicador de categoria da categoria de impacto acidificação é dada pela quantidade de H<sup>+</sup><sub>aq</sub> liberado por cada uma das emissões acidificantes (SO<sub>2</sub>, HCl, etc.) que contribuem para este impacto ambiental.

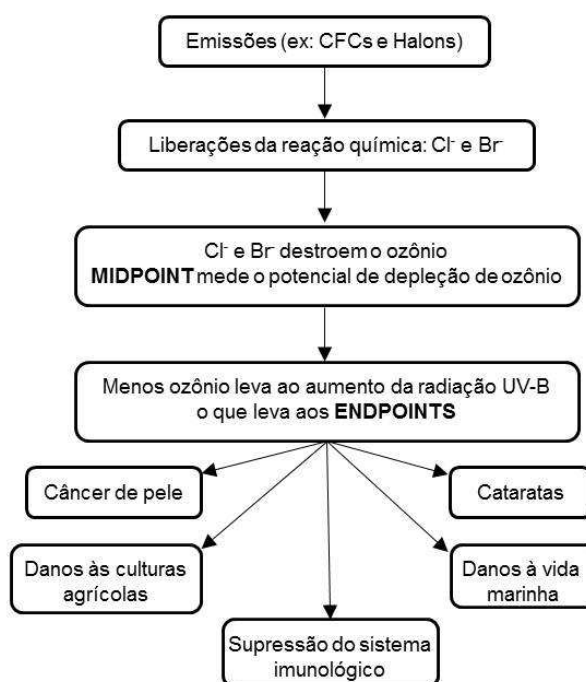
O modelo de caracterização para determinada categoria de impacto define como os diversos aspectos ambientais contribuem, e com qual grau de intensidade, para o efeito em análise. No caso da categoria Mudanças climáticas, o modelo que é consenso mundial para a relação entre as emissões de GEE e o aumento da temperatura do planeta é determinado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) (IPCC, 2012).

Ainda nesta etapa inicial da Avaliação de impacto é preciso haver uma definição sobre até que profundidade os impactos ambientais devem ser avaliados: *midpoint* ou *endpoint*.

A modelagem do tipo *midpoint* leva em consideração os efeitos *primários* provocados sobre o meio ambiente e o ser humano. Isto implica que os impactos ambientais são avaliados apenas até certo ponto intermediário da cadeia de causa e efeito (KULAY, 2008). Diante das grandes dificuldades em se incorporar todos os efeitos de uma determinada categoria de impacto, a modelagem através de *midpoints* reduz a complexidade da avaliação.

Por outro lado, a modelagem do tipo *endpoint* vai mais a fundo, prestando-se a avaliar os efeitos  *finais* da cadeia de causa e efeito sobre o meio ambiente e a saúde humana. Para Benoît e Mazijn (2009), a avaliação por meio de *endpoints* visa

representar os danos ambientais sobre uma Área de Proteção (Saúde Humana, Ecossistemas e Recursos Naturais), ao passo que com o uso de *midpoints* os problemas ambientais investigados se situam em algum lugar entre o inventário e o ponto final das Áreas de Proteção. A Figura 25 ilustra a diferença no uso destas duas modelagens, adotando a categoria depleção da camada de ozônio como exemplo.



**Figura 25 – Exemplo das modelagens *midpoint* e *endpoint* aplicadas para a categoria de impacto depleção da camada de ozônio**

Fonte: Curran, 2006.

Na Tabela 7 apresenta-se uma lista de categorias de impacto comumente utilizadas em estudos de ACV, com seus respectivos efeitos *midpoint* e *endpoint*.

Tabela 7 – Exemplos de categorias de impacto segundo as modelagens *midpoint* e *endpoint*

Categoria de Impacto	Definição	Causa	Midpoint	Endpoint
Potencial de Aquecimento Global (PAG)	Retenção de parte da radiação infra-vermelha refletida pela Terra devido à presença de determinados gases na atmosfera.	Emissão para a atmosfera de gases de efeito estufa (GEE) tais como: CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O e halocarbonos.	Aumento da temperatura média global de maneira desproporcionada.	Derretimento das calotas polares, perda da umidade do solo, estações prolongadas, alteração nos padrões de ventos e oceanos.
Potencial de Depleção da Camada de Ozônio (PDCO)	Destruição da camada de gás ozônio (O <sub>3</sub> ) existente na estratosfera que responde por filtrar grande parte da radiação ultravioleta (UV) de baixo comprimento de onda que é proveniente do Sol.	Emissão de halocarbonos das famílias dos CFCs, HCFCs e de alguns HFCs.	Redução da camada de ozônio que que leva ao aumento da radiação ultravioleta na superfície terrestre.	Efeitos sobre a saúde humana tais como câncer de pele do tipo <i>melanoma maligno</i> e catarata, bem como sobre seres vivos que atuam como produtores primários na cadeia alimentar ( <i>fitoplâncton</i> ).
Potencial de Formação Fotoquímica de Ozônio (PFFO)	Formação do gás ozônio nas camadas mais baixas da troposfera.	Reação de compostos do tipo hidrocarboneto com radicais hidroxila em presença de luz solar, que provocam a redução do NO <sub>2</sub> para NO da qual será liberado oxigênio atômico (O) para reagir com O <sub>2</sub> e formar O <sub>3</sub> .	Aumento das concentrações locais de O <sub>3</sub> no ar, degradando sua qualidade.	Ocorrência de smogs, diminuição da visibilidade, irritação dos olhos, doenças respiratórias e prejuízos para a vegetação
Potencial de Acidificação (PAc)	Redução no índice de acidez das precipitações abaixo de pH=5.	Emissão de compostos gasosos de caráter ácido no ambiente via: queima de combustíveis fósseis com enxofre, produção de metais a partir de minérios com sulfetos metálicos, produção de papel, refino de petróleo, entre outros processos que liberem SO <sub>x</sub> e NO <sub>x</sub> .	Ocorrência de precipitações com baixo índice de pH.	Corrosão de edifícios e patrimônios históricos, alteração das condições aquáticas, vegetais e do solo.

Potencial de Eutrofização (Peu)	Enriquecimento em corpos d'água e no solo e nitrogênio (N) e fósforo (P).	Presença em excesso, devido ao lançamento em corpos hídricos de substâncias contendo N e P.	Em lagos e águas costeiras, leva ao aumento excessivo da quantidade de algas, que por sua vez, acarreta a diminuição da luz solar incidente na parte submersa do ecossistema e aumento do teor de matéria orgânica a degradar (consumindo e reduzindo a disponibilidade de O <sub>2</sub> ).	Morte de peixes e outros animais aquáticos, reduzindo assim a diversidade biológica.
Potencial de Ecotoxicidade Aquática (PEA)	Quantidade de determinada substancia capaz de contaminar 1 m <sup>3</sup> de água até limites impróprios.	Disposição na hidrosfera de materiais com elevado potencial de contaminação.	Bioacumulação e biomagnificação.	Redução de plantas aquáticas e da pesca comercial e recreacional.
Potencial de Ecotoxicidade Terrestre (PET)	Quantidade de determinada substancia capaz de contaminar 1 m <sup>3</sup> de terra até limites impróprios.	Disposição na litosfera de materiais com elevado potencial de contaminação.	Bioacumulação.	Redução da produção agrícola, biodiversidade e animais selvagens.
Potencial de Toxicidade Humana (PTH)	Quantidade de determinada substancia capaz de contaminar 1 kg de massa corpórea até limites impróprios.	Exposição da população a substâncias tóxicas por tempo e em quantidades suficientes para provocar contaminação.	Intoxicação em diferentes graus de abrangência.	Aumento de morbidade e mortalidade.
Depleção de Recursos Materiais e Energéticos (DRME)	Redução do patrimônio global de recursos materiais e energéticos.	Consumo desbalanceado do recurso em velocidade superior à de reposição.	Escassez do recurso abiótico material ou energético.	Indisponibilidade dos recursos para as futuras gerações.

Fonte: Modificado de Kulay (2008) e Curran (2006).

Atualmente, o uso de *softwares* especializados em ACV é algo recorrente em estudos desta natureza. Estes em geral trazem embutidos diferentes métodos para a execução da avaliação de impacto. Cabe ao executor um olhar crítico sobre as diferenças entre os métodos, bem como a decisão sobre qual deles melhor se aplica ao estudo, segundo a definição de objetivo e escopo.

#### **3.4.4.3.2 Classificação**

A etapa de classificação consiste em correlacionar os dados de entrada e saída do ICV às categorias de impacto selecionadas. Trata-se de um procedimento puramente qualitativo, cujo objetivo é associar cada qual do aspecto ambiental ao seu respectivo impacto ambiental potencial.

Um determinado aspecto ambiental pode contribuir para uma ou mais categorias de impacto. Nestes casos, deve-se adotar uma das seguintes possibilidades (ABNT, 2009b):

- ✓ Distribuir uma porção do aspecto para cada categoria de impacto que ele contribui. Por exemplo, o total de SO<sub>2</sub> é distribuído entre as categorias saúde humana e acidificação. Curran (2006) coloca que esta opção é tipicamente usada em casos onde os efeitos são dependentes entre si; e
- ✓ Atribuir toda a porção do aspecto para cada uma das categorias de impacto que ele contribui. Por exemplo, o NO<sub>x</sub> é integralmente relacionado tanto para a formação de ozônio troposférico quanto para a acidificação. Esta situação é típica dos casos onde os efeitos são independentes entre si (CURRAN, 2006).

#### **3.4.4.3.3 Caracterização**

A caracterização sucede a classificação, e diferentemente da natureza quantitativa da etapa anterior, se trata de um procedimento quantitativo que converte os aspectos ambientais de cada categoria de impacto em uma base, que representa a referida categoria (SILVA; KULAY, 2007).

Esta unidade comum é chamada de *substância de referência*; todos os demais dados devem ser expressos em função da sua contribuição (magnitude) em relação

à substância de referência, para a categoria analisada. Exemplos de substâncias de referência são o CO<sub>2</sub> e o CFC-11, que representam as categorias Mudança Climática e Depleção da Camada de Ozônio, respectivamente.

A conversão de cada aspecto ambiental na sua respectiva substância de referência exige o uso de fatores de caracterização (também chamados de fatores de equivalência), que são definidos por meio de modelos científicos. Nota-se então que a precisão e confiabilidade nos resultados de um estudo de ACV também estão diretamente ligadas aos fatores de caracterização adotados dos modelos científicos. A substância referência em cada categoria de impacto tem contribuição unitária, e os respectivos fatores de caracterização das outras substâncias podem ser iguais, menores ou maiores que um.

A utilização de fatores de equivalência permite que os diferentes aspectos ambientais de uma dada categoria de impacto sejam convertidos para unidade equivalente, fato que possibilita a soma de todas estas contribuições e gera um total para a categoria. ABNT (2009b) chama este total de *Resultado do indicador de categoria*. A Tabela 8 associa exemplos de categorias de impacto e seus respectivos resultados do indicador de categoria.

**Tabela 8 – Exemplos de categorias de impacto e respectivos resultados do indicador de categoria**

<b>Categoria de Impacto</b>	<b>Resultado do indicador de categoria</b>
Depleção da Camada de Ozônio	kg de CFC-11 eq./UF
Mudança Climática	kg de CO <sub>2</sub> eq./UF
Acidificação	kg de SO <sub>2</sub> eq./UF
Eutrofização	kg de PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq. UF
Formação Fotoquímica de Ozônio	kg de C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq./UF
Toxicidade Humana	kg de 1,4-DB eq./UF
Ecotoxicidade Aquática	kg de 1,4-DB eq./UF
Ecotoxicidade Terrestre	kg de 1,4-DB eq./UF

Fonte: Silva e Kulay (2007).

Cabe observar a partir da Tabela 8 que os resultados dos indicadores de categoria devem expressar os valores totais dos impactos ambientais em relação à unidade funcional estabelecida no escopo do estudo.

Silva e Kulay (2007) denominam *Perfil Ambiental* ao conjunto de resultados dos indicadores de categoria; a determinação deste perfil encerra os elementos obrigatórios da fase de AICV.

#### **3.4.4.3.4 Normalização**

O primeiro elemento opcional da AICV é a normalização, que consiste em converter os resultados da caracterização (com diferentes unidades de medida) para uma mesma base de comparação. Ou seja, todas as categorias de impacto após a normalização passam a ter uma mesma unidade, o que permite a comparação entre as diferentes categorias do perfil.

A normalização é realizada pela divisão do resultado do indicador de categoria por um valor de referência – chamado de fator de normalização. Curran (2006) cita exemplos de valores de referência a serem usados na normalização:

- ✓ As liberações, ou consumos totais, para uma dada área, sejam eles de amplitude global, regional ou local;
- ✓ As liberações, ou consumos totais, para uma dada área em uma base per capita;
- ✓ A razão entre o valor de uma alternativa e a outra (válido para estudos comparativos); e
- ✓ O maior valor entre todas as alternativas (também válido somente para estudos comparativos).

O sucesso da normalização, especialmente em estudos de ACV de um único produto, está atrelado à disponibilidade de fatores de normalização confiáveis, que reflitam (ou se aproximam ao máximo) do real consumo, ou liberações, que se propuseram a medir.

A dificuldade em se obter valores confiáveis é a razão da normalização ser um elemento opcional da AICV, uma vez que o uso de fatores de normalização que não refletem a realidade investigada pode alterar significativamente os resultados do estudo. Porém, a norma deixa a critério do executor a decisão de realizar a normalização e, caso decida-se por sua inclusão, é fundamental que no relatório consolidado do estudo constem os fatores de normalização utilizados, com suas respectivas fontes bibliográficas.

#### **3.4.4.3.5 Ponderação**



A Ponderação é o último elemento opcional da fase de AICV e consiste em atribuir pesos – nomeados de fatores de ponderação – para as diferentes categorias, com base na percepção ou entendimento de determinado grupo (SILVA; KULAY, 2007).

As categorias de impacto normalizadas podem ter diferentes importâncias relativas, dependendo da visão do indivíduo, organização ou sociedade. Logo, para um determinado público, o principal problema ambiental pode ser a Mudança Climática, e pouco importar a questão da Acidificação. Por outro lado, para aquele que sofre as consequências diretas da Acidificação, este impacto ambiental seria prioritário.

Nesta etapa são utilizados fatores de ponderação (números adimensionais) que hierarquizam as categorias de impacto. Estes fatores são multiplicados pelos resultados normalizados. Cada categoria passa a ter um resultado normalizado e ponderado, e ao somarem-se todas elas é possível obter o *Single Score* (Indicador Único) de desempenho ambiental.

Para o tomador de decisão, que geralmente conhece de forma superficial a metodologia de ACV, é mais simples avaliar e escolher alternativas, ou ações a serem tomadas, com base em um único número.

Dada novamente a questão da escolha de valores, a ponderação não é obrigatória em um estudo de ACV, apesar de ser muitas vezes utilizada. Assim como para a normalização, no caso da sua adoção é recomendado que sejam documentados como foram estabelecidos os fatores de ponderação.

#### **3.4.4.4 Interpretação**

Uma vez realizada a AICV, os resultados de um estudo são gerados, tanto no que se refere aos dados de inventário quanto aos impactos ambientais potenciais associados ao ciclo de vida do produto.

Estes resultados e todas as escolhas e premissas adotadas ao longo do estudo devem então ser interpretados, levando em consideração a definição de objetivo e escopo. Esta fase de análise dos dados, resultados e a forma como os resultados foram gerados é chamada de Interpretação.

Segundo ABNT (2009a), as constatações da Interpretação devem incluir conclusões, explicar limitações e prover recomendações, que podem ser muito úteis aos tomadores de decisão.

Vale destacar que a Interpretação não deve ser feita somente após a conclusão das fases de Análise de inventário e Avaliação de impacto; dado o caráter iterativo da ACV, alguma limitação identificada nestas fases pode requerer a revisão do objetivo e escopo inicialmente estabelecidos.

Para a avaliação dos elementos constituintes de um estudo de ACV, algumas técnicas são utilizadas, das quais ABNT (2009b) explicita três:

1. *Verificação de completeza*: checa se todas as informações e dados relevantes foram coletados. Também está dentro da completeza a verificação se o método de Avaliação de Impacto cobre todos os aspectos ambientais do ICV;
2. *Verificação de sensibilidade*: avalia a confiabilidade dos resultados finais determinando de que forma eles são afetados por incertezas nos dados, métodos de alocação ou cálculo dos resultados dos indicadores de categoria. A verificação de sensibilidade é feita por meio da variação no valor de um dado (o qual não se tem uma confiança muito grande ou que foi escolhido segundo uma opção metodológica) e posterior análise quanto a se esta variação leva a uma significativa alteração no resultado. Esta verificação busca identificar os dados críticos do estudo, que pode acarretar na necessidade de uma nova coleta dos dados a fim alcançar maiores níveis de precisão para a ACV. A verificação da sensibilidade também pode ser utilizada para a exclusão de estágios do ciclo de vida, processos elementares, ou entradas e saídas que se mostrarem não significativas para os resultados do estudo; e
3. *Verificação de consistência*: determina se as premissas, métodos e dados são consistentes com o objetivo e escopo. A consistência do estudo será constatada caso sejam respeitadas as definições do escopo, como por exemplo: fronteiras do sistema, coberturas temporal, tecnológica, método de alocação ou alternativa para evitá-la, modelo de avaliação de impacto cientificamente válido, entre outros aspectos.

Guinée et al. (2001) afirmam que se durante as verificações de completeza e consistência forem identificadas pontos relevantes para o estudo, deve-se adotar o seguinte procedimento:

- a) Justificá-las, se forem justificáveis;
- b) Avaliar sua validade e influência;

- c) Se possível e necessário, voltar nas etapas anteriores para adaptar o estudo com a remoção destas inconsistências; e
- d) Reportar as inconsistências juntamente com os resultados do estudo.

Outra verificação que é de muita valia em estudos de ACV, mas que não está diretamente explicitada na norma é a análise de contribuição (ou dominância). Esta pode ser feita em nível de fluxo, processo elementar ou etapa do ciclo de vida. Com esta análise é possível identificar, por exemplo, a participação relativa, em termos de desempenho ambiental, de uma dada etapa em relação ao ciclo de vida do produto. Análises de contribuição se configuram em um importante instrumento no processo de tomada de decisões, por meio da identificação as oportunidades de melhoria, ficando a cargo do tomador de decisão onde atuar.

Ainda como uma ferramenta passível de ser utilizada na Interpretação, e que tem por objetivo avaliar qualitativamente o nível de incerteza dos dados coletados, tem-se a chamada *Matriz de Pedigree*. Segundo Frischknecht e Jungbluth (2007), em muitos casos a quantidade de um dado de entrada ou saída não pode ter sua incerteza avaliada porque há apenas uma fonte que disponibiliza apenas um valor único, sem que informações sobre a incerteza do mesmo estejam declaradas.

A matriz de pedigree avalia os dados do inventário de acordo com seis características – confiabilidade, completeza, correlação temporal, correlação geográfica, correlação de tecnologia adicional e tamanho da amostra –, onde para cada uma delas é atribuída uma nota de 1 a 5 (o valor 1 representa a melhor qualidade).

Com base nestas notas, fatores de incerteza (indicado por  $U_m$ ) são atribuídos para cada característica. Adicionalmente, um sétimo fator (básico de incerteza) é determinado, com base no tipo de dado – demanda de energia, demanda de insumo, transporte, tipo de emissão para o ar, entre outras – que se pretende avaliar. A descrição de cada característica, além dos valores dos fatores de incerteza e dos fatores básicos de incerteza estão apresentados em Frischknecht e Jungbluth (2007).

Finalmente, o grau de incerteza (indicado por  $SD_{g95}$ ) é calculado pela Equação 1:

$$SD_{g95} = \exp^{\sqrt{[\ln(U_1)]^2 + [\ln(U_2)]^2 + [\ln(U_3)]^2 + [\ln(U_4)]^2 + [\ln(U_5)]^2 + [\ln(U_6)]^2 + [\ln(U_b)]^2}} \quad \text{(Equação 1)}$$

Onde:

- U<sub>1</sub>: fator de incerteza para a confiabilidade;
- U<sub>2</sub>: fator de incerteza para a completeza;
- U<sub>3</sub>: fator de incerteza para a correlação temporal;
- U<sub>4</sub>: fator de incerteza para a correlação geográfica;
- U<sub>5</sub>: fator de incerteza para a correlação de tecnologia adicional; e
- U<sub>6</sub>: fator básico de incerteza.

Cabe destacar que o grau de incerteza do dado reflete a subjetividade do executor, uma vez que a atribuição das notas para as características e a determinação dos fatores básicos de incerteza é realizada com base no julgamento de valor da pessoa.

Todas as ferramentas da fase de Interpretação são fundamentais para avaliar o estudo de ACV, em ambos os méritos quanti e qualitativos, a fim de que se possa ter um diagnóstico consistente da qualidade dos resultados encontrados. As conclusões e recomendações do estudo devem refletir objetivamente os resultados das três fases (Análise de inventário, Avaliação de impacto e Interpretação). Para tanto não devem fugir ao objetivo e escopo, e não serem baseadas em opiniões pessoais, uma vez que estas podem influenciar as futuras tomadas de decisão.

#### **3.4.4.5 Comunicação e Revisão Crítica**

Em estudos de ACV, a norma indica ainda a definição acerca da *Comunicação* e da *Revisão Crítica*.

Na definição do escopo do estudo, um dos itens a serem definidos diz respeito ao tipo e formato do relatório a ser divulgado para o público do estudo. A Comunicação é justamente esta etapa final de um estudo, onde o relatório deve ser elaborado de forma que os dados, métodos, premissas e suposições, limitações e resultados são documentados. Dado que ainda não existe uma metodologia única e universal de ACV, e a mesma ainda envolve o uso da subjetividade, é fundamental que o relatório seja transparente em relação às premissas adotadas, e que todas as informações pertinentes estejam presentes de forma completa, precisa e imparcial.

Por fim, a Revisão crítica é o procedimento no qual um especialista não envolvido com o estudo, interno ou externo, fica encarregado de avaliar a qualidade de execução do estudo (BAUMANN; TILLMAN, 2004):

- ✓ O estudo seguiu às recomendações da norma ISO?
- ✓ As escolhas metodológicas estão alinhadas com o objetivo e escopo?
- ✓ Os dados utilizados são apropriados e refletem a realidade?
- ✓ Os cálculos foram feitos de maneira correta?
- ✓ O método de Avaliação de impacto utilizado tem fundamento científico?
- ✓ Os resultados encontrados permitem que se façam conclusões válidas? As conclusões refletem os resultados?
- ✓ O estudo é transparente a ponto de permitir sua reprodução? Permite ao leitor entender todos os passos e limitações?

A revisão crítica não apresenta nenhum passo novo em relação aos itens necessários para a execução da ACV. Em sua essência, ela direciona a análise para as questões críticas que podem influenciar significativamente os resultados do estudo. A rigor, todas as verificações da revisão crítica podem – e deveriam – ser feitas pelo executante do estudo; a questão é que nesta etapa a análise deve ser conduzida por um especialista que não tomou parte na execução da ACV, podendo assim fazer um julgamento sem ser influenciado pelas decisões já tomadas.

#### **3.4.4.6 Abordagens da ACV**

Atualmente, dentro da comunidade internacional são empregados os termos *atribucional* e *consequencial* para classificar os estudos de ACV. Os mesmos foram utilizados pela primeira vez em um *workshop* realizado em outubro de 2001, na cidade de Cincinnati, EUA, que teve como objetivo a discussão a respeito de dados de Inventário de Ciclo de Vida (ICV) para a produção de eletricidade (CURRAN; MANN; NORRIS, 2005).

A fundamentação original para a introdução destes novos conceitos se baseava no entendimento de alguns especialistas acerca da existência de duas perspectivas diferentes da ACV; uma que tinha um olhar descritivo (*accountancy type* ou *descriptive* na língua inglesa); outra, uma visão prospectiva (também chamada de *effect-oriented* ou *change-oriented* em inglês). A visão descritiva foi nomeada de atribucional; a prospectiva, de consequencial.

Segundo Curran, Mann e Norris (2005), ambas são métodos de modelagem de ICV que respondem a diferentes questões:

- a. Atribucional: “como os fluxos (poluentes, recursos e trocas entre processos) ocorrem dentro de uma determinada janela temporal?”; e
- b. Consequencial: “como os fluxos irão variar em decorrência da tomada de decisões?”.

Por esta diferenciação, entende-se que a ACV atribucional quantifica as entradas e saídas dentro de um sistema de produto, de acordo com a unidade funcional estabelecida. É a modelagem adotada desde os primeiros estudos e, segundo Comissão Européia (2010) ela descreve a cadeia produtiva existente; para tanto, utiliza dados mensuráveis de uma série histórica. Por outro lado, a ACV consequencial é uma nova abordagem em que se busca estimar (ou prever) como as entradas e saídas irão se alterar dentro de um sistema de produto por decorrência de uma tomada de decisão que varia o valor da unidade funcional (WEIDEMA; EKVALL; HEIJUNGS, 2009).

Aqui cabe deixar claro que a tomada de decisão é uma ação que pode alterar as condições atuais de mercado, levando ao aumento ou diminuição na demanda do produto em estudo. Mudanças na demanda podem trazer como consequência novos investimentos em diferentes tecnologias e ampliação, ou redução, de unidades produtivas. Este conceito é fundamental na distinção entre estas duas abordagens, uma vez que a modelagem atribucional não leva em consideração as possíveis tomadas de decisão, enquanto que na modelagem consequencial o objetivo central é estimar como se darão as variações por conta da mudança na demanda.

Weidema; Ekvall e Heijungs (2009) definem a modelagem consequencial como uma ligação de processos elementares dentro de um sistema de produto, de forma que os processos estão incluídos no sistema a ponto de serem esperadas mudanças como consequência da variação na demanda do produto. O foco desta modelagem é a identificação dos processos elementares – com seus respectivos dados de entrada e saída – que sofrem mudanças como consequência da tomada de uma decisão.

Na ACV consequencial, os processos elementares que não são afetados pela mudança na demanda não são parte do sistema de produto em estudo, ao contrário da ACV atribucional que leva em consideração todos os processos elementares que contribuem significativamente dentro de um sistema em estudo.

Para se trabalhar com a modelagem consequencial é preciso determinar o tamanho das mudanças, sejam elas pequenas (marginais) ou grandes (incrementais). Uma

mudança é classificada como pequena quando não afeta as tendências no volume de mercado e as restrições nos custos de produção dos produtos e tecnologias envolvidas. As consequências da decisão podem ser assumidas de modo linear em relação ao tamanho da mudança, e tanto o aumento quanto a redução na produção irão afetar os mesmos processos (WEIDEMA; EKVALL; HEIJUNGS, 2009).

Por outro lado, a mudança é grande quando afeta toda a situação de mercado, o que leva à introdução de novos fornecedores, novos mercados, ou até mesmo novos produtos e tecnologias. As consequências não podem ser assumidas como lineares com relação ao aumento ou redução na produção, uma vez que podem afetar de forma não uniforme diferentes processos. Para grandes mudanças, é necessária a consideração da direção da mudança (WEIDEMA; EKVALL; HEIJUNGS, 2009).

Cabe salientar que não existe uma metodologia de ACV consolidada e aceita por todos os praticantes no mundo. Foi dentro deste contexto de debate metodológico que a distinção entre as ACV atribucional e consequential surgiu. Sendo mais específico, Lund et al. (2010) afirmam que os problemas de alocação e escolha de dados fomentaram a consolidação destas duas abordagens, o que significa que existe uma grande conexão entre as modelagens e a questão de como tratar os coprodutos.

A ABNT (2009b) diz que a alocação deve ser, sempre que possível, evitada. Duas maneiras existem para evitar a alocação: subdivisão e a expansão do sistema. A primeira opção é utilizada nos ICV atribucionais, porém conforme apresentado no item 3.4.4.2.2 nem sempre é possível realizar a subdivisão; em razão disto, em muitos casos recorre-se à alocação. Por outro lado, a expansão do sistema é o procedimento típico para eliminar a alocação nos ICV consequenciais.

Como as modelagens atribucional e consequential modelam diferentes sistemas de produto e lidam de maneira distinta com a alocação, a determinação de qual delas adotar no estudo é parte da definição de objetivo do estudo. Para Thomassen et al. (2008), em geral o objetivo da ACV consequential é avaliar as consequências de uma mudança na demanda enquanto na ACV atribucional, o objetivo é avaliar a carga ambiental de um produto.

Dado que esta dissertação tem por objetivo comparar as cargas ambientais entre o biodiesel etílico de soja e o óleo diesel, a modelagem atribucional foi escolhida. Sendo assim, foge ao escopo deste estudo entrar nos detalhes da execução de estudos consequenciais. Um maior conhecimento sobre esta modelagem pode ser

adquirido de Weidema (2003), Weidema; Ekvall e Heijungs (2009), ou de artigos disponibilizados no periódico internacional *The International Journal of Life Cycle Assessment*.

### **3.5 ACV E BIOCOMBUSTÍVEIS**

Neste subcapítulo são reportados estudos que aplicaram o conceito de ciclo de vida – em nível de ICV ou ACV – aos biocombustíveis, particularmente o biodiesel e o etanol. Não se pretende aqui esgotar a matéria no que diz respeito à ACV de biocombustíveis, mas indicar alguns casos desenvolvidos dentro da comunidade científica.

O biodiesel pode ser obtido a partir de diferentes fontes oleaginosas, e nesta discussão deu-se preferência para estudos que foram realizados com o uso do óleo de soja (tema desta dissertação).

Grande número de estudos adota a metodologia de ACV para avaliar a produção (ou uso) do biodiesel de soja, elaboraram o ICV, porém se restringiram a analisar balanços de energia ou emissões atmosféricas – estas últimas na sua grande maioria considerando tão somente os GEE (SMITH ET AL., 2007; REIJNDERS; HUIJBREGTS, 2008; HU ET AL., 2008; HUO ET AL., 2009).

Cabe destacar que dado seu caráter sistêmico, são considerados estudos de ACV apenas aqueles que avaliam diferentes categorias de impacto ambiental, sem limitar a análise para uma ou outra questão ambiental.

Sheehan et al. (1998) também adotaram um recorte mais limitado, mas cabe uma maior discussão sobre este estudo em virtude de ter sido um dos primeiros a adotar o conceito de ciclo de vida para avaliar o desempenho do biodiesel de soja (B100) em comparação ao óleo diesel. Para tanto, foram elaborados os ICV de ambos os combustíveis, com o escopo de aplicação compreendendo etapas de transformação antrópica desde a extração de recursos naturais, até a fase de uso dos combustíveis, neste caso como fornecedores de energia para movimentação de ônibus urbanos nos EUA.

A avaliação não ocorreu em termos de impactos ambientais, mas sim via balanços de energia e de emissões atmosféricas. Como principais resultados obtidos destacaram-se: a) a relação entre a geração de energia de origem renovável e o consumo de energia de origem fóssil para o B100 é de 3,2:1,0 ao passo que este



mesmo quociente para o óleo diesel não vai além de 0,83: 1,00; b) redução ao longo de todo ciclo de vida de 78,5% das emissões para o ar de dióxido de carbono quando da substituição do diesel por B100; c) reduções significantes no mesmo âmbito, também quanto as emissões de material particulado (32%), monóxido de carbono (35%) e óxidos de enxofre (8%) em decorrência da mesma alteração; d) reduções das emissões pontuais nos escapamentos de partículas com dimensão inferior a 10 µm (68%) e de monóxido de carbono (46%); e) aumento nas emissões de óxidos de nitrogênio (13,35%) e hidrocarbonetos (35%), sempre em virtude da substituição do óleo diesel por B100.

Jungbluth (2007) elaboraram o ICV do biodiesel metílico de soja brasileiro como um dos elementos constituintes do banco de dados internacional *Ecoinvent*. Como é característica deste banco de dados, o inventário foi construído com o uso de dados médios para representar a realidade brasileira, não levando em consideração as diferenças no sistema produtivo entre os diversos estados produtores.

Panichelli et al. (2008) avaliaram impactos ambientais associados ao biodiesel metílico de soja para a condição da Argentina. Nesse caso o desempenho ambiental do produto foi medido em termos das seguintes categorias de impacto: Aquecimento Global; Demanda Cumulativa de Energia; Eutrofização; Acidificação; Ecotoxicidades Aquática e Terrestre; Toxicidade humana e Uso do Solo. Os resultados do estudo foram comparados com dados de literatura gerados para condições semelhantes. Concluiu-se a partir disso que as praticas agrícolas exercitadas para efeito do cultivo de soja acabaram por tornar o biodiesel não competitivo do ponto de vista ambiental. Hou et al. (2011) estudaram impactos ambientais causados pela produção e o uso do biodiesel produzido de fontes renováveis – na forma de soja, jatropha e microalga – para o contexto da China. O método de avaliação de impacto adotado para a análise foi o CML 2001, e os perfis ambientais gerados em cada caso foram comparados ao do óleo diesel. A avaliação indicou ganho ambiental significativo do biodiesel de soja em relação ao óleo diesel em termos de Depleção Abiótica, Depleção de Camada de Ozônio, e Aquecimento Global. Para as demais categorias de impacto avaliadas, porém, o biocombustível mostrou pior desempenho.

Em relação a estudos desenvolvidos para a produção de biodiesel de soja no contexto brasileiro, cabe destacar os trabalhos de Mourad (2008) e Cavallet (2008). A primeira autora investigou a cadeia produtiva do B100, desde a produção da soja até o processo de transesterificação (via rota metílica). Por meio de balanços

energéticos, resultados indicaram que o biodiesel apresenta um fator de renovabilidade igual a 3,0, que segundo a autora significa que a cada unidade de energia fóssil consumida, são geradas três unidades de energia de fontes renovável. Cavallet (2008) elaborou o Inventário de Ciclo de Vida (ICV) para produção de biodiesel etílico de soja no Brasil adotando a análise emergética para avaliar a questão ambiental. Com base nos resultados, o autor considerou que a produção de biodiesel de soja não seria uma opção viável para o país. O desempenho desfavorável esteve bastante associado às características do sistema de produção agrícola da soja, que se mostrou intensivo quanto aos consumos de energia e de insumos químicos.

Em relação ao etanol, a maioria dos estudos publicados envolvendo a temática de ciclo de vida também se limita a análises de balanços de energia e de GEE (MACEDO ET AL., 2008; SEABRA ET AL., 2011; GARCÍA ET AL., 2011).

Renouf et al. (2011) realizaram um estudo de ACV dos produtos da cana-de-açúcar – etanol, açúcar, melão e eletricidade – australiana. Utilizando o método de avaliação de impacto *Impact 2002+* com algumas modificações. De acordo com os autores, os resultados do estudo estão diretamente influenciados pela: a) variação na quantidade dos produtos gerados; b) variabilidade no cultivo da cana; e c) a abordagem adotada para tratar a questão da multifuncionalidade. Além disso, os autores indicam que a modelagem deve ser preferencialmente realizada com dados específicos da região produtora de cana-de-açúcar e seus produtos, ao invés do emprego de dados genéricos ou médios.

Com o objetivo de avaliar o desempenho ambiental do uso do etanol hidratado brasileiro, Ometto et al. (2009) desenvolveram um estudo de ACV da cana-de-açúcar e do combustível produzido na região nordeste do estado de São Paulo. Para tanto, o método de avaliação de impacto EDIP foi adotado, e os resultados indicaram que a aplicação de defensivos agrícolas e fertilizantes minerais, queima do canavial pré-colheita e consumo de diesel nas operações agrícolas são os maiores responsáveis pelos impactos ambientais do ciclo de vida do etanol hidratado.

Assim como no caso do biodiesel de soja, Jungbluth (2007) também elaboraram um inventário para representar a produção de etanol no Brasil, como elemento integrante do *Ecoinvent*.

## **4 ESTUDO DE ACV**

### **4.1 DEFINIÇÃO DE OBJETIVO E ESCOPO**

#### **4.1.1 Definição de Objetivo**

Estabeleceu-se como razão para este estudo o desejo de avaliar a variação de desempenho ambiental, trazida pela inserção do biodiesel na matriz de transporte brasileira, segundo uma visão de ciclo de vida. Dessa forma, esta ACV se propõe a comparar os desempenhos ambientais da operação de um ônibus urbano nas condições: a) anterior à obrigatoriedade da mistura do biodiesel ao óleo diesel; e b) atual da comercialização da mistura B5.

Os resultados desta ACV possibilitarão a identificação de oportunidades de melhoria em cada um dos ciclos de vida das alternativas investigadas, fato este que certamente se apresenta como uma valiosa aplicação deste trabalho.

Por ser este um estudo de natureza acadêmica, o público-alvo principal desta dissertação é representado pela comunidade de ACV que necessite utilizar o biodiesel em seus estudos. Espera-se, assim, que o presente trabalho possa contribuir para a construção do banco de dados brasileiro para apoio a estudos de ACV.

Um segundo público-alvo desta ACV pode ser definido como o setor de planejamento energético. Os resultados desta dissertação podem servir de base para a discussão a respeito do mérito ambiental em investir na promoção do biodiesel – em particular do originado a partir da soja – em substituição ao óleo diesel.

#### **4.1.2 Definição de Escopo**

##### **4.1.2.1 Função**

Para avaliar os desempenhos ambientais do óleo diesel e da mistura B5 determinou-se como função: *transferir energia para o transporte de pessoas em um ônibus operado segundo ciclo diesel.*

#### 4.1.2.2 Unidade Funcional e Fluxo de Referência

Para o atendimento da função estabelecida, a unidade funcional foi definida como: *transferir energia para o transporte de pessoas em um ônibus Mercedes-Benz, modelo OM 904 LA, ao longo de 100 (cem) quilômetros, nas condições de tráfego urbano.*

Os fluxos de referência das duas opções foram calculados com base em dados de teste de campo, realizados pela empresa Mercedes-Benz do Brasil Ltda. A cada 100 km percorridos, o ônibus operando com óleo diesel e com a mistura B5 consumiu, respectivamente, 40,7352 litros e 42,6962 litros (MERCEDDES-BENZ, 2012).

Cabe informar que o teste de campo foi realizado com a mistura B5 de biodiesel metílico de soja. Para o presente estudo, assumiu-se que o consumo de B5 etílico de soja é equivalente ao do biodiesel metílico.

#### 4.1.2.3 Sistemas de Produto

##### 4.1.2.3.1 Sistema de Produto do Óleo Diesel

A Figura 26 apresenta o sistema de produto do óleo diesel modelado neste estudo. Cabe ressaltar que a realidade da produção e uso do óleo diesel é inúmeras vezes mais complexas que a representada na Figura 26. No entanto, para efeito da modelagem, o sistema de produto indicado atende as necessidades para a realização do presente estudo.



Figura 26 – Representação gráfica do Sistema de Produto do uso do óleo diesel

O subsistema de *extração de petróleo* compreende as atividades necessárias desde a retirada do petróleo dos campos marítimos e terrestres até o seu encaminhamento para as refinarias.

O subsistema de *refino do petróleo* trata das operações ocorridas dentro da refinaria, com vistas a gerar derivados de valor comercial a partir do petróleo bruto. O transporte do petróleo até a refinaria é realizado por meio de embarcações (no mar) e oleodutos (em terra).

O subsistema de *armazenamento* caracteriza-se pelo transporte, via oleodutos, do óleo diesel produzido nas refinarias até os terminais de armazenamento; e posteriormente, destes até os postos de abastecimento.

Por fim, o subsistema de *uso do óleo diesel* caracteriza-se pelo consumo do combustível na operação do ônibus em tráfego urbano.

#### 4.1.2.3.2 Sistema de Produto do B5 etílico de soja

A Figura 27 apresenta o sistema de produto do B5 etílico de soja adotado no presente estudo. Percebe-se que este sistema de produto é composto pelo sistema de produto do óleo diesel, acrescido do ciclo de vida da produção de biodiesel etílico de soja.

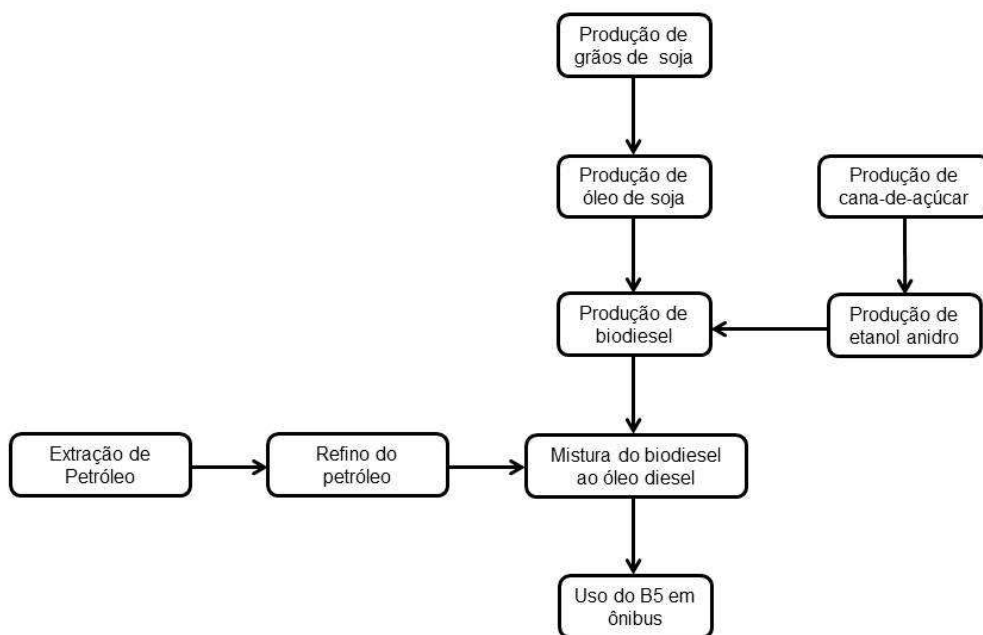


Figura 27 – Representação gráfica do Sistema de Produto do uso da mistura B5

O subsistema de *produção de grãos de soja* compreende as etapas agrícolas de: plantio por sistema direto; aplicação de corretivos do solo, fertilizantes minerais e pesticidas, incluindo o uso de maquinários agrícolas; colheita; e beneficiamento do produto.

O subsistema de *produção de óleo de soja* representa a extração do óleo de soja com o uso de solvente, no caso o hexano. Em razão do óleo ser destinado para a produção de biodiesel, não foi contemplado o processo de refino do mesmo.

O subsistema de *produção de cana-de-açúcar* engloba as atividades agrícolas necessárias para a produção desta cultura, quais sejam: preparo do solo; plantio; aplicação de corretivos do solo, fertilizantes minerais, resíduos industriais e pesticidas; e colheita.

O subsistema de *produção de etanol anidro* caracteriza-se pelos processos industriais desenvolvidos com vistas à geração de etanol anidro. Neste subsistema considerou-se a produção de etanol anidro tanto em destilarias autônomas quanto em usinas anexas.

O subsistema de *produção de biodiesel* fundamenta-se na modelagem do processo de transesterificação. Ao final desta etapa é gerado o B100 etílico de soja, que deverá compor a mistura B5 em estudo.

O subsistema de *mistura do biodiesel ao óleo diesel* compreende a adição do biodiesel etílico de soja ao óleo diesel, na proporção definida pela mistura B5. Assumiu-se que esta etapa ocorre nos terminais que recebem o óleo diesel das refinarias.

O último subsistema deste sistema de produto trata do *uso do B5*, no mesmo tipo de ônibus adotado no sistema de produto do óleo diesel.

#### **4.1.2.4 Fronteiras do Sistema**

Em ambos os sistemas de produto em estudo não foram incluídos bens de capital. Conforme discutido no item 3.4.4.2.1, em estudos de ACV com a modelagem atribucional, caso da presente avaliação, costuma-se excluir tais elementos, sem que tal decisão influencie de maneira significativa os resultados.

No que diz respeito ao sistema de produto do óleo diesel, adicionalmente não foram consideradas as etapas preliminares de produção de petróleo, tais quais: prospecção; perfuração do poço e completação. Estas etapas podem ser

caracterizadas como bens de capital, necessários para a viabilidade da produção de uma jazida em escala comercial.

#### **4.1.2.5 Requisitos de qualidade dos dados**

A respeito da fonte dos dados para a construção dos ICV do óleo diesel e B5 etílico de soja, este estudo fez uso preponderantemente de dados secundários. Na modelagem de cada um dos subsistemas, inicialmente foram feitas tentativas de contato com empresas produtoras dos objetos em questão. No entanto, na maioria dos casos nenhum retorno foi obtido, ou mesmo não foi permitida a coleta dos dados próprios das organizações.

Mais adiante, na descrição da Análise de Inventário, será reportada a origem de cada um dos dados que compõem os ICV da presente análise.

Em termos das coberturas temporal, geográfica e tecnológica, definiu-se:

##### *a) Cobertura Temporal*

Estabeleceu-se o período compreendido entre os anos de 2008 e 2011 para qual os dados deveriam ser válidos. Tal intervalo foi definido por ocasião da modelagem do primeiro subsistema investigado – o de produção de grãos de soja –, e estendido para os demais subsistemas no intuito de manter uma uniformidade no estudo.

Qualquer desvio deste período será devidamente reportado no capítulo que trata da Análise de Inventário.

##### *b) Cobertura Geográfica*

Em termos de cobertura geográfica, definiu-se que o modelo deveria tratar da produção dos combustíveis no estado de São Paulo. Tal decisão foi tomada em razão de haver tão somente uma empresa produtora de biodiesel etílico no Brasil, situada no referido estado, com autorização da ANP para comercialização do combustível. Além disso, São Paulo é o estado que mais consome óleo diesel no país, fato esta que corrobora para a escolha do mesmo como cobertura geográfica do estudo.

Qualquer desvio desta localidade será devidamente reportado no capítulo que trata da Análise de Inventário.

### *c) Cobertura Tecnológica*

Para o caso do óleo diesel, definiu-se como cobertura tecnológica o esquema de refino típico de uma refinaria, com os processos de destilação atmosférica e craqueamento térmico. Além disso, a tecnologia do refino é voltada para a produção do diesel com teor de enxofre 500 ppm – que é aquele válido para a época em que este estudo foi conduzido.

Em se tratando do biodiesel etílico de soja, as tecnologias adotadas foram aquelas que melhor representam a atual produção brasileira de: soja; óleo de soja; cana-de-açúcar; etanol anidro; biodiesel; e óleo diesel. Particularmente no que diz respeito ao uso dos combustíveis, a tecnologia adotada é aquela característica dos ônibus testados nos testes em campo da empresa Mercedes-Benz.

Qualquer desvio de tecnologia será devidamente reportado no capítulo que trata da Análise de Inventário.

#### **4.1.2.6 Procedimento de alocação**

Conforme discutido no item 3.4.4.2.2, em modelagens do tipo atribucional é prática comum o uso da alocação para processos elementares que apresentam a questão da multifuncionalidade.

No presente estudo, a alocação foi realizada de acordo com o critério econômico, em razão do uso de elementos do *Ecoinvent*, que adotam este princípio. Tal decisão foi tomada para que fosse mantida uma uniformidade do critério ao longo de todo o estudo. A exceção ocorreu no subsistema de refino do petróleo, onde se fez uso do critério energético, julgando-se que este critério fosse mais adequado para esta situação.

#### **4.1.2.7 Pressupostos e Escolha de Valores**

Os pressupostos, ou premissas, e as escolhas de valores assumidas ao longo da execução do estudo estão apresentadas em cada um dos subsistemas do capítulo de Análise de Inventário.

#### **4.1.2.8 Método de Avaliação de Impacto e categorias de impacto**



Para a avaliação dos desempenhos ambientais decidiu-se pela seleção do método de avaliação de impacto *ReCiPe Endpoint (H)* – versão 1.04. A opção por tal modelo decorreu, para o presente caso, das seguintes justificativas:

- ✓ Trata-se de um modelo que observa de maneira ampla as interações entre sistemas antrópicos e o meio ambiente, especialmente para atividades agrícolas; e
- ✓ Corresponde a uma evolução, ou seja, e entenda-se, uma revisão ampliada de dois outros modelos de avaliação de impacto até então já consagrados – o *CML* e o *Ecoindicator 99*.

Em termos da profundidade em que os impactos ambientais deveriam ser avaliados, decidiu-se que a comparação dos combustíveis chegaria até o nível *endpoint*. No entanto, resultados em nível *midpoint* (método *ReCiPe Endpoint (H)*) também são apresentadas nesta dissertação. Nesta última opção, as categorias de impacto ambiental são medidas em unidades que remontam padrões físicos – seguindo a linha original do *CML* – o que torna a interpretação dos impactos ambientais gerados menos abstrata – diferentemente do que ocorre no caso das unidades em nível *endpoint* do *Ecoindicator 99*.

As categorias de impacto investigadas a partir deste método foram: *Mudanças Climáticas; Depleção do Ozônio Estratosférico; Toxicidade Humana; Formação de Foto-oxidantes; Formação de Material Particulado; Acidificação Terrestre; Eutrofização em Água Doce; Ecotoxicidade Terrestre; Ecotoxicidade em Água Doce; Ocupação de Área Agrícola; Transformação de Área Natural; Depleção de Água; e Depleção Fóssil*.

Os valores dos fatores de normalização e ponderação foram adotados do método *ReCiPe Endpoint (H)* e se encontram indicados na Tabela 62. O resultado do indicador único foi obtido somando os resultados ponderados de todas as categorias avaliadas.

#### **4.1.2.9 Interpretação**

Para avaliar a qualidade dos resultados do presente estudo fez-se uso da análise de sensibilidade. Por meio desta, avaliou-se individualmente como a alteração de certo parâmetro – por exemplo, critério de alocação ou valores dos fatores de ponderação

– exerce influência nos resultados finais. No item 5.2 são apresentados cada um dos parâmetros escolhidos, bem como a variação no resultado do estudo.

#### **4.1.2.10 Tipo de Revisão Crítica**

Dada à natureza acadêmica do presente estudo, decidiu-se pela não realização de revisão crítica. No entanto, caso os resultados desta avaliação sejam utilizados para tomadas de decisão futuras, é recomendável que primeiramente seja conduzida uma revisão crítica, a ser realizada por especialista externo.

#### **4.1.2.11 Tipo e Formato do Relatório**

Na mesma linha do item anterior, em função deste trabalho ser caracterizado como produto de uma dissertação de mestrado, o tipo e formato do relatório são característicos de iniciativas desta natureza.

## **4.2 ANÁLISE DE INVENTÁRIO**

A partir deste item serão descritos os dados coletados para a execução da fase de Análise de Inventário. Optou-se por apresentar estas informações para cada subsistema que compõe cada um dos sistemas de produto em análise.

No início da descrição do subsistema são reportadas informações relacionadas a itens de escopo, tais como: fonte dos dados; coberturas temporal, geográfica e tecnológica; e fatores de alocação (quando houver).

Após esta descrição inicial, são discutidas as diversas particularidades dos dados coletados para a elaboração dos inventários.

### **4.2.1 ICV do óleo diesel**

#### **4.2.1.1 Subsistema de extração de petróleo**

- a) Fonte dos dados: secundários;
- b) Cobertura Temporal: 2008 a 2011 – ver justificativa da escolha deste período no item 4.2.2.1. A exceção ocorreu quando se fez uso do banco de dados,

visto que o mesmo representa realidades anteriores à cobertura temporal deste ICV;

c) Cobertura Geográfica: estados de São Paulo e Rio de Janeiro. Qualquer variação de ordem geográfica foi introduzida por conta do uso de banco de dados; e

d) Cobertura Tecnológica: extração em plataformas *onshore* e *offshore*.

A extração de petróleo em território brasileiro não é suficiente para atender a demanda nacional, o que obriga o país a importar este recurso de outros países (ANP, 2012). A Tabela 9 apresenta dados médios da produção e importação de petróleo no estado de São Paulo, entre os anos 2008 e 2011.

**Tabela 9 – Dados médios de produção e importação de petróleo em São Paulo**

Dado	Quantidade (t)	Fonte
Produção de petróleo no estado de São Paulo <sup>a</sup>	699.091	ANP, 2012
Importação de petróleo no estado de São Paulo	5.513.943	MDIC, 2011
Importação via Porto de São Sebastião	5.376.106	
<i>País de origem da importação</i>		
Nigéria	3.386.715	MDIC, 2011
Líbia	724.491	MDIC, 2011
Angola	303.498	MDIC, 2011
Argélia	278.839	MDIC, 2011
Austrália	177.440	MDIC, 2011
Guiné Equatorial	174.296	MDIC, 2011
Arábia Saudita	157.620	MDIC, 2011
Estados Unidos	52.715	MDIC, 2011
Congo	34.005	MDIC, 2011
Argentina	21.902	MDIC, 2011
Bermudas	34.930	MDIC, 2011
Portugal	29.657	MDIC, 2011

Notas: <sup>a</sup>: valor original de ANP (2012) em m<sup>3</sup>. Para transformar em t, adotou-se a densidade do petróleo igual a 0,884 t/m<sup>3</sup> (EPE, 2011).

Com base nos dados da Tabela 9, admitiu-se que a chegada de petróleo importado em São Paulo ocorre unicamente via porto de São Sebastião. Outra premissa assumida foi a desconsideração do conjunto de países, que somados respondem por menos de 10% do total de petróleo importado no estado. Dessa forma, para efeito desta modelagem considerou-se a importação de petróleo tão somente da Nigéria, Líbia, Angola, Argélia e Austrália.

Em relação à produção de petróleo em São Paulo, inicialmente verificou-se se este volume atende ao montante processado pelas refinarias do estado (ver Tabela 10).

**Tabela 10 – Dados médios<sup>a</sup> de volume de petróleo processado nas refinarias paulistas e contribuição do petróleo extraído no estado de São Paulo**

<b>Dado</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Fonte</b>
Volume de petróleo processado nas refinarias paulistas a partir de petróleo nacional (t) <sup>b</sup>	34.047.572	ANP, 2012
Produção de petróleo em São Paulo/Volume refinado nas refinarias paulistas (%)	2,1	ANP, 2012

Notas: <sup>a</sup>: Média entre os anos 2008 e 2011.

<sup>b</sup>: valor original de ANP (2012) em m<sup>3</sup>. Para transformar em toneladas, adotou-se a densidade do petróleo igual a 0,884 t/m<sup>3</sup> (EPE, 2011).

Baseado nos dados da Tabela 10, constatou-se que o volume de petróleo extraído em São Paulo representa uma pequena parcela (2,1%) do total processado nas refinarias paulistas. Diante disto, foi assumida a premissa que todo o petróleo de origem nacional encaminhado para estas refinarias advém do estado do Rio de Janeiro – bacia de Campos. Esta decisão foi tomada em razão do Rio de Janeiro ser o maior estado produtor de petróleo no país (ANP, 2012).

#### **4.2.1.1.1 Banco de dados utilizado**

Para modelar a extração de petróleo, tanto na bacia de Campos quanto nos países exportadores, foi adotado o banco de dados *USLCI* (NREL, 2011). Cabe informar que apenas nos subsistemas de extração e refino do petróleo adotou-se o banco de dados *USLCI*; nos demais subsistemas deste estudo, adotou-se o banco de dados *Ecoinvent*. A justificativa para a utilização do *USLCI* encontra-se no item 4.2.1.2.3. Particularmente no que se refere à extração de petróleo, adotou-se o elemento nomeado “Crude oil, at production/RNA”.

#### **4.2.1.1.2 Inventário Consolidado da extração de petróleo**

A Tabela 11 apresenta o Inventário representativo da produção de 1 kg de petróleo. Este inventário foi considerado válido para o processo de extração tanto no Brasil quanto nos países exportadores, em razão de não terem sido encontradas informações específicas do processo em cada país.

**Tabela 11 – Inventário da extração de 1 kg petróleo**

<b>Entradas/saídas</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>
<i>Entradas</i>		
Oil, crude, in ground	kg	1,0
Diesel, combusted in industrial boiler/US	kg	0,0010665336
Electricity - medium voltage, at grid/BR	kWh	0,039022
Gasoline, combusted in equipment/US	kg	0,00051614836
Natural gas, combusted in industrial boiler/US	m <sup>3</sup>	0,032775
Residual fuel oil, combusted in industrial boiler/US	kg	0,00084538902
Process-specific burdens, sanitary landfill/CH U <sup>a</sup>	kg	0,0261
<i>Emissões para o Ar</i>		
Metano	kg	0,00353
<i>Emissões para a Água</i>		
2-Hexanone	kg	0,000000023211
Acetone	kg	0,000000035547
Aluminium	kg	0,00031873
Antimony	kg	0,00000019917
Arsenic, ion	kg	0,00000098339
Barium	kg	0,0043639
Benzene	kg	0,0000059633
Benzene, 1-methyl-4-(1-methylethyl)-	kg	0,0000000035522
Benzene, ethyl-	kg	0,00000033545
Benzene, pentamethyl-	kg	0,0000000026642
Benzenes, alkylated, unspecified	kg	0,00000017473
Benzoic acid	kg	0,000003606
Beryllium	kg	0,000000055163
Biphenyl	kg	0,000000011313
BOD5, Biological Oxygen Demand	kg	0,00061895
Boron	kg	0,000011157
Bromide	kg	0,00076157
Cadmium, ion	kg	0,00000014515
Calcium, ion	kg	0,011419
Chloride	kg	0,12838
Chromium	kg	0,0000085043
Cobalt	kg	0,000000078754
COD, Chemical Oxygen Demand	kg	0,0010226
Copper, ion	kg	0,000001023
Cyanide	kg	0,0000000025655
Decane	kg	0,00000010362
Dibenzofuran	kg	0,0000000067591
Dibenzothiophene	kg	0,0000000003492

---

Dibenzothiophene	kg	0,0000000054763
Solved solids	kg	0,15834
Docosane	kg	0,0000000038038
Dodecane	kg	0,0000001966
Eicosane	kg	0,000000054129
Fluorene, 1-methyl-	kg	0,0000000040456
Fluorenes, alkylated, unspecified	kg	0,000000010126
Fluorine	kg	0,0000000049848
Hexadecane	kg	0,00000021459
Hexanoic acid	kg	0,00000074677
Iron	kg	0,00063129
Lead	kg	0,0000020914
Lithium, ion	kg	0,0000038159
Magnesium	kg	0,0022323
Manganese	kg	0,0000035575
Mercury	kg	0,0000000034917
Methane, monochloro-, R-40	kg	0,0000000014308
Methyl ethyl ketone	kg	0,0000000028615
Molybdenum	kg	0,000000081716
Naphthalene	kg	0,000000064778
Naphthalene, 2-methyl-	kg	0,000000056305
Naphthalenes, alkylated, unspecified	kg	0,0000000028632
n-Hexacosane	kg	0,0000000023731
Nickel	kg	0,0000009772
o-Cresol	kg	0,00000010226
Octadecane	kg	0,000000053014
Oils, unspecified	kg	0,000071965
p-Cresol	kg	0,00000011033
4-Methyl-2-pentanone	kg	0,000000014939
Phenanthrene	kg	0,0000000010141
Phenanthrenes, alkylated, unspecified	kg	0,0000000011872
Phenol	kg	0,0000015836
Phenol, 2,4-dimethyl-	kg	0,00000009957
Selenium	kg	0,000000038621
Silver	kg	0,0000074673
Sodium, ion	kg	0,036199
Strontium	kg	0,00019379
Sulfate	kg	0,00025834
Sulfur	kg	0,000009418
Detergent, oil	kg	0,0000029602
Suspended solids, unspecified	kg	0,0097668

---

Tetradecane	kg	0,00000086162
Thallium	kg	0,00000041967
Tin	kg	0,00000079922
Titanium, ion	kg	0,0000030586
Toluene	kg	0,000005634
Vanadium	kg	0,00000096527
Ammonia	kg	0,000053216
Lead-210/kg	kg	3,6935E-16
Radium-226/kg	kg	1,285E-13
Radium-228/kg	kg	6,5729E-16
Xylene	kg	0,000003030595
Yttrium	kg	0,000000023956
Zinc	kg	0,000007343
m-Xylene	kg	0,0000001077

Notas: <sup>a</sup>: adotado este elemento do *Ecoinvent* em substituição ao original "Dummy\_Disposal, solid waste, unspecified, to sanitary landfill/US", do *USLCI*, dado que o original é um elemento sem entradas e saídas associadas.

#### 4.2.1.2 Subsistema refino do petróleo

- a) Fonte dos dados: secundários;
- b) Cobertura Temporal: 2008 a 2011. A exceção ocorreu quando se fez uso do banco de dados, visto que o mesmo representa realidades anteriores à cobertura temporal deste ICV;
- c) Cobertura Geográfica: estado de São Paulo. Qualquer variação de ordem geográfica foi introduzida por conta do uso de banco de dados;
- d) Cobertura Tecnológica: destilação atmosférica seguida de craqueamento térmico com vistas à produção de diesel 500 ppm;
- e) Para a alocação das cargas ambientais adotou-se o critério energético, uma vez que os principais derivados do petróleo se destacam pelo seu uso como fonte de energia. Com base nos valores da Tabela 13, e na densidade e poderes caloríficos inferiores dos derivados (ANP, 2011b), os fatores de alocação para o óleo diesel, em cada uma das refinarias, foram calculados em: Replan: 52,6%; Revap: 23,9%; Rpbcc: 51,8%; e Recap: 45,7%.

No estado de São Paulo existem quatro refinarias, todas elas produtoras de óleo diesel, a saber: Replan (Paulínia); RPBC (Cubatão); Revap (São José dos Campos);

e Recap (Mauá). Além da produção no estado, ocorre também a importação deste combustível. Os dados de produção estadual e importação encontram-se na Tabela 12.

**Tabela 12 – Dados médios<sup>a</sup> de produção de óleo diesel nas refinarias paulistas e importação**

Dado	Quantidade (mil m <sup>3</sup> )	Fonte
<i>Produção nas refinarias paulistas</i>	19.836,5	ANP, 2012
Replan	10.690,7	ANP, 2012
Rpbc	4.692,7	ANP, 2012
Revap	3.308,8	ANP, 2012
Recap	1.144,3	ANP, 2012
<i>Importação via porto de São Sebastião<sup>b</sup></i>	2.162,2	MDIC, 2011
Índia <sup>c</sup>	1.122,3	MDIC, 2011
Coréia do Sul <sup>c</sup>	331,7	MDIC, 2011
Cingapura <sup>c</sup>	270,5	MDIC, 2011
Taiwan <sup>c</sup>	202,1	MDIC, 2011
Estados Unidos <sup>c</sup>	79,7	MDIC, 2011

Notas: <sup>a</sup>: Média entre os anos 2008 e 2011.

<sup>b</sup>: responsável por 90% da importação total do estado.

<sup>c</sup>: listados apenas os maiores países que combinados contribuem com mais de 90% da importação de óleo diesel.

#### 4.2.1.2.1 Produção de derivados do petróleo nas refinarias paulistas

A Tabela 13 indica os derivados do petróleo gerados em cada uma das refinarias paulistas.

**Tabela 13 – Dados médios de produção (em m<sup>3</sup>) de derivados do petróleo nas refinarias paulistas**

Derivado	Replan	Revap	Rpbc	Recap
Asfalto	259.364,7	454.853,3	-	-
Coque	1.469.709,4	162.478,8	567.955,2	-
Gasolina A	4.295.162,3	2.620.590,5	2.126.545,3	839.549,8
Gasolina de aviação	-	-	67.088,3	-
GLP	1.481.117,6	1.043.541,7	382.531,2	295.423,2
Nafta	671.514,4	1.298.442,9	99.466,3	5.413,0
Óleo combustível	969.481,2	2.964.139,5	521.271,7	22.479,7
Óleo diesel	10.690.744,8	3.308.820,8	4.692.660,8	1.144.251,0
Outros energéticos	-	-	39.625,8	-
Outros não energéticos	431.584,9	184.431,9	201.290,9	260.129,7
Querosene de aviação	400.749,0	1.818.808,5	-	-
Querosene iluminante	2.664,8	357,5	-	-
Solvente	-	2.775,3	168.592,8	29.921,5

Fonte: ANP, 2012.

Notas: <sup>a</sup>: Média entre os anos 2008 e 2011.



Pela tabela anterior, percebe-se que o óleo diesel é o derivado que apresenta o maior volume de produção em todas as refinarias, dado o seu grande uso no transporte rodoviário nacional.

#### 4.2.1.2.2 Transportes

Em termos de transporte, foram calculadas as distâncias de transporte do petróleo dos locais de produção até as refinarias. Para o petróleo importado, estimou-se o deslocamento, via transporte marítimo, do porto exportador até o porto de São Sebastião (Tabela 14). Do porto de São Sebastião até as refinarias, o transporte ocorre por meio de oleodutos (

Tabela 15).

Em relação ao petróleo nacional, não foram encontradas informações a respeito da distância entre a Bacia de Campos e o porto de descarregamento. Dessa forma, assumiu-se de forma arbitrária uma distância igual a 250 km até o porto de São Sebastião.

**Tabela 14 – Distâncias de transporte (marítimo) do petróleo importado até o porto brasileiro**

<b>País de origem</b>	<b>Porto de origem<sup>a</sup></b>	<b>Porto de chegada</b>	<b>Distância (km)<sup>b</sup></b>
Nigéria	Lagos	São Sebastião	6.288
Líbia	Tripoli	São Sebastião	9.984
Angola	Luanda	São Sebastião	6.447
Argélia	Argel	São Sebastião	8.766
Austrália	Melbourne	São Sebastião	14.394

Notas: <sup>a</sup>: adotou-se o porto de maior movimentação de cargas no país

<sup>b</sup>: calculada a partir do site <http://www.searates.com/reference/portdistance>

**Tabela 15 – Distâncias de transporte (via oleoduto) do petróleo importado até as refinarias**

<b>Terminal de origem</b>	<b>Terminal intermediário</b>	<b>Refinaria de destino</b>	<b>Distância (km)</b>
São Sebastião	Guararema	Replan	235,7
São Sebastião	Guararema	Revap	118,1
São Sebastião	Cubatão	Recap	155,4
São Sebastião	-	Rpbc	123,3

Fonte: ANP, 2012.

#### 4.2.1.2.3 Banco de dados utilizado

A empresa que detém quase que o monopólio de extração e refino de petróleo no Brasil é a Petrobras. Esta empresa não disponibiliza ao público dados destes processos, e também não foram encontradas publicações que pudessem servir de base para a construção dos inventários.

Diante dessa falta de informações para a realidade brasileira – mais especificamente a do estado de São Paulo –, partiu-se para a análise de bancos de dados internacionais disponíveis. Ao longo de todo o estudo, deu-se preferência ao uso de elementos do banco de dados *Ecoinvent*, que é a maior base de dados do mundo para apoio a estudos de ACV.

Ocorre que no caso específico de produção de derivados do petróleo, o modelo da refinaria deste banco de dados apresenta um perfil de refino bastante diferente das unidades paulistas. Enquanto que a participação, em massa, do óleo diesel em relação a todos os derivados é em torno dos 40% nas refinarias de São Paulo, no modelo da refinaria do *Ecoinvent* – no contexto da Europa – este valor se situa em 10%.

Adicionalmente a este fato, o óleo diesel do *Ecoinvent* possui teor de enxofre igual a 350 ppm, ao passo que o óleo diesel brasileiro na cobertura temporal adotada neste estudo apresenta teor de 500 ppm. A obtenção de um óleo diesel com menor teor de enxofre implica que existe uma tecnologia diferente daquela adotada para o caso da produção do combustível com teor mais elevado.

Baseado nestes dois fatos julgou-se que o elemento “Diesel, at refinery/RER U” do banco de dados *Ecoinvent* não seria adequado para modelar a produção de diesel a partir das refinarias paulistas. Sendo assim, foram investigados outros bancos de dados internacionais disponíveis. Aquele que mais se assemelhou ao perfil de refino paulista, apresentando uma contribuição individual de diesel em torno de 22% e teor de enxofre de 500 ppm, foi o diesel do banco de dados *USLCI*.

Com base no arrazoado apresentado, decidiu-se adotar o modelo de refino deste banco de dados, ajustando as produções de cada derivado de acordo com a realidade das refinarias paulistas.

Por uma questão de uniformidade, o processo de extração de petróleo também foi modelado a partir do mesmo banco de dados, conforme item 4.2.1.1.1.

#### **4.2.1.2.4 Inventário Consolidado da produção de óleo diesel**

A Tabela 16 apresenta o inventário da produção de 1 kg de óleo diesel, em cada uma das quatro refinarias do estado, com os valores pós-alocação.

**Tabela 16 – Inventário da produção de 1 kg de óleo diesel após alocação**

<b>Entradas/saídas</b>	<b>Unid.</b>	<b>Replan</b>	<b>Revap</b>	<b>Recap</b>	<b>Rpbc</b>
<i>Entradas</i>					
Crude oil, at production/RNA	kg	0,462314	0,210733	0,401143	0,456994
Electricity - medium voltage, at grid/BR	kWh	0,070309	0,031980	0,061004	0,069258
Liquefied petroleum gas, combusted in industrial boiler/US	kg	0,000266	0,000121	0,000231	0,000262
Natural gas, combusted in industrial boiler/US	m <sup>3</sup>	0,004658	0,002119	0,004042	0,004589
Residual fuel oil, combusted in industrial boiler/US	kg	0,011575	0,000526	0,010043	0,011402
Transport, ocean freighter, average fuel mix/US	t.km	3,833794	1,743815	3,326448	3,77652
Transport, crude oil pipeline, onshore/RER U <sup>a</sup>	t.km	0,010897	0,024888	0,062338	0,056347
Disposal, refinery sludge, 89.5% water, to sanitary landfill/CH U <sup>b</sup>	kg	0,0028504	0,001296	0,002473	0,002808
<i>Emissões para o Ar</i>					
Aldehydes, unspecified	kg	0,0000214	0,000010	0,000019	0,000021
Ammonia	kg	0,0000107	0,000005	0,000009	0,000011
Carbon monoxide, fossil	kg	0,0067698	0,003079	0,005874	0,006669
Methane, dichlorodifluoro-, CFC-12	kg	6,11E-11	2,78E-11	5,30E-11	6,02E-11
Methane, tetrachloro-, CFC-10	kg	6,11E-12	2,78E-12	5,30E-12	6,02E-12
Methane, fossil	kg	0,0000361	0,000016	0,000031	0,000036
Nitrogen oxides	kg	0,0001680	0,000076	0,000146	0,000165
NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	kg	0,0010332	0,000470	0,000897	0,001018
Particulates, unspecified	kg	0,0001222	0,000056	0,000106	0,000120
Sulfur oxides	kg	0,0011961	0,000544	0,001038	0,001178
Ethane, 1,1,1-trichloro-, HCFC-140	kg	4,94E-11	2,24E-11	4,28E-11	4,86E-11
<i>Emissões para a Água</i>					
Ammonia	kg	0,0000076	0,000003	0,000007	0,000008
BOD5, Biological Oxygen Demand	kg	0,0000173	0,000008	0,000015	0,000017

Chromium VI	kg	1,88E-8	8,57E-9	1,63E-8	1,85E-8
Chromium, ion	kg	2,90E-7	1,32E-7	2,52E-7	2,86E-7
COD, Chemical Oxygen Demand	kg	0,0001171	0,000053	0,000102	0,000115
Oils, unspecified	kg	0,0000056	0,000003	0,000005	0,000006
Phenols, unspecified	kg	1,17E-7	5,32E-8	1,01E-7	1,15E-7
Sulfide	kg	9,67E-8	4,40E-8	8,40E-8	9,53E-8
Suspended solids, unspecified	kg	0,0000143	0,000006	0,000012	0,000014

Notas: <sup>a</sup>: adotado este elemento do *Ecoinvent* em substituição ao original “Dummy\_Transport, pipeline, unspecified/US”, dado que o original é um elemento sem entradas e saídas associadas.

<sup>b</sup>: adotado este elemento do *Ecoinvent* em substituição ao original “Dummy\_Disposal, solid waste, unspecified, to sanitary landfill/US”, dado que o original é um elemento sem entradas e saídas associadas.

#### 4.2.1.3 Subsistema Armazenamento

- a) Fonte dos dados: secundários;
- b) Cobertura Temporal: 2008 a 2011;
- c) Cobertura Geográfica: estado de São Paulo; e
- d) Cobertura Tecnológica: transporte do óleo diesel por meio de oleodutos e mistura dos combustíveis em tanques de armazenamento.

O óleo diesel produzido em cada refinaria é conduzido, por meio de oleodutos, para terminais de armazenamento. A Tabela 17 apresenta os terminais de armazenamento da Petrobras localizadas no estado de São Paulo, bem como a logística assumida entre refinaria e terminal.

**Tabela 17 – Terminais de armazenamento da Petrobras**

Terminal	Procedência do óleo diesel	Distância (km)
Barueri	Replan	98,8
São Caetano do Sul	Revap e Recap	119,6 e 10,0
Cubatão	Rpbc e diesel importado <sup>a</sup>	2,0 e 121,0

Fonte: ANP, 2012.

Notas: <sup>a</sup>: assumiu-se que o óleo diesel importado, que chega a São Paulo via Porto de São Sebastião, é encaminhado para o Terminal de Cubatão.

Para a elaboração do inventário deste subsistema, foram consideradas tão somente as distâncias de transporte, via oleoduto, entre as refinarias e os terminais de armazenamento.

##### 4.2.1.3.1 Inventário Consolidado do armazenamento de óleo diesel

A Tabela 18 apresenta o inventário do armazenamento de 1 kg de óleo diesel, em cada um dos terminais adotados neste estudo.

**Tabela 18 – Inventário da produção de 1 kg de óleo diesel**

Entradas/saídas	Unidade	Term. Barueri	Term. São Caetano do Sul	Term. Cubatão
<i>Entradas</i>				
Diesel, at refinery/US -	kg	1,0	-	-

Replan				
Diesel, at refinery/US -	kg	-	0,257	-
Recap				
Diesel, at refinery/US -	kg	-	0,743	-
Revap				
Diesel, at refinery/US -	kg	-	-	0,68457
Rpbcb				
Diesel, at refinery//US <sup>a</sup>	kg	-	-	0,3755
Transport, crude oil pipeline, onshore/RER U	t.km	0,0988	0,0914	0,0395
Transport, ocean freighter, average fuel mix/US	t.km	-	-	5,1283

Notas: <sup>a</sup>: representa o inventário do óleo diesel importado.

#### 4.2.1.4 Subsistema de uso do óleo diesel em ônibus

- a) Fonte dos dados: primários e secundários;
- b) Cobertura Temporal: 2006 a 2009 – intervalo em que foram realizados testes de campo e em bancada dinamométrica;
- c) Cobertura Geográfica: estado de São Paulo (teste de campo realizado no bairro Cidade Dutra); e
- d) Cobertura Tecnológica: referente ao ônibus Mercedes-Benz, modelo OF1417; banco dinamométrico da empresa Mercedes-Benz.

O último subsistema modelado para o óleo diesel corresponde ao uso do combustível em um veículo urbano de transporte de passageiros. Tal veículo, um modelo de ônibus da empresa Mercedes-Benz, foi submetido a testes de campo e em bancada dinamométrica, no intuito de avaliar o consumo de combustível e emissões atmosféricas associadas (MCT, 2009).

Dados dos testes de campo e em bancada dinamométrica foram obtidos diretamente da empresa Mercedes-Benz. Adicionalmente a estes dados primários, foram utilizadas informações de Nigro et al. (2007), que participaram conjuntamente com a Mercedes-Benz nos testes em bancada dinamométrica.

O teste de campo foi realizado com um conjunto de ônibus, modelo OF1417, sendo que alguns rodaram com a mistura B5 (metílico de soja), e outros com óleo diesel

(sem adição de biodiesel). Nos ensaios em bancada dinamométrica, adicionalmente ao B5 metílico de sola e ao óleo diesel foram testadas as emissões atmosféricas do uso de B5 etílico de soja.

Os fatores de emissão, expressos em  $g_{\text{poluente}}/\text{km}$ , foram calculados de acordo com a Equação 2:

$$FE_i = fe\_din_i * \frac{1}{cons\_din} * d_{comb} * 1000 * \frac{1}{cons\_cam} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

i: tipo de poluente medido;

FE<sub>i</sub>: fator de emissão do poluente estimado para a situação real (g/km);

fe\_din<sub>i</sub>: fator de emissão obtido do teste em bancada dinamométrica (g/kWh);

cons\_din: consumo de combustível obtido do teste em bancada dinamométrica (g<sub>diesel</sub>/kWh);

d<sub>comb</sub>: densidade do combustível (kg/l);

cons\_cam: consumo de combustível obtido do teste em campo (km/l);

Na Tabela 19 são informados os dados utilizados para o cálculo dos fatores de emissão, conforme a Equação 2.

**Tabela 19 – Cálculo dos fatores de emissão dos poluentes atmosféricos para o óleo diesel**

Dado	CO	CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	HC	MP	Fonte
fe_din <sub>i</sub> (g/kWh)	0,55333	705,54	4,53	0,17667	0,08233	Mercedes-Benz, 2012
cons_din (g/kWh)	217,5	217,5	217,5	217,5	217,5	Nigro et al., 2007
d <sub>comb</sub>	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	EPE, 2011
cons_cam	2,3767	2,3767	2,3767	2,3767	2,3767	Mercedes-Benz, 2012
FE <sub>i</sub>	0,8991	1146,48	1384,58	7,3611	0,1338	calculado

#### 4.2.1.4.1 Inventário Consolidado do uso do óleo diesel em ônibus

Baseado na unidade funcional estabelecida no item 4.1.2.2, o inventário da fase de uso foi calculado para o transporte ao longo de 100 km (ver Tabela 20).



**Tabela 20 – Inventário do transporte de 100 km, em ônibus da Mercedes-Benz, com combustível óleo diesel**

Entradas/Saídas	Unidade	Quantidade
<i>Entradas</i>		
Diesel, at regional storage	l	40,7352
<i>Saídas</i>		
CO, fossil	kg	0,089915
CO <sub>2</sub> , fossil	kg	114,64811
NO <sub>x</sub>	kg	138,4583
HC, unspecified	kg	0,028708
MP, usnpecified	kg	0,013379

## 4.2.2 ICV do biodiesel etílico de soja

### 4.2.2.1 Subsistema de produção de grãos de soja

- a) Fonte dos dados: secundários;
- b) Cobertura Temporal: 2008 a 2011. A exceção ocorreu quando se fez uso do banco de dados, visto que o mesmo representa realidades anteriores à cobertura temporal deste ICV;
- c) Cobertura Geográfica: estados de São Paulo e Mato Grosso. A produção no Mato Grosso foi incluída em razão do consumo de óleo de soja deste estado na produção de biodiesel. Qualquer variação de ordem geográfica foi introduzida por conta do uso de banco de dados; e
- d) Cobertura Tecnológica: sistema de plantio direto com colheita mecanizada.

Para quantificar os insumos agrícolas associados à produção dos grãos de soja foram utilizados dados da publicação *Anuário da Agricultura Brasileira* (Agrianual). Inicialmente foram compilados dados da produção da soja das safras 2005/2006 a 2010/2011. No entanto, uma análise a respeito da variação do consumo de alguns insumos ao longo destas seis safras indicou que as safras 2005/2006 e 2006/2007 apresentavam grandes oscilações em alguns elementos. Eliminando estas duas safras iniciais, percebeu-se uma tendência de estabilização no consumo de praticamente todos os insumos, o que levou à decisão de utilizarem-se apenas os dados reportados nestas quatro últimas safras. Assim, a cobertura temporal definida para este estudo compreende o período entre os anos 2008 e 2011.

#### **4.2.2.1.1 Área, produtividade e produção da soja**

Dados de produção, área plantada e produtividade da soja foram coletados junto ao site da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2011). Os valores médios (entre os anos 2008 e 2011) calculados foram:

- ✓ Área: 560,6 mil ha (SP) e 6.031,6 mil ha (MT);
- ✓ Produtividade: 2.692,3 kg/ha (SP) e 3.108,0 kg/ha (MT); e
- ✓ Produção: 1.511,9 mil t (SP) e 18.747,4 mil t (MT).

#### **4.2.2.1.2 Consumos de calcário e semente**

Os valores médios de consumo de calcário e semente, no estado de São Paulo, foram calculados em 500 kg/ha e 70 kg/ha, respectivamente. Para Mato Grosso, os consumos dos mesmos produtos foram 560 kg/ha e 60 kg/ha (INFORMA ECONOMICS FNP, 2008, 2009, 2010, 2011).

#### **4.2.2.1.3 Consumo de fertilizantes minerais**

O valor médio de consumo de fertilizantes minerais foi calculado em 250 kg/ha e 380 kg/ha para os estados de São Paulo e Mato Grosso, respectivamente. Uma vez que a formulação indicada do fertilizante é 02-20-20, as disponibilidades de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O representam, respectivamente, 5 kg/ha, 50 kg/ha e 50 kg/ha em São Paulo e 7,6 kg/ha, 76 kg/ha e 76 kg/ha no Mato Grosso (INFORMA ECONOMICS FNP, 2008, 2009, 2010, 2011).

Em se tratando de ICV, a entrada de fertilizante deve ser feita em termos do tipo e quantidade de fertilizante mineral aplicado, e não no montante de nutriente fornecido. Uma vez conhecida a formulação do fertilizante utilizado, e não havendo informação disponível acerca dos tipos específicos aplicados, foi necessário adotar hipóteses para a determinação dos mesmos.

Em relação ao K<sub>2</sub>O, adotou-se que este nutriente é fornecido exclusivamente por meio do cloreto de potássio (KCl), que é o fertilizante potássico predominante na agricultura brasileira (ANDA, 2011). Como o KCl apresenta 58% de potássio como

$K_2O$ , são necessários 86,2 kg e 131,0 kg de KCl em São Paulo e Mato Grosso, respectivamente.

No que se refere ao N, Embrapa (2010b) informa que toda a necessidade para o crescimento da soja pode ser obtida via fixação biológica de nitrogênio (FBN). Ainda Segundo Embrapa (2010b), resultados obtidos em todas as regiões onde a soja é cultivada mostram que a aplicação de fertilizante nitrogenado na semeadura ou em cobertura em qualquer estágio de desenvolvimento da planta, em sistemas de semeadura direta ou convencional, além de reduzir a nodulação e a eficiência da FBN, não traz nenhum incremento de produtividade para a soja. No entanto, se fertilizantes que contêm nitrogênio forem mais econômicos do que aqueles sem o nutriente, eles podem ser utilizados, desde que não sejam aplicados acima de 20 kg de N/ha.

Com base na informação acima, admitiu-se que a presença de N na formulação 02-20-20 provavelmente ocorre em razão do uso de fertilizantes fosfatados que contenham também pequenos teores de N, casos do fosfato de monoamônio (MAP) ou do fosfato diamônio (DAP). Segundo ANDA (2011), o MAP possui uma utilização largamente superior que o DAP no Brasil e, portanto, adotou-se o MAP neste estudo.

Como o MAP apresenta 9% de nitrogênio como N, são necessários 55,5 kg e 84,4 kg do fertilizante em São Paulo e Mato Grosso, respectivamente. O MAP possui ainda 48% de fósforo como  $P_2O_5$ , o que possibilita o fornecimento de 26,7 kg e 40,5 kg de nutriente em São Paulo e Mato Grosso, respectivamente.

Para o restante de  $P_2O_5$ , admitiu-se o uso de superfosfato simples (SSP) e o superfosfato triplo (TSP), que juntamente com o MAP são os principais fertilizantes fosfatados da agricultura brasileira (ANDA, 2011).

Como o SSP e o TSP apresentam, respectivamente, 18% e 41% de fósforo como  $P_2O_5$ , são necessários 91,5 kg de SSP e 16,75 kg de TSP para completar a necessidade de  $P_2O_5$  em São Paulo. No Mato Grosso, as quantidades de SSP e TSP são 139,1 kg e 25,5 kg, respectivamente.

#### **4.2.2.1.4 Consumo de pesticidas**

Os consumos médios de pesticidas, por classe, foram calculados em (INFORMA ECONOMICS FNP, 2008, 2009, 2010, 2011):

- ✓ Herbicidas: 3,5 kg/ha (SP e MT);
- ✓ Inseticidas: 2,8 kg/ha (SP) e 0,57 kg/ha (MT);
- ✓ Fungicidas: 1,2 kg/ha (SP) e 0,97 kg/ha (MT); e
- ✓ Acaricidas: 0,2 kg/ha (SP).

Para uma avaliação mais detalhada sobre os impactos ambientais decorrentes do uso de pesticidas é importante conhecer não apenas as classes dos pesticidas, mas também quais os ingredientes ativos (i.a.) utilizados em cada classe.

Não foi encontrada nenhuma fonte oficial que informasse quais i.a. são utilizados especificamente na cultura de soja. Dessa forma, os tipos de defensivos agrícolas e respectivos i.a. foram adotados de acordo com Ibama (2010) e Andrei (2005), que abordam o uso destes produtos de forma geral na agricultura brasileira. Os produtos comerciais, i.a. associados e dosagem média recomendada, estão apresentados na Tabela 21.

**Tabela 21 – Produtos comerciais e i.a. adotados para a cultura de soja**

Classe de pesticida	Produto comercial	Ingrediente ativo (i.a.)	Dosagem média recomendada (kg/ha)	Concentração do i.a. (g/kg produto)
Acaricida	Acefato	Acefato	0,6	750
	Arrivo 200 CE	Cipermetrina	0,1625	200
Inseticida	Tamaron	Metamidofós	0,525	600
	Endosulfan	Endosulfan	1,0	350
Fungicida	Derosal 500 SC	Carbendazim	0,06	500
	Folicur	Tebuconazol	0,525	200
	Opera	Piraclostrobina	55	133 e 50
		e Epoxiconazole		
Herbicida	Roundup Original	Glifosato	3,25	480
	DMA 806 BR	2,4-D	1,25	806
	Dual Gold	S-Metacloro	1,75	960
	Basagran	Bentazona	1,2	630
Formicida	Mirex-S <sup>a</sup>	Sulfuramida	8 g/m <sup>2</sup>	3

Fonte: Ibama (2010); Andrei (2005).

Notas: <sup>a</sup>: as fontes consultadas não abordam o uso de formicidas. A escolha do Mirex-S foi feita com base em pesquisa de qual o formicida mais utilizado no Brasil, e que é também recomendado para a cultura da soja.

A contribuição individual de cada produto comercial dentro da sua classe foi calculada com base na sua dosagem média recomendada em relação à somatória das dosagens média de todos os produtos comerciais da classe do pesticida. Para melhor o entendimento, apresenta-se o exemplo de um produto comercial da classe dos inseticidas: somando-se as dosagens de todos os produtos desta classe tem-se 1,6875 kg/ha, sendo que o Arrivo 200 CE contribui com 0,1625 kg/ha. Logo, a quantidade de Arrivo 200 CE dentro do total de inseticidas foi estimada em 10%. Isto representa 0,28 kg/ha deste produto, e 56 g/ha do i.a. cipermetrina.

#### 4.2.2.1.5 Consumo de óleo diesel

O consumo de óleo diesel ocorre na operação das diversas máquinas agrícolas. A partir dos Anuários do Agrianual foi possível obter os valores de horas gastas pelos maquinários (horas máquina, ou HM), por hectare, para as diferentes operações que ocorrem no campo.

Para que esta informação em HM/ha possa ser convertida em consumo de óleo diesel, é necessário relacionar o tempo gasto pela operação agrícola com um consumo específico do combustível. Romanelli e Milan (2010) indicam um consumo específico de óleo diesel igual a  $0,163 \text{ L.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$ , valor este que independe do tipo de máquina agrícola.

Os Anuários do Agrianual indicam ainda o tipo de maquinário de acordo com sua potência em CV, o que requereu a conversão do consumo de  $0,163 \text{ L.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$  para  $0,12 \text{ L.CV}^{-1}.\text{h}^{-1}$ , considerando que 1 kW equivale a 1,36 CV.

Com base na potência de cada maquinário, nas horas gastas para cada operação e no consumo específico de óleo diesel, foi possível estimar os consumos de óleo diesel, por operação agrícola, indicados a seguir:

- ✓ Manutenção dos terraços: 1,44 l/ha (SP e MT);
- ✓ Calagem: 3,12 l/ha (SP) 7,80 l/ha (MT);
- ✓ Plantio: 9,36 l/ha (SP) e 7,92 l/ha (MT);
- ✓ Aplicação de pesticidas: 7,80 l/ha (SP) e 5,83 l/ha (MT);
- ✓ Colheita: 15,96 l/ha (SP) e 12,00 l/ha (MT); e
- ✓ Transportes internos: 5,76 l/ha (SP) e 6,91 l/ha (MT).

#### 4.2.2.1.6 Uso do Solo

Para a quantificação do uso do solo pela cultura da soja, foi utilizada a metodologia empregada por Nemecek e Käji (2007). Para tanto, informações acerca do acréscimo de área plantada entre anos sucessivos, bem como qual era o uso anterior do solo no qual a soja avançou são necessárias.

Os valores de área em cada safra foram coletados junto à CONAB. No entanto, informações consistentes a respeito do tipo de solo anterior à instalação da soja, dentro do período considerado neste estudo e para os estados avaliados não foram encontradas, apesar da busca em diversas publicações (nacionais e internacionais) e a consulta a diversas instituições (Embrapa, INPE, IBGE, entre outras). Walter et. al (2011) reforçam que a avaliação do uso do solo no Brasil é prejudicada pela falta de bases de dados nacionais adequadas, o que implica que esforços precisam ser feitos para que resultados confiáveis a respeito deste assunto possam ser gerados.

Ocorre que para a modelagem do uso do solo é preciso definir este uso anterior, seja ele: vegetação nativa, pastagem ou área agrícola de outra cultura, e diante da falta de informação confiável foi necessário adotar uma hipótese de qual era o uso do solo antes da cultura de soja ser estabelecida.

Primeiramente, buscou-se identificar se há comprovação da contribuição da soja para o desmatamento da Floresta Amazônica – este bioma é encontrado no estado do Mato Grosso.

Um acordo promovido entre a ABIOVE (Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais) e a ANEC (Associação Nacional dos Exportadores de Cereais), juntamente com suas respectivas associadas, estabeleceu o comprometimento de não se comercializar a soja produzida em áreas do Bioma Amazônia, desmatadas após a data de 24 de julho de 2006 (ABIOVE, 2007).

Anualmente, a ABIOVE divulga relatórios deste monitoramento, sendo que o primeiro, referente à safra 2007/2008, indicou que no estado do Mato Grosso houve 33.502, 28 ha desmatados, porém sem a presença de soja nestas áreas (GLOBALSAT, 2008). No segundo e terceiro relatório de monitoramento, a área plantada com soja em relação à área total desmatada no estado representou 0,83% e 0,75% (GLOBALSAT, 2009, 2010). Na última safra de 2010/2011, a relação entre a área de soja e o total desmatado alcançou 1,22% (GLOBALSAT, 2011).

Com base nos dados divulgados por estes relatórios de monitoramento da Moratória da Soja, julgou-se que a soja não é a razão motivadora do desmatamento da Amazônia e, portanto, para o presente estudo foi desconsiderada a Floresta Amazônica como um dos usos anteriores do solo para a produção de soja.

Adotada a premissa de não plantio de soja sobre o bioma Amazônia, a decisão sobre qual o uso do solo substituído recaiu sobre: pastagens; ou áreas com outra cultura agrícola. Rudorff et al. (2011) e WWF (2011) defendem a predominância do avanço da soja sobre áreas de pastagens, situação esta escolhida para o estudo. Segundo Silva (2009), o avanço de novas áreas agrícolas sobre pastagens é justificado pelo fato destas terras serem mais baratas do que as terras ocupadas com outras culturas e o investimento inicial significativamente menor do que o de limpeza e preparo de áreas ocupadas com vegetação nativa.

Assim, a presente modelagem de transformação do solo considerou que o acréscimo de área plantada se deu exclusivamente sobre áreas de pastagens, caracterizando uma “transformação **de** pastagem” para “transformação **para** terra arável”. A transformação do uso do solo é quantificada em m<sup>2</sup>.

A classificação acima é válida para as novas incorporações de área entre uma safra e a seguinte, e no caso da área que se manteve com a produção de soja, a situação é caracterizada como “transformação **de** terra arável” para “transformação **para** terra arável”.

Além dos tipos de transformação, a questão do uso do solo quantifica também a ocupação do meio físico. A ocupação do uso do solo foi calculada considerando um período de cultivo de meio ano (6 meses) e a produtividade do estado. Este aspecto é classificado como “ocupação, terra arável, não irrigada” e é medido em m<sup>2</sup>\*ano.

A Tabela 22 apresenta os valores absolutos de área e respectivas transformações a partir de pastagem e terra arável. Na Tabela 23 são indicados os valores médios de transformação e ocupação do solo estimados neste inventário.

**Tabela 22 – Valores absolutos de área e transformação do solo entre as safras 2007/2008 e 2010/2011**

Uso do Solo	MT		SP	
Área Total em 2011 (mil ha)	6.398,80		612,80	
Área Total em 2010 (mil ha)	6.224,50		572,20	
Área Total em 2009 (mil ha)	5.828,20		531,30	
Área Total em 2008 (mil ha)	5.675,00		526,00	

Transformação de pastagem 2011-2010 (mil ha)	174,30	40,60
Transformação de pastagem 2010-2009 (mil ha)	396,30	40,90
Transformação de pastagem 2009-2008 (mil ha)	153,20	5,30
Transformação de terra arável 2011-2010 (mil ha)	6.224,50	572,20
Transformação de terra arável 2010-2009 (mil ha)	5.828,20	531,30
Transformação de terra arável 2009-2008 (mil ha)	5.675,00	526,00
Transformação de pastagem 2011-2010 (% da área total de cultivo)	2,7%	6,6%
Transformação de pastagem 2010-2009 (% da área total de cultivo)	6,4%	7,1%
Transformação de pastagem 2009-2008 (% da área total de cultivo)	2,6%	1,0%
Transformação de terra arável 2011-2010 (% da área total de cultivo)	97,3%	93,4%
Transformação de terra arável 2010-2009 (% da área total de cultivo)	93,6%	92,9%
Transformação de terra arável 2009-2008 (% da área total de cultivo)	97,4%	99,0%

**Tabela 23 – Valores médios de transformação e ocupação do solo pela soja**

Uso do Solo	MT	SP
Transformação de pastagem 2011-2008 (m <sup>2</sup> /kg soja)	0,1287	0,1914
Transformação de terra arável 2011-2018 (m <sup>2</sup> /kg soja)	3,1520	3,5926
Transformação para terra arável 2011-2018 (m <sup>2</sup> /kg soja)	3,2807	3,7840
Ocupação, terra arável, não irrigada (m <sup>2</sup> .a/ kg soja)	1,6088	1,8572

#### 4.2.2.1.7 Captura de CO<sub>2</sub>

Segundo Frischknecht e Jungbluth (2007), a captura de carbono deve ser inventariada na forma de CO<sub>2</sub>, como um recurso natural. Por sua vez, as emissões de CO<sub>2</sub>, CO e CH<sub>4</sub> decorrentes de produtos renováveis devem ser registradas como biogênicas.

A captura de CO<sub>2</sub> durante o crescimento da soja foi estimada tomando como base o conteúdo de carbono no grão colhido. Assumiu-se que toda a quantidade de carbono foi incorporada ao grão via absorção do CO<sub>2</sub> durante o seu período de desenvolvimento (Nemecek; Käji, 2007). Para o conteúdo de carbono no grão foi adotado o valor reportado por Aita e Giacomini (2006), que equivale a 0,42 kg C/kg de grão. Dessa forma, a captura de CO<sub>2</sub> adotada neste estudo corresponde a 1,54 kg CO<sub>2</sub>/kg de grão.

#### 4.2.2.1.8 Emissões para o Ar



As emissões atmosféricas estimadas neste estudo são aquelas que decorrem do uso de fertilizantes, fundamentalmente emissões de compostos nitrogenados ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  e  $\text{NO}_x$ ), e da transformação do solo, neste caso emissões de  $\text{CO}_2$ . A aplicação de calcário também libera emissões de  $\text{CO}_2$  para o ar, cuja emissão foi estimada. As emissões para o ar decorrentes da queima do óleo diesel nas máquinas agrícolas e nos modais de transporte de carga estão contidas nos inventários deste elementos, retirados de banco de dados.

A emissão de  $\text{NH}_3$  foi calculada de acordo com EPFL (2011) e se baseia na quantidade de fertilizante mineral nitrogenado utilizado e em um fator de emissão para o fertilizante, conforme a Equação 3.

$$NH_3 = \frac{\sum N_{fert} * FE_{fert} * 17/14}{Produtividade} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

$\text{NH}_3$ : emissão de  $\text{NH}_3$  do uso de fertilizantes minerais [ $\text{kg NH}_3/\text{kg}$  soja];

$N_{fert}$ : entrada de N a partir de fertilizante mineral [ $\text{kg N/ha}$ ] (ver item 4.2.2.1.3);

$FE_{fert}$ : fator de emissão do fertilizante [%]. Segundo EPFL (2011), para fertilizantes compostos, que é o caso do MAP, o fator de emissão equivale a 4%;

17/14: fator de conversão de N para  $\text{NH}_3$ ; e

Produtividade: produção de soja por hectare [ $\text{kg soja/ha}$ ] (ver item 4.2.2.1.1).

A emissão de  $\text{N}_2\text{O}$  foi estimada de acordo com EPFL (2011) por meio da Equação 4:

$$N_2O = \frac{\frac{44}{28} * \{0,01 * (N_{total} + N_{res.veg.}) + 0,01 * \frac{14}{17} * NH_3 + 0,0075 * \frac{14}{62} * NO_{3-}\}}{Produtividade} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

$\text{N}_2\text{O}$ : emissão de  $\text{N}_2\text{O}$  [ $\text{kg N}_2\text{O/kg}$  de soja];

44/28: fator de conversão de N para  $\text{N}_2\text{O}$ ;

$N_{total}$ : entrada de N a partir de fertilizante mineral [ $\text{kg N/ha}$ ] (ver item 4.2.2.1.3);

$N_{res.veg.}$ : nitrogênio contido nos restos vegetais [ $\text{kg N/ha}$ ]. Segundo Embrapa (2010), equivale a 0,032  $\text{kg N}$  por  $\text{kg}$  de soja;

17/14: fator de conversão de N para  $\text{NH}_3$ ;

$\text{NH}_3$ : emissão de  $\text{NH}_3$  do uso de fertilizantes minerais [ $\text{kg NH}_3/\text{ha}$ ]. Ver Equação 3;

14/62: fator de conversão de N para  $\text{NO}_3^-$ ;

$\text{NO}_3^-$ : perdas de nitrogênio na forma de nitrato [kg  $\text{NO}_3^-$ /ha]. Verificar as estimativas indicadas na Equação 11;

Produtividade: produção de soja por hectare [kg soja/ha] (ver item 4.2.2.1.1).

A emissão de  $\text{NO}_x$  foi estimada com base no valor da emissão de  $\text{N}_2\text{O}$ , multiplicando-se esta última por um fator de emissão equivalente a 21% (EPFL, 2011).

A emissão de  $\text{CO}_2$ , por sua vez, decorre da modificação no uso do solo, levando-se em consideração o tipo de solo anterior à instalação da cultura de soja. Para a estimativa desta emissão, foi adotado o método sugerido por Comissão Européia (2009; 2010b), conforme Equação 5.

$$\text{CO}_2^i = (\text{CS}_R - \text{CS}_A) * 1000 * \frac{44}{12} * \frac{1}{20} \quad \text{(Equação 5)}$$

Onde:

$\text{CO}_2^i$ : emissões de  $\text{CO}_2$  da mudança do uso do solo (kg  $\text{CO}_2$ /ha desmatado);

$\text{CS}_R$ : estoque de carbono na área de referência (uso anterior) do uso do solo. Inclui tanto o carbono da biomassa quanto do solo (t C/ha);

$\text{CS}_A$ : estoque de carbono na área atual do uso do solo. Inclui tanto o carbono da biomassa quanto do solo (t C/ha);

44/12: fator de conversão de C para  $\text{CO}_2$ ;

1/20: período de 20 anos no qual as emissões totais são anualizadas.

Os valores de  $\text{CS}_R$  e  $\text{CS}_A$  são calculados considerando-se o estoque de carbono contido: no solo (chamado SOC); e na vegetação (nomeada  $C_{\text{VEG}}$ ). No presente estudo adotou-se a abordagem conhecida como *Tier 1*, que faz uso de valores genéricos e globais para estimar o estoque de carbono neste dois compartimentos.

Para o cálculo do SOC, a Equação 6 é utilizada:

$$\text{SOC} = \text{SOC}_{ST} * F_{LU} * F_{MG} * F_I \quad \text{(Equação 6)}$$

Onde:

SOC: estoque de carbono no solo [t C/ha];

$SOC_{ST}$ : estoque de carbono no solo orgânico entre 0 e 30 cm de profundidade [t C/ha];

$F_{LU}$ : fator de variação de estoque de carbono para um dado tipo de solo [adimensional];

$F_{MG}$ : fator de variação de estoque de carbono para determinado sistema de manejo [adimensional];

$F_I$ : fator de variação de estoque de carbono para entrada de material orgânico [adimensional].

De acordo com Comissão Europeia (2010b), o valor de  $SOC_{ST}$  depende da região climática e do tipo de solo considerado. Para os estados considerados na presente avaliação, a classificação da região climática é *Tropical moist*. No que se refere ao tipo de solo, as opções indicadas são: alta atividade de argila, baixa atividade de argila, arenoso, vulcânico ou pântano. Não foram encontradas informações que separam os solos brasileiros segundo estas classificações; decidiu-se adotar o tipo baixo teor de argila, após a consulta a alguns especialistas da área, que relataram o predomínio deste tipo no território nacional. Assumido o solo com baixo teor de argila, o valor indicado para  $SOC_{ST}$  é 47 t C/ha.

Em relação aos fatores envolvidos na Equação 5, os mesmos dependem da região climática, do tipo de solo e das práticas de manejo. No que se refere ao uso do solo de referência, assumiu-se que o mesmo é área de pastagem, do tipo moderadamente degradada com nível médio de manejo. Com base nestas premissas, os valores de  $F_{LU}$ ,  $F_{MG}$  e  $F_I$  sugeridos são 1,0; 0,97; e 1,0, respectivamente.

Para o uso atual do solo (soja), o sistema de manejo adotado é o plantio direto com nível médio de manejo. Dessa forma,  $F_{LU}$ ,  $F_{MG}$  e  $F_I$  correspondem, respectivamente, a 0,48; 1,22; e 1,0.

Assim como no caso do estoque de carbono no solo, o estoque na vegetação ( $C_{VEG}$ ) também está diretamente relacionado ao tipo de uso do solo em consideração. Para culturas anuais, como é o caso da soja, considera-se que o estoque de carbono na vegetação é nulo, enquanto que para áreas de pastagens o valor sugerido é 8,1 t C/ha.

Determinados os valores de SOC e  $C_{VEG}$ , calculam-se individualmente os valores de  $CS_R$  e  $CS_A$  (soma de SOC e  $C_{VEG}$ ) para cada um dos usos do solo (referência e atual), e estes são utilizados para estimar as emissões de  $CO_2$ .

Cabe destacar dois pontos relevantes em relação à Equação 5: a) as emissões devem ser anualizadas por um período de vinte anos; e b) as emissões são referentes ao desmatamento de um hectare de determinado tipo de solo. Estas duas observações demandaram a necessidade do levantamento de dados das safras compreendidas entre 1991/92 e 2010/11, particularmente das áreas em cada safra deste período.

Portanto, ao analisar-se a área da safra atual (2010/11) percebe-se que a mesma é uma composição de uma parcela que já existia há vinte anos e de outra que foi se expandindo no mesmo período. O valor final das emissões de  $CO_2$  adotadas neste estudo considerou estas duas situações e representa apenas as emissões decorrentes do uso do solo entre as safras de 1991/92 e 2010/11.

Dessa forma, as emissões de  $CO_2$ , por quilo de soja produzida, foram estimadas de acordo com a Equação 7.

$$CO_2^f = \frac{CO_2^i * \sum_{i=1}^{20} (Área_{i+1} - Área_i)}{Produtividade} \quad \text{(Equação 7)}$$

Onde:

$CO_2^f$ : emissões de  $CO_2$  da mudança do uso do solo ( $kg\ CO_2/kg_{soja}$ );

$CO_2^i$ : emissões de  $CO_2$  da mudança do uso do solo ( $kg\ CO_2/ha$  desmatado). Ver Equação 5;

i: ano da safra 1991/92;

Área: área com soja (ha);

Produção: produção de soja ( $kg$  soja) na safra 2010/11.

A Tabela 24 apresenta as estimativas de emissões de  $CO_2$  associadas à produção de soja que decorrem da modificação do uso do solo.

**Tabela 24 – Emissões estimadas de  $CO_2$  decorrentes do uso do solo pela soja**

Parâmetro	SP	MT
$CO_2^i$ ( $kg/ha_{desmatado}$ )	4.797,2	4.797,2
$\Sigma \Delta Área$ (mil $ha_{desmatado}$ )	490,7	6.461,0
Produção em 2010/11 (milhões t)	1,7	20,4

CO<sub>2</sub><sup>†</sup> (kg/kg<sub>soja</sub>)

1,38

1,52

Além do CO<sub>2</sub> emitido pela transformação do solo, outra parcela deste gás é lançada para o ar e decorre da aplicação de calcário no solo. Segundo IPCC (2006), 13% da entrada de calcário é liberada para a atmosfera na forma de carbono. Multiplicando-se esta emissão por 44/12, tem-se a emissão de CO<sub>2</sub> a partir do uso de calcário.

#### 4.2.2.1.9 Emissões para o Solo

As emissões para o solo estimadas neste inventário foram pesticidas e metais pesados. Para o caso dos pesticidas, adotou-se como premissa que todo o defensivo agrícola aplicado durante o crescimento da soja acaba por atingir o meio ambiente na forma de emissões para o solo. Esta premissa é a mesma adotada por Jungbluth (2007).

Como emissões para o solo também foram considerados os metais pesados. A quantidade do metal que atinge o solo foi estimada segundo a Equação 8.

$$\mathbf{Metal\ Pesado}_i = \mathbf{MAP}_i + \mathbf{TSP}_i + \mathbf{SSP}_i + \mathbf{Calcário}_i - \mathbf{Grão}_i \quad (\text{Equação } 8)$$

Onde:

i: tipo de metal pesado;

Metal Pesado<sub>i</sub>: emissão para o solo do metal pesado i [kg i/kg soja];

MAP<sub>i</sub>: teor do metal pesado i, advindo da aplicação de fertilizante MAP [kg i/kg soja];

TSP<sub>i</sub>: teor do metal pesado i, advindo da aplicação de fertilizante TSP [kg i/kg soja];

SSP<sub>i</sub>: teor do metal pesado i, advindo da aplicação de fertilizante SSP [kg i/kg soja];

Calcário<sub>i</sub>: teor do metal pesado i, advindo da aplicação de calcário [kg i/kg soja];

Grão<sub>i</sub>: teor do metal pesado i armazenado do grão colhido [kg i/kg soja].

Barakat (2011) define metais pesados como sendo aqueles cuja densidade ultrapassa o valor de 5 g/cm<sup>3</sup>, e apesar de um grande número de elementos se enquadrarem nesta definição, os mais relevantes dentro do contexto ambiental são: arsênico; cádmio; cromo; cobre; níquel; zinco; chumbo; e mercúrio. Para este estudo, decidiu-se utilizar o mesmo conjunto de metais pesados definido por este autor.

Todos os fertilizantes empregados na agricultura brasileira possuem parcela de importação. Para determinar as participações da produção brasileira e da importação, foram adotados valores do Anuário Estatístico da Anda, referente aos anos de 2009 e 2010 (ANDA, 2011).

O teor de metais pesados nos fertilizantes e no calcário de origem nacional foi coletado junto de Gabe e Rodella (1999). Para os produtos importados, adotaram-se os teores de Nemecek e Káji (2007). A quantidade de metais no grão de soja foi estimada com base em Embrapa (2010).

As contribuições da produção nacional e importação, bem como os teores de metais pesados adotados neste estudo estão indicadas na Tabela 25.

A Tabela 26 apresenta os valores calculados de emissões de metais pesados para o solo

**Tabela 25 – Origem e teor de metais pesados de produtos agrícolas utilizadas na soja**

<b>Dado</b>	<b>Calcário</b>	<b>MAP</b>	<b>SSP</b>	<b>TSP</b>	<b>KCl</b>	<b>Fonte</b>
Prod. Nacional (%)	100	52	95	47	13	Anda (2011)
Importação (%)	0	48	5	53	87	Anda (2011)
Teor de Cd de produto nacional (mg/kg)	0,0	2,5	3,0	2,6	0	Gabe; Rodella (1999)
Teor de Cd de produto importado (mg/kg)	0,12	24,63	9,47	46,35	0,06	Nemecek; Käji (2007)
Teor de Pb de produto nacional (mg/kg)	0,0	9,0	86,0	9,0	0	Gabe; Rodella (1999)
Teor de Pb de produto importado (mg/kg)	3,6	23,72	104,21	3,12	5,5	Nemecek; Käji (2007)
Teor de Ni de produto nacional (mg/kg)	0	4,0	47,0	4,0	0	Gabe; Rodella (1999)
Teor de Ni de produto importado (mg/kg)	12,2	48,22	18,95	39,22	2,1	Nemecek; Käji (2007)
Teor de Cu de produto nacional (mg/kg)	6,0	12,0	27,0	18,0	0	Gabe; Rodella (1999)
Teor de Cu de produto importado (mg/kg)	4,0	56,75	21,79	40,11	5,0	Nemecek; Käji (2007)
Teor de Zn de produto nacional (mg/kg)	7,0	16,0	173,0	17,0	0	Gabe; Rodella (1999)
Teor de Zn de produto importado (mg/kg)	8,0	360,63	153,47	266,5	46,0	Nemecek; Käji (2007)
Teor de Cr de produto nacional (mg/kg)	9,9	12,0	29,0	14,0	0	Gabe; Rodella (1999)
Teor de Cr de produto importado (mg/kg)	314,0	282,94	61,58	232,63	2,0	Nemecek; Käji (2007)
Teor de Cd na soja (mg/kg)			0,0			Embrapa (2010b)
Teor de Pb na soja (mg/kg)			0,0			Embrapa (2010b)
Teor de Ni na soja (mg/kg)			0,0			Embrapa (2010b)
Teor de Cu na soja (mg/kg)			10,0			Embrapa (2010b)
Teor de Zn na soja (mg/kg)			40,0			Embrapa (2010b)
Teor de Cr na soja (mg/kg)			0,0			Embrapa (2010b)

**Tabela 26 – Emissões de metais pesados para o solo pela cultura da soja**

<b>Tipo de metal pesado</b>	<b>MT</b>	<b>SP</b>
Cd (mg/kg de soja)	0,71839	0,54561
Pb (mg/kg de soja)	4,57536	3,47494
Ni (mg/kg de soja)	2,98787	2,26926
Cu (mg/kg de soja)	-6,38681	-6,96258
Zn (mg/kg de soja)	-23,20580	-26,90286
Cr (mg/kg de soja)	8,14731	6,67164

Para o caso das emissões que apresentaram valores negativos, a premissa é que houve uma captura por parte do grão maior do que a quantidade que foi adicionada por meio da aplicação de calcário e fertilizantes. Tal fato é justificado pela absorção desta diferença a partir de uma quantidade do metal que estava armazenada no solo antes do início do plantio da soja (JUNGBLUTH, 2007).

#### 4.2.2.1.10 Emissões para a Água

As emissões para a água decorrem do uso de fertilizantes no campo e se manifestam na forma de liberações de fósforo (P) – para água subterrânea e água superficial – e nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) para água subterrânea.

A emissão de P para água subterrânea foi calculada por meio da Equação 9, segundo Nemecek e Käji (2007):

$$P_{sub} = \frac{P_{lixiviado} * (1 + \frac{0,2}{80} * P_{2O5\text{efluente}})}{Produtividade} \quad (\text{Equação 9})$$

Onde:

$P_{sub}$ : quantidade de P para água subterrânea [kg P/kg soja];

$P_{lixiviado}$ : quantidade média de P lixiviado para água subterrânea para uma dada categoria de uso do solo [kg/ha]. Para terra arável, o valor sugerido é 0,07 kg/(ha\*a);

$P_{2O5\text{efluente}}$ : quantidade de  $P_2O_5$  contido em efluentes utilizados como fertilizante [kg  $P_2O_5\text{efluente}$  /ha]; e

Produtividade: produção de soja por hectare [kg soja/ha].

Como não se utilizam efluentes, por exemplo, vinhaça, como substitutos de fertilizantes minerais, o valor de  $P_{2O5\text{efluente}}$  equivale a zero.



Para o fósforo também foi estimada a emissão para a água superficial, que pode ocorrer através do escoamento direto das águas pluviais ou do solo erodido pela chuva (NEMECEK, T.; KÄGI, 2007). A parcela de P para a água superficial pelo escoamento da água pluvial é calculada pela Equação 10.

$$P_{\text{sup\_esc}} = \frac{P_{\text{esc\_US}} * (1 + \frac{0,2}{80} * P_{2O5\text{fert\_min}} + \frac{0,7}{80} * P_{2O5\text{eflu}} + \frac{0,4}{80} * P_{2O5\text{res\_animais}})}{\text{Produtividade}} \quad (\text{Equação 10})$$

Onde:

$P_{\text{sup\_esc}}$ : quantidade de P para água superficial por escoamento [kg P/kg soja];

$P_{\text{esc\_US}}$ : quantidade média de P escoado para água superficial para uma dada categoria de uso do solo [kg/ha]. Para terra arável, o valor sugerido é 0,175 kg/(ha\*a);

$P_{2O5\text{fert\_min}}$ : quantidade de  $P_2O_5$  contido em fertilizantes minerais [kg  $P_2O_{5\text{fert\_min}}$  /ha] (ver item 4.2.2.1.3);

$P_{2O5\text{eflu}}$ : quantidade de  $P_2O_5$  contido em efluentes utilizados como fertilizante [kg  $P_2O_{5\text{eflu}}$  /ha];

$P_{2O5\text{res\_animais}}$ : quantidade de  $P_2O_5$  contido em resíduos animais utilizados como fertilizante [kg  $P_2O_{5\text{res\_animais}}$  /ha]; e

Produtividade: produção de soja por hectare [kg soja/ha] (ver item 4.2.2.1.1).

Assim como não há uso de  $P_{2O5\text{eflu}}$  como fertilizante, também foi assumido que não há aplicação de resíduos animais ( $P_{2O5\text{res\_animais}}$ ) como fonte de fósforo para a soja.

Para o cálculo da outra parcela de emissão de P para a água superficial – originada da erosão do solo – inicialmente tentou-se usar o procedimento de cálculo indicado por Nemecek e Kägi (2007). No entanto, o modelo proposto aparentou não ser válido para as condições brasileiras, uma vez que levou a valores discrepantes desta emissão.

Decidiu-se então utilizar o modelo proposto por Emmenegger, Reinhard e Zah (2009), que calcula a emissão de P para água superficial pela erosão do solo por meio da Equação 11.

$$P_{\text{sup\_ero}} = S_{\text{perda}} * r * e * C * \frac{d}{12} * \frac{1}{\text{Produtividade}} \quad (\text{Equação 11})$$

Onde:

$P_{sup\_ero}$ : quantidade de P para água superficial por erosão [kg P/kg soja];

$S_{perda}$ : perda anual de solo, cultivado com a soja, por erosão [t solo/(ha.a)];

r: fração da perda de fósforo que efetivamente alcança a água superficial [adimensional]. Valor padrão sugerido igual a 0,2;

e: fator de enriquecimento [adimensional]. Valor padrão sugerido igual a 2;

C: concentração do fósforo no solo [kg P/t solo]. Valor padrão sugerido igual a 1;

d: duração do cultivo [meses];

Produtividade: produção de soja por hectare [kg soja/ha] (ver item 4.2.2.1.1).

Segundo Cavalett (2008), 17 toneladas de solo são perdidas anualmente nos locais onde a soja é cultivada. O autor não relata a cobertura geográfica desta informação, mas adotou-se que o dado é válido para as condições do presente estudo. A duração do cultivo da soja adotada foi de quatro meses.

A emissão de nitrato ( $NO_3^-$ ) para a água subterrânea foi estimada de acordo com Jungbluth (2007):

$$NO_{3-} = N_{ent} * FE * \frac{62}{14} \quad \text{(Equação 12)}$$

Onde:

$NO_{3-}$ : emissão de  $NO_{3-}$  para água subterrânea [kg $NO_{3-}$ /kg soja];

$N_{ent}$ : entrada total de N [kg N/kg soja]. Considera a entrada a partir de fertilizantes e FBN (ver item 4.2.2.1.3). O valor de fixação biológica de nitrogênio adotado foi 0,08 kg N/kg soja (EMBRAPA, 2010b); e

FE: fator de emissão. Valor sugerido igual a 0,3;

62/14: fator de conversão de N para  $NO_{3-}$ .

#### 4.2.2.1.11 Transportes

Foram considerados os transportes de calcário e fertilizantes minerais, dos locais de produção até o campo. Conforme reportado no item 4.2.2.1.9, os fertilizantes consumidos no Brasil apresentam uma parcela de importação, que também foi considerada – tanto o transporte no país exportador quanto o deslocamento marítimo até o Brasil.

Informações sobre os principais países exportadores de cada tipo de fertilizante foram obtidas junto ao sistema *AliceWeb*<sup>11</sup>, disponibilizado no site do Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior.

As distâncias entre os portos, do país exportador até o porto de Santos – este assumido como aquele que recebe o material a ser aplicado na cultura da soja – foram medidas com auxílio do site *Sea-Rates*<sup>12</sup>. A distância final assumida foi estimada pela média ponderada – os fatores de ponderação foram calculados por meio da quantidade importada de cada país em relação ao total importado pelo Brasil.

Para o transporte do porto de Santos até o campo agrícola, as distâncias foram calculadas por meio do site *Google Maps*<sup>13</sup>. Todas as distâncias entre o porto e os municípios produtores do estado foram consideradas, e a distância final foi estimada pela média ponderada – os fatores de ponderação foram calculados por meio da produção do município em relação ao total do estado.

Segundo Abiquim (2011), a produção brasileira de fertilizantes é dominada pela empresa Vale Fertilizantes, que possui unidades fabris nos municípios de Catalão (GO) e Cubatão (SP). Assumiu-se que Catalão abastece Mato Grosso com todos os fertilizantes, com exceção do KCl; Cubatão fornece todos os fertilizantes para a produção de soja em São Paulo, além do KCl para o Mato Grosso. A distância final ponderada, entre Cubatão e os municípios produtores, foi calculada da mesma forma descrita no parágrafo anterior.

A respeito do transporte de calcário, buscou-se identificar o principal município produtor do estado junto ao Anuário Mineral Brasileiro, elaborado pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM, 2011). Para o estado de São Paulo o município é Ribeira Grande; para Mato Grosso, o município de Nobres. A distância final também foi calculada por média ponderada.

---

<sup>11</sup> <http://aliceweb.desenvolvimento.gov.br/>

<sup>12</sup> <http://www.searates.com/reference/portdistance>

<sup>13</sup> <https://maps.google.com.br/>

**Tabela 27 – Distâncias de transporte dos insumos agrícolas da soja**

<b>Origem-destino</b>	<b>Calcário</b>	<b>MAP</b>	<b>SSP</b>	<b>TSP</b>	<b>KCI</b>	<b>Fonte</b>
Produção no país exportador-porto de exportação (km)	-	50	50	50	50	Frischknecht e Jungbluth (2007)
Porto exportador-porto de Santos (km) <sup>a</sup>	-	10.407	12.287	12.625	7.465	<i>Google Maps</i>
Porto de Santos-municípios produtores de soja em SP (km) <sup>b</sup>	-	472	472	472	472	<i>Google Maps</i>
Porto de Santos-municípios produtores de soja no MT (km) <sup>b</sup>	-	1.850	1.850	1.850	1.850	<i>Google Maps</i>
Cubatão-municípios produtores de soja em SP (km) <sup>b</sup>	-	462	462	462	462	<i>Google Maps</i>
Cubatão-municípios produtores de soja no MT (km) <sup>b</sup>	-	-	-	-	1.840	<i>Google Maps</i>
Catalão-municípios produtores de soja no MT (km) <sup>b</sup>	-	1.850	1.850	1.850	-	<i>Google Maps</i>
Ribeira Grande-municípios produtores de soja em SP (km) <sup>b</sup>	353	-	-	-	-	<i>Google Maps</i>
Nobres-municípios produtores de soja no MT (km) <sup>b</sup>	395	-	-	-	-	<i>Google Maps</i>

Notas: <sup>a</sup>: distância ponderada de acordo com os principais países exportadores do produto para o Brasil.

<sup>b</sup>: distância ponderada de acordo com os principais municípios produtores de soja no estado.

#### 4.2.2.1.12 Banco de dados utilizado

Conforme indicado no item 4.2.2.1, foram adotados elementos do banco de dados *Ecoinvent* para representar o inventário da produção de alguns produtos. A Tabela 28 indica estes produtos, bem como quais elementos do banco de dados foram utilizados.

**Tabela 28 – Elementos do *Ecoinvent* adotados na produção de soja**

Nome	Elemento do <i>Ecoinvent</i>
Calcário	<i>Limestone, milled, loose, at plant/CH U</i>
Semente	<i>Soybean seed, at regional storehouse/BR U<sup>a</sup></i>
MAP	<i>Monoammonium phosphate, as P2O5, at regional storehouse</i>
SSP	<i>Single superphosphate, as P2O5, at regional storehouse/RER U</i>
TSP	<i>Triple superphosphate,, as P2O5, at regional storehouse/RER U</i>
KCl	<i>Potassium chloride, as K2O, at regional storehouse/RER U</i>
Acefato	<i>Organophosphorus-compounds</i>
Cipermetrina	<i>Pyretroid-compounds</i>
Metamidafós	<i>Organophosphorus-compounds</i>
Carbendazim	<i>Benzimidazole-compounds</i>
Tebuconazol	<i>Cyclic N-compounds</i>
Piraclostrobina	<i>[Thio]carbamate-compounds</i>
Epoxiconazole	<i>Cyclic N-compounds</i>
Glifosato	<i>Glyphosate</i>
2,4-D	<i>2,4-D</i>
S-Metacloro	<i>Metolachlor</i>
Bentazona	<i>Herbicides (unspecified)</i>
Sulfluramida	<i>Pesticides (unspecified)</i>
Endosulforan	<i>Insecticides (unspecified)</i>
Manutenção dos terraços	<i>Tillage, rolling/CH U</i>
Calagem	<i>Fertilising, by broadcaster/CH U</i>
Plantio	<i>Sowing/CH U</i>
Aplicação de defensivos	<i>Application of plant protection products, by field sprayer/CH U</i>
Colheita mecanizada	<i>Combine harvesting/CH U</i>
Transportes internos	<i>Transport, van &lt;3.5t/RER U</i>
Transporte rodoviário	<i>Lorry 16-32t, EURO 5/RER U e Lorry 16-32t, EURO 3/RER U</i>
Transporte oceânico	<i>Transoceanic freight ship/OCE U</i>

Notas: <sup>a</sup>Inventário adaptado de *Pea seed, at regional storehouse/RER U*

#### 4.2.2.1.13 Inventário Consolidado da produção de soja

A Tabela 29 apresenta o inventário da produção de 1 kg de soja.

**Tabela 29 – Inventário da produção de 1 kg de soja**

Entradas/saídas	Unidade	Quantidade	
		SP	MT
<i>Entradas</i>			
Nitrogen, in air	kg	0,083	0,083
Carbon dioxide, in air	kg	1,540	1,540
Transformation, from pasture and meadow	m <sup>2</sup>	0,1914	0,1287
Transformation, from arable, non-irrigated	m <sup>2</sup>	3,5926	3,1520
Transformation, to arable, non-irrigated	m <sup>2</sup>	3,7840	3,2807
Occupation, arable, non-irrigated	m <sup>2</sup> .a	1,8572	1,6088
Soybean seed, at regional storehouse/BR U	kg	0,0260	0,0193
Monoammonium phosphate, as N, at regional storehouse/RER U	kg	0,0019	0,0024
Monoammonium phosphate, as P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , at regional storehouse/kg/RER	kg	0,0099	0,0130
Single superphosphate, as P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , at regional storehouse/RER U	kg	0,0061	0,0080
Triple superphosphate, as P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , at regional storehouse/RER U	kg	0,0025	0,0034
Potassium chloride, as K <sub>2</sub> O, at regional storehouse/RER U	kg	0,0186	0,0245
Limestone, crushed, for mill/CH U	kg	0,1857	0,1802
2,4-D, at regional storehouse/RER U	kg	0,00018	0,00015
Glyphosate, at regional storehouse/RER U	kg	0,00027	0,00024
Metolachlor, at regional storehouse/CH U	kg	0,00027	0,00023
Organophosphorus-compounds, at regional storehouse/RER U	kg	0,00025	0,00003
Pyretroid-compounds, at regional storehouse/CH U	kg	0,00002	0,000004
Benzimidazole-compounds, at regional storehouse/RER U	kg	0,00001	0,000008
Cyclic N-compounds, at regional storehouse/RER U	kg	0,00005	0,000036
[thio]carbamate-compounds, at regional storehouse/RER U	kg	0,00003	0,000020
Herbicides, at regional storehouse/RER U	kg	0,00013	0,000113

Insecticides, at regional storehouse/RER U	kg	0,00021	0,000038
Pesticide unspecified, at regional storehouse/RER U	kg	-	0,0000002
Tillage, rolling/CH U	ha	0,00014	0,00012
Fertilising, by broadcaster/CH U	ha	0,00018	0,00040
Sowing/CH U	ha	0,00076	0,00056
Application of plant protection products, by field sprayer/CH U	ha	0,00138	0,00089
Combine harvesting/CH U	ha	0,00015	0,00010
Transport, van <3.5t/RER U	t.km	0,00334	0,00347
Transport, transoceanic freight ship/OCE U	t.km	0,52001	0,68478
Transport, lorry 16-32t, EURO5/RER U	t.km	0,00230	0,00303
Transport, lorry 16-32t, EURO3/RER U	t.km	0,10885	0,28302
<i>Emissões para o Ar</i>			
Ammonia	kg	0,00009	0,00011
Dinitrogen monoxide	kg	0,00140	0,00141
Nitrogen oxides	kg	0,00029	0,00030
Carbon dioxide, land transformation	kg	1,37782	1,51846
Carbon dioxide, fossil	kg	0,08850	0,0859
<i>Emissões para a Água</i>			
Phosphorus, to river	kg	0,00092	0,00080
Phosphorus, to groundwater	kg	0,00003	0,00002
Nitrate	kg	0,02456	0,02473
<i>Emissões para o Solo</i>			
Glyphosate	kg	0,00104	0,00090
2,4-D	kg	0,00026	0,00022
Cypermethrin	kg	0,00083	0,00015
Acephate	kg	0,00018	0,00002
Carbendazim	kg	0,00045	0,00031
Pesticides, unspecified	kg	0,00010	0,00008
Cadmium	mg	0,5456	0,82933
Lead	mg	3,4749	5,28191
Nickel	mg	2,2693	3,44927
Copper	mg	-6,9626	-5,82884
Zinc	mg	-26,903	-20,6124
Chromium	mg	6,6716	9,4054

#### 4.2.2.2 Subsistema de produção de óleo de soja

- a) Fonte dos dados: secundários;
- b) Cobertura Temporal: 2004 a 2008 – explicado adiante a razão desta diferença temporal. A exceção deste período ocorreu quando se fez uso do banco de dados, visto que o mesmo representa realidades anteriores à cobertura temporal deste ICV;
- c) Cobertura Geográfica: estados de São Paulo e Mato Grosso. Qualquer variação de ordem geográfica foi introduzida por conta do uso de banco de dados;
- d) Cobertura Tecnológica: extração de óleo exclusivamente por ação de solvente;
- e) Alocação: adotado o critério econômico. Para tanto, os valores de mercado do óleo bruto e do farelo foram calculados pela cotação mensal média entre os anos de 2007 e 2010, da bolsa de Chicago (ABIOVE, 2011). Os fatores de alocação para óleo e farelo foram estimados, respectivamente, em 37,6% e 62,4%.

Durante a coleta de dados do processo de extração de óleo de soja foram identificadas quatro publicações de interesse para este estudo. Os dados de entrada e saída de cada publicação encontram-se apresentados na Tabela 30.

**Tabela 30 – Referências consultadas com respectivos dados de extração do óleo de soja**

Dado	Unidade	Dorsa (2004)	Marzullo (2007)	Mourad (2008)	Cavalett (2008)
<b>ENTRADAS</b>					
Grão de soja	kg	1.000	1.000	1.000	1.000
Hexano	kg	1,2	1,4	0,7	1,2
Água	kg	730	600	435	720,8
Eletricidade	kWh	30	17,3	69,4	n.i.
Óleo Combustível	kg	19,87	-	51	-
Óleo Diesel	kg	-	-	-	17,92
Cavaco	kg	-	160	-	-
<i>Total de entradas</i>	kg	1731,2	1.601,4	1435,7	1722,05
<b>SAÍDAS</b>					
Óleo de soja	kg	170	190	190	180,21
Torta de soja <sup>a</sup>	kg	807	770	809,1	819,72
Vapor de água	kg	n.i.	n.i.	9	n.i.



Hexano	kg	1,2	1,4	0,7	1,2
Efluente	kg	753 <sup>4</sup>	640 <sup>4</sup>	426	720,8 <sup>d</sup>
COV <sup>b</sup>	kg	n.i.	1,4	n.i.	n.i.
MP <sup>c</sup>	kg	n.i.	1	n.i.	n.i.
<i>Total de saídas</i>	kg	1731,2	1.601,4	1434,8	1722,0

Notas: <sup>a</sup> incorpora as quantidades de cascas e lecitinas geradas no processo

<sup>b</sup> Compostos orgânicos voláteis

<sup>c</sup> Material Particulado

<sup>d</sup> Calculado para fechar o balanço de massa

n.i.: não indicado

Todas as publicações consultadas apresentam, de maneira geral, os mesmos dados de entrada e saída. Fundamentalmente, o que varia em cada uma é a fonte de energia para a geração de vapor d' água, variando desde alternativas fósseis (óleo combustível e óleo diesel) até opções renováveis (bagaço de cana e cavaco).

O uso de determinada fonte de combustível depende da disponibilidade e preço de mercado na região da planta industrial que utiliza este recurso. No entanto, não foram encontradas informações que reportassem qual a fonte de energia é característica das plantas industriais de esmagamento de soja nos estados em estudo.

Diante de tal indefinição, decidiu-se adotar para o presente estudo uma premissa conservadora, que admite o uso exclusivo de óleo combustível. Tal hipótese pode não refletir a realidade de algumas plantas industriais, mas foi tomada por se tratar de um cenário que, provavelmente, a maioria das plantas já experimentou (ou ainda adota) em algum momento da sua operação – as caldeiras mais antigas para originalmente consumiam óleo combustível.

Para efeito da modelagem deste ICV, considerou-se indiferente o uso de óleo combustível ou óleo diesel na geração de vapor, dado que estes combustíveis apresentam poder calorífico inferior (PCI) equivalente. Segundo EPE (2011), o PCI do óleo combustível e do óleo diesel são, respectivamente, 9.590 kcal/kg e 10.100 kcal/kg.

A definição do tipo de combustível a ser adotado neste estudo levou à exclusão do uso dos dados reportados em Marzullo (2007), visto que o processo de extração de óleo na referida publicação adota o uso de cavaco com fonte energética.

Mourad (2008) considera o uso de óleo combustível como entrada para a geração de vapor, porém utiliza grande parte dos dados – dentre eles o consumo de óleo

diesel – de um estudo de ACV de biodiesel de soja publicado em 1998 e representativo da produção nos EUA. Em razão da avançada idade destas informações e da realidade para os quais elas são válidas, julgou-se que os dados reportados por esta autora não seriam representativos do contexto atual da produção de óleo soja.

Levando em consideração todo este arrazoado, a elaboração do ICV de extração de óleo de soja baseou-se na média dos dados indicados em Dorsa (2004) e Cavalett (2008).

A única adequação nos dados originais destas publicações diz respeito ao consumo de eletricidade. Cavalett (2008) considera esta entrada de energia insignificante no processo, enquanto Dorsa (2004) reporta um consumo de 0,18 kWh/kg de óleo. No presente estudo, adotou-se o mesmo valor indicado pelo último autor.

#### **4.2.2.2.1 Transportes**

Para a etapa de extração de óleo foram estimadas as distâncias de transporte do: grão de soja; óleo combustível; e hexano dos locais de produção até as plantas industriais de processamento da soja.

A respeito do transporte da soja, adotou-se a premissa que a soja não cruza as fronteiras estaduais para chegar à planta industrial de esmagamento, ou seja, o grão de soja é esmagado no mesmo estado do plantio. Tal premissa foi estabelecida após consulta a especialistas do setor, que indicaram que o processamento em estado diferente do produtor é desfavorável do ponto de vista financeiro, em razão da maior carga de impostos e custo de frete.

Estabelecida esta premissa, foram levantadas as empresas que possuem unidades industriais de esmagamento de soja em cada estado. Em São Paulo, as plantas se localizam nos municípios de Bauru, Bebedouro, Orlandia, Osvaldo Cruz, Paraguaçu Paulista, Santo Anastácio e São Joaquim da Barra. No Mato Grosso, em Alto Araguaia, Cuiabá, Lucas do Rio Verde, Nova Mutum, Primavera do Leste, Rondonópolis e Sorriso (ABIOVE, 2011).

Como local de produção de óleo combustível, identificou-se o município do Rio de Janeiro (PETROBRAS, 2011). Para o hexano, o município produtor é Itupeva (ABIQUIM, 2011).

A distância final de transporte de soja foi calculada pela média ponderada entre os municípios produtores da oleaginosa e as plantas de esmagamento localizadas no estado. Para os demais insumos, a distância calculada foi a média entre o município produtor do insumo e os municípios onde se localizam as unidades extratoras de óleo, conforme indicado na Tabela 31.

**Tabela 31 – Distâncias de transporte dos insumos da produção de óleo de soja**

Insumo	SP (km)	MT (km)
Grão de soja	291	440
Óleo combustível	866	2.022
Hexano	414	1.546

#### 4.2.2.2 Banco de dados utilizado

A Tabela 32 indica os produtos que fizeram uso do banco de dados *Ecoinvent*, bem como quais elementos do banco foram utilizados.

**Tabela 32 – Elementos do Ecoinvent adotados na produção de óleo de soja**

Nome	Elemento do Ecoinvent
Hexano	<i>Hexane, at plant/RER U</i>
Água	<i>Tap water, at user/RER U</i>
Óleo combustível queimado na caldeira	<i>Heat, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW/RER U</i>
Eletricidade	<i>Electricity, medium voltage, at grid/BR<sup>a</sup></i>
Transporte de soja e hexano	<i>Lorry 7,5-16t, EURO 3/RER U</i>
Transporte de óleo combustível	<i>Lorry 16t-32, EURO 3/RER U</i>

Notas: <sup>a</sup>Inventário da produção de energia elétrica foi adaptado à realidade da matriz brasileira (BEN, 2011)

#### 4.2.2.3 Inventário Consolidado da produção de óleo de soja

A Tabela 33 apresenta o inventário da produção de 1 kg de óleo de soja. Os dados desta tabela são válidos para a produção nos estados de São Paulo e Mato Grosso.

**Tabela 33 – Inventário da produção de 1 kg de óleo de soja após alocação**

Entradas/saídas	Unidade	Quantidade
<i>Entradas</i>		

Soybeans, at farm	kg	2,1460
Tap water, at user/RER U	kg	1,5567
Hexane, at plant/RER U	kg	0,0026
Electricity, medium voltage, at grid/BR	kWh	0,0663
Heat, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW/RER U	MJ	1,5445
Transport, lorry 7.5-16t, EURO3/RER U (para produção de óleo no caso São Paulo)	t.km	0,6255
Transport, lorry 7.5-16t, EURO3/RER U (para produção de óleo no caso de Mato Grosso)	t.km	0,9482
Transport, lorry 16-32t, EURO3/RER U (para produção de óleo no caso São Paulo)	t.km	0,0820
Transport, lorry 16-32t, EURO3/RER U (para produção de óleo no caso de Mato Grosso)	t.km	0,0351
<i>Saídas</i>		
Hexane	kg	0,0026
Treatment, sewage, to wastewater treatment, class 3/CH U	m <sup>3</sup>	1,5814

#### 4.2.2.3 Subsistema de produção de cana-de-açúcar

- a) Fonte dos dados: secundários;
- b) Cobertura Temporal: 2008 a 2011. A exceção ocorreu quando se fez uso do banco de dados, visto que o mesmo representa realidades anteriores à cobertura temporal deste ICV;
- c) Cobertura Geográfica: estado de São Paulo. Qualquer variação de ordem geográfica foi introduzida por conta do uso de banco de dados;
- d) Cobertura Tecnológica: *mix* das formas manual e mecanizada, tanto para plantio quanto para colheita.

O inventário da produção de cana-de-açúcar foi construído a partir de uma parceria com o Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (CTBE). No início da modelagem deste subsistema, identificou-se que esta instituição já vinha realizando esforços na construção do ICV da cana-de-açúcar e, dessa forma, buscou-se o aproveitamento – e adequação em função das definições de escopo – dos dados para o presente estudo.

#### 4.2.2.3.1 Área, produtividade e produção de cana-de-açúcar

Dados de produção, área plantada e produtividade da soja foram coletados junto Conab (2011). Os valores médios (entre os anos 2008 e 2011) calculados foram:

- ✓ Área Colhida: 4.012,12 mil ha;
- ✓ Produtividade: 86,50 t/ha; e
- ✓ Produção: 346,64 milhões de toneladas.

#### 4.2.2.3.2 Área de Plantio e consumo de mudas

O plantio de mudas de cana-de-açúcar ocorre em função da abertura de novas áreas, ou após a ocorrência de cinco cortes (ao longo de seis anos) nas áreas já existentes (áreas de reforma). Adicionalmente, considerou-se uma área própria para o plantio de mudas. Em termos totais, a porcentagem de área total para plantio foi estimada em 22,8% (CONAB, 2011).

O plantio pode ser realizado de forma semi-mecanizada – abertura e aterramento de sulco mecanizado; e distribuição das mudas, manual – ou inteiramente mecanizada. Na Tabela 34 apresenta-se a distribuição de plantio adotada no estudo, bem como o consumo de mudas em cada tipo.

**Tabela 34 – Caracterização do esquema de plantio de cana-de-açúcar adotado no estudo**

<b>Dado</b>	<b>Quantidade</b>
Plantio em nova área de expansão (%) <sup>1,a</sup>	12,0
Plantio em área de reforma (%) <sup>1,a</sup>	88,0
Plantio semi-mecanizado (%) <sup>2</sup>	90,0
Plantio integralmente mecanizado (%) <sup>2</sup>	10,0
Consumo de mudas para o plantio semi-mecanizado (t/ha) <sup>1,b</sup>	12,0
Consumo de mudas para o plantio integralmente mecanizado (t/ha) <sup>1,b</sup>	20,0

Fonte: <sup>1</sup>: CONAB, 2011; <sup>2</sup>: consulta a especialistas

Notas: <sup>a</sup>: dados da safra 2009/10.

<sup>b</sup>: dados da safra 2010/11.

#### 4.2.2.3.3 Aplicação de resíduos industriais no campo

Admitiu-se neste estudo que todos os resíduos industriais gerados na etapa industrial de produção de etanol são integralmente aplicados no campo. Estes resíduos se constituem em torta de filtro, vinhaça e cinzas.

A área coberta com esses resíduos depende da quantidade do material gerado na fase industrial; a dosagem de aplicação e porcentagem da área total de cada um foi estimada em:

- ✓ Torta de filtro: 5.000 kg/(ha\*ano) e 11,2% da área total;
- ✓ Vinhaça: 100 kg/(ha\*ano) e 51,8% da área total; e
- ✓ Cinzas: 5.000 kg/(ha\*ano) e 8,4% da área total.

#### 4.2.2.3.4 Colheita

A colheita pode ocorrer de forma manual ou mecanizada, com ou sem queima prévia do canavial. A participação de cada uma destas realidades está descrita na Tabela 35.

**Tabela 35 – Caracterização do esquema de colheita<sup>a</sup> de cana-de-açúcar adotada no estudo**

<b>Dado</b>	<b>Quantidade</b>
Colheita manual (%)	36,35
Colheita mecanizada (%)	63,65
Queima prévia em área de colheita manual (%)	94,9
Queima prévia em área de colheita mecanizada (%)	25,6

Fonte: IDEIA, 2012.

Notas: <sup>a</sup>: valores médios entre as safras 2007/08 a 2010/11.

Para cada tonelada de cana-de-açúcar são gerados 140 kg (base seca) de palha (HASSUANI ET AL., 2005), porém considerando uma umidade de 15%, este valor atinge 164,7 kg. Utilizando o valor de produtividade do item 4.2.2.3.1, a quantidade de palha produzida, por hectare, equivale a 14,25 toneladas. De acordo com a área com queima prévia, indicada na Tabela 35, calculou-se que 7,24 toneladas de palha são queimadas, e outras 7,01 toneladas são deixadas no campo.

#### 4.2.2.3.5 Consumos de calcário e gesso

Os consumos de calcário e gesso foram adotados como 2.000 kg/(ha\*ano) e 1.000 kg/(ha\*ano), respectivamente, a partir de consulta a especialistas do setor. Cabe ressaltar que estes corretivos do solo são aplicados somente nos 22,8% da área total, que corresponde à porcentagem de área para o plantio.

#### 4.2.2.3.6 Consumo de fertilizantes minerais

A Tabela 58 apresenta a necessidade de nutriente para diferentes estágios da cana-de-açúcar. Na Tabela 37 são reportados os tipos de fertilizantes minerais com suas respectivas quantidades.

**Tabela 36 – Teor de nutrientes recomendado nos diferentes estágios da cana-de-açúcar**

Tipo de cana	Quantidade (kg.ha <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup> )		
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
Planta cana	30	150	150
Soqueira com queima prévia	100	0	150
Soqueira sem queima prévia	100	0	100
Soqueira com aplicação de vinhaça	67.5	0	0

Fonte: consulta a especialistas.

**Tabela 37 – Tipo e quantidade de fertilizantes aplicados na cana-de-açúcar**

Tipo de fertilizante mineral	Unidade	Quantidade
Amônia	kg.ha <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup>	8,12
Uréia	kg.ha <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup>	134,56
Nitrato de amônio	kg.ha <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup>	31,31
Fosfato de monoamônio (MAP)	kg.ha <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup>	6,27
Superfostato simples (SSP)	kg.ha <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup>	185,83
Cloreto de potássio (KCl)	kg.ha <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup>	115,41

Fonte: SEABRA ET AL. (2011) e consulta a especialistas.

#### 4.2.2.3.7 Consumo de Pesticidas

Os tipos e dosagens aplicadas de pesticidas foram estimadas a partir de consulta a especialistas e são apresentas na Tabela 38.

**Tabela 38 – Teor de nutrientes recomendado nos diferentes estágios da cana-de-açúcar**

<b>Tipo de pesticida</b>	<b>Plantio</b>	<b>Reforma</b>	<b>Planta cana</b>	<b>Soqueira</b>
Fipronil (kg.ha <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup> )	0,2	-	-	-
Carbofuran (kg.ha <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup> )	2,1	-	-	-
Glifosato (kg.ha <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup> )	-	1,3	-	-
Tebuthiuron (kg.ha <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup> )	-	-	0,5	-
Hexazinona (kg.ha <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup> )	-	-	0,14	-
Diuron (kg.ha <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup> )	-	-	0,49	-
Imazapique (kg.ha <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup> )	-	-	-	0,175
Ethyl Trinexapaque (kg.ha <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup> )	-	-	0,125	0,125

Fonte: consulta a especialistas.

#### 4.2.2.3.8 Consumo de óleo diesel

O consumo de óleo diesel nos maquinários agrícolas depende dos esquemas de plantio e colheita empregados. Diversas são as operações agrícolas que demandam o uso de maquinários; na Tabela 39 são apresentados os consumos por grupo de processos. Nesta estimativa, fatores relacionados ao tipo de maquinário, consumo específico de combustível e área coberta pela operação foram considerados.

**Tabela 39 – Consumo de óleo diesel por grupo de processos agrícola da cana-de-açúcar**

<b>Processo agrícola</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>
Pré-plantio e preparo do solo	l.ha <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup>	25,23
Plantio	l.ha <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup>	15,23
Cultivo <sup>a</sup>	l.ha <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup>	37,55
Colheita	l.ha <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup>	150,85
<b>Total</b>	l.ha <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup>	<b>228,86</b>

Fonte: cálculos a partir de Informa Economics FNP (2010).

#### 4.2.2.3.9 Uso do solo

Para o cálculo da transformação e ocupação do solo por parte da cana-de-açúcar foi adotado o mesmo procedimento descrito no item 4.2.2.1.6. Em relação à ocupação, estabeleceu-se que ela ocorre por cinco anos e meio em um ciclo de seis anos.



**Tabela 40 – Valores médios de transformação e ocupação do solo pela cana-de-açúcar**

<b>Processo agrícola</b>	<b>Quantidade</b>
Transformação de pastagem 2011-2008 (m <sup>2</sup> /kg cana)	0,0106
Transformação de terra arável 2011-2008 (m <sup>2</sup> /kg cana)	0,1175
Transformação para terra arável 2011-2008 (m <sup>2</sup> /kg cana)	0,1281
Ocupação, terra arável, não irrigada (m <sup>2</sup> .a/ kg cana)	0,1100

#### **4.2.2.3.10 Captura de CO<sub>2</sub>**

Segundo Frischknecht e Jungbluth (2007), a captura de carbono deve ser inventariada na forma de CO<sub>2</sub>, como um recurso natural. Por sua vez, as emissões de CO<sub>2</sub>, CO e CH<sub>4</sub> decorrentes de biomassa devem ser registradas como biogênicas.

Para a captura de CO<sub>2</sub> adotou-se o valor indicado por CGEE (2008), que corresponde a 653 kg CO<sub>2</sub>/t cana.

#### **4.2.2.3.11 Emissões para o Ar**

As emissões para o ar foram estimadas de acordo com a sua fonte geradora, tais quais: queima de diesel nos maquinários agrícolas; oxidação de fertilizantes, oxidação de calcário, oxidação de resíduos industriais, queima do canavial e uso do solo.

##### **4.2.2.3.11.1 Emissões do óleo diesel**

Emissões decorrentes da queima do óleo diesel em maquinários agrícolas foram calculadas com o uso de fatores de emissão adotados de Nemecek e Käji (2007). Para o caso de hidrocarbonetos, monóxido de carbono (fóssil) e óxidos de nitrogênio, adotou-se um valor médio a partir de diferentes operações agrícolas. Na Tabela 41 são indicados os valores dos fatores de emissão adotados neste estudo.

**Tabela 41 – Fatores de emissão para a queima de óleo diesel em maquinários agrícolas**

<b>Emissão</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>
Carbon dioxide (fossil)	g/kg diesel	3,12 * 10 <sup>3</sup>

Methane (fossil)	g/kg diesel	$1,29 * 10^{-1}$
Dinitrogen monoxide	g/kg diesel	$1,20 * 10^{-1}$
Ammonia	g/kg diesel	$2,00 * 10^{-2}$
Sulfur dioxide	g/kg diesel	1,01
Benzene	g/kg diesel	$7,30 * 10^{-3}$
Cadmium	g/kg diesel	$1,00 * 10^{-5}$
Chromium	g/kg diesel	$5,00 * 10^{-5}$
Copper	g/kg diesel	$1,70 * 10^{-3}$
Nickel	g/kg diesel	$7,00 * 10^{-5}$
Selenium	g/kg diesel	$1,00 * 10^{-5}$
Zinc	g/kg diesel	$1,00 * 10^{-3}$
Benzo(a)pyrene	g/kg diesel	$3,00 * 10^{-5}$
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons	g/kg diesel	$3,29 * 10^{-3}$
Hydrocarbons	g/kg diesel	3,00
Carbon monoxide (fossil)	g/kg diesel	5,40
Nitrogen oxides	g/kg diesel	$4,25 * 10^1$

Fonte: Nemecek e Käji (2007).

#### 4.2.2.3.11.2 Emissões de fertilizantes

As emissões decorrentes do uso de fertilizantes se apresentam na forma de  $\text{NH}_3$  e  $\text{N}_2\text{O}$ , e foram estimadas, respectivamente, segundo as Equações 3 e 4.

Para o cálculo da emissão de  $\text{NH}_3$ , a entrada de N encontra-se na Tabela 37, enquanto que os fatores de emissão, por tipo de fertilizante, segundo EPFL (2011) correspondem a: 3% para amônia; 15% para uréia; 2% para o nitrato de amônio; e 4% para o MAP.

Para o  $\text{N}_2\text{O}$ , o conteúdo de nitrogênio contido nos restos vegetais (palha) foi assumido de acordo com Franco (2008), que indica um teor de N (base seca) igual 0,477%. A emissão de nitrato encontra-se no item 4.2.2.3.13.

#### 4.2.2.3.11.3 Emissões do calcário

Segundo IPCC (2006), 13% da entrada de calcário é liberada para a atmosfera na forma de carbono. Multiplicando-se a emissão em carbono por 44/12, tem-se a emissão de  $\text{CO}_2$  a partir do uso de calcário.

#### 4.2.2.3.11.4 Emissões dos resíduos industriais

As emissões decorrentes da oxidação da vinhaça e da torta de filtro aplicadas no canavial foram calculadas de acordo com IPCC (2006), que indica que 1,225% do nitrogênio total é emitido na forma de N<sub>2</sub>O.

Os teores de N contidos nestes resíduos industriais foram adotados de Macedo (2005): 0,36 kg N/m<sup>3</sup> de vinhaça; e 12,5 kg N/t de torta de filtro. Considerou-se que não ocorrem emissões de N<sub>2</sub>O a partir das cinzas retornadas ao campo.

#### 4.2.2.3.11.5 Emissões da queima do canavial

Para as emissões derivadas da queima do canavial foram utilizados fatores de emissão de GREET (2010), indicados na Tabela 42, e medidos por tonelada de palha (base seca). Para o cálculo das emissões é preciso considerar a quantidade de palha gerada por tonelada de cana, bem como a participação de área com queima prévia antes da colheita (ver item 4.2.2.3.4).

**Tabela 42 – Fatores de emissão para a queima da palha anterior à colheita**

<b>Emissão</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>
Volatile organic compounds (VOC)	kg/t palha	7.0
Carbon monoxide (biogenic)	kg/t palha	92.0
Nitrogen oxides	kg/t palha	2.5
Particulates, <10um	kg/t palha	7.8
Particulates, <2,5um	kg/t palha	3.9
Sulfur dioxide	kg/t palha	0.4
Dinitrogen monoxide	kg/t palha	0.07
Methane (biogenic)	kg/t palha	2.7
Methane (biogenic)	kg/t palha	7.0

Fonte: GREET, 2010.

#### 4.2.2.3.11.6 Uso do Solo

As emissões de CO<sub>2</sub> decorrentes do uso do solo foram estimadas conforme o item 4.2.2.1.8. A

Tabela 43 apresenta as estimativas de emissões de CO<sub>2</sub> associadas à produção de soja que decorrem da modificação do uso do solo.

**Tabela 43 – Emissões estimadas de CO<sub>2</sub> decorrentes do uso do solo pela cana-de-açúcar**

<b>Parâmetro</b>	<b>SP</b>
CO <sub>2</sub> <sup>i</sup> (kg/ha <sub>desmatado</sub> )	4.790,5
Σ ΔÁrea (mil ha <sub>desmatado</sub> )	4.116,2
Produção em 2010/11 (milhões t)	406,5
CO <sub>2</sub> <sup>f</sup> (kg/kg <sub>cana</sub> )	0,55

#### **4.2.2.3.12 Emissões para o Solo**

Como emissões para o solo foram estimadas os metais pesados, originados da aplicação de corretivos do solo e fertilizantes minerais, e os ingredientes ativos dos pesticidas.

Para o cálculo das emissões de metais pesados adotou-se a mesma consideração do item 4.2.2.1.9, com o acréscimo das seguintes premissas para a cana-de-açúcar:

- ✓ A cana-de-açúcar colhida absorve uma fração da entrada total de metais pesados, e o restante vai direto para o solo;
- ✓ No processamento industrial da cana-de-açúcar colhida, os metais pesados contidos na mesma podem ser transferidos para: etanol, açúcar, vinhaça, torta de filtro ou cinzas;
- ✓ Os teores de metais pesados no etanol e no açúcar são desprezíveis; e
- ✓ Em razão da vinhaça, torta de filtro e cinzas serem reaplicadas no canavial, os teores de metais pesados nestes resíduos acabam se tornando emissões para o solo.

Considerando o conjunto de premissas acima, toda entrada de metais pesados foi estimada como emissão para o solo. O cálculo foi realizado com o uso da Equação 8, alterando os tipos de fertilizantes, adicionando o gesso e zerando a contribuição absorvida pelo vegetal.

Na Tabela 44 são apresentadas as participações dos produtos de acordo com sua origem (importado ou nacional), bem como os teores dos metais pesados. Na Tabela 45, são indicadas as emissões de metais pesados estimadas para a cana-de-açúcar.

**Tabela 44 – Origem e teor de metais de pesados de produtos agrícolas utilizadas na cana-de-açúcar**

Dado	Amônia	Uréia	Nitrato de amônio	MAP	SSP	KCl	Calcário	Gesso
Prod. Nacional (%)	78	34	32	52	95	13	100	100
Importação (%)	22	66	68	48	5	87	0	0
Teor de Cd de produto nacional (mg/kg) <sup>1</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	2,5	3,0	0 <sup>a</sup>	0	0,8
Teor de Cd de produto importado (mg/kg) <sup>2</sup>	0,172	0,051	0,05	24,634	10,0	0,06	-	-
Teor de Pb de produto nacional (mg/kg) <sup>1</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	9	8,6	0 <sup>a</sup>	0	9,9
Teor de Pb de produto importado (mg/kg) <sup>2</sup>	4,403	1,099	1,9	23,722	110,001	5,502	-	-
Teor de Ni de produto nacional (mg/kg) <sup>1</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	4	47	0 <sup>a</sup>	0	4,9
Teor de Ni de produto importado (mg/kg) <sup>2</sup>	14,079	2,001	12,999	48,221	19,999	2,1	-	-
Teor de Cu de produto nacional (mg/kg) <sup>1</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	12	27	0 <sup>a</sup>	6	10
Teor de Cu de produto importado (mg/kg) <sup>2</sup>	18,245	5,998	6,999	56,746	23,0	4,998	-	-
Teor de Zn de produto nacional (mg/kg) <sup>1</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	16	173	0 <sup>a</sup>	7	5
Teor de Zn de produto importado (mg/kg) <sup>2</sup>	99,573	43,999	50,001	360,364	162,0	46,002	-	-
Teor de Cr de produto nacional (mg/kg) <sup>1</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	12	29	0 <sup>a</sup>	9,9	9,9
Teor de Cr de produto importado (mg/kg) <sup>2</sup>	6,404	2,001	4,001	282,941	65,001	1,998	-	-

Fonte: <sup>1</sup>: Gabe e Rodella (1999); <sup>2</sup>: Nemecek e Käji (2007).

Notas: <sup>a</sup>: Segundo Rodella (2011), o teor de metais pesados é desprezível em fertilizantes derivados da amônia e no KCl.

**Tabela 45 – Emissões de metais pesados para o solo pela cultura da cana-de-açúcar**

<b>Tipo de metal pesado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>
Cd	mg/kg de cana	0,010348
Pb	mg/kg de cana	0,222091
Ni	mg/kg de cana	0,120512
Cu	mg/kg de cana	0,130775
Zn	mg/kg de cana	0,545540
Cr	mg/kg de cana	0,158522

A respeito das emissões de pesticidas, assumiu-se que toda entrada de ingrediente ativo dos defensivos agrícolas se torna uma emissão para o solo (JUNGBLUTH, 2007).

#### **4.2.2.3.13 Emissões para a Água**

Em razão dos solos brasileiros apresentarem um teor ácido, especialistas indicam que não ocorre a emissão de compostos de fósforo, nitrogênio e potássio para as águas superficiais.

Para a água subterrânea, Trivelin e Franco (2011) indicam que 5% do total de N aplicado como uréia é convertido para nitrato, que acaba sendo lixiviado para este compartimento. Considerou-se o mesmo fator de emissão para estimar as emissões derivadas da amônia.

#### **4.2.2.3.14 Transportes**

Foram considerados os transportes de mudas, calcário, gesso, fertilizantes minerais e resíduos industriais, dos locais de produção até o campo, incluindo a parcela de importação (quando ocorre).

As estimativas foram realizadas conforme descrito no item 4.2.2.1.11 e na Tabela 46 são apresentadas as distâncias de transporte dos insumos agrícolas. Os municípios adotados como produtores de calcário, fertilizantes minerais e gesso foram respectivamente: Ribeira Grande (SP); Cubatão (SP); e Araripina (PE).

**Tabela 46 – Distâncias de transporte dos insumos agrícolas da cana-de-açúcar**

Origem-destino	Amônia	Uréia	Nitrato de amônio	MAP	SSP	KCI	Calcário	Gesso	Mudas	Res. Ind.
Produção no país exportador-porto de exportação (km) <sup>1</sup>	50	50	50	50	50	50	-	-	-	-
Porto exportador-porto de Santos (km) <sup>2,a</sup>	6.628	11.679	11.857	10.407	12.287	7.456	-	-	-	-
Porto de Santos-municípios produtores de cana (km) <sup>2,b</sup>	479	479	479	479	479	479	-	-	-	-
Cubatão-municípios produtores de cana (km) <sup>2,b</sup>	469	469	469	469	469	469	-	-	-	-
Ribeira Grande-municípios produtores de cana (km) <sup>2,b</sup>	-	-	-	-	-	-	425	-	-	-
Araripina-municípios produtores de cana (km) <sup>2,b</sup>	-	-	-	-	-	-	-	2.445	-	-
Local de produção-canavial <sup>3</sup>	-	-	-	-	-	-	-	-	30	32,3

Fonte: <sup>1</sup>: Frischknecht e Jungbluth (2007); <sup>2</sup>: *Google Maps*; <sup>3</sup>: consulta a especialistas

Notas: <sup>a</sup>: distância ponderada de acordo com os principais países exportadores do produto para o Brasil.

<sup>b</sup>: distância ponderada de acordo com os principais municípios produtores de cana-de-açúcar em SP.

Para o transporte da vinhaça, assumiu-se a configuração indicada por Macedo et al. (2004), que se configura em uma mescla entre canais à céu aberto e caminhões, nas seguintes proporções:

- ✓ 6% são transportados por caminhões, ao longo de uma distância de 7,0 km, e aplicado via aspersores acoplados ao caminhão a uma taxa de 3,42 m<sup>3</sup>/ha. Esta alternativa é praticada nas áreas mais próximas à planta industrial;
- ✓ 31% são transportados por caminhões, ao longo de uma distância de 12,0 km, e aplicado via sistema de aspersão. Adota-se esta configuração nas áreas intermediárias; e
- ✓ 63% são transportados via canal a céu aberto e aplicado via sistema de aspersão.

Para a operação dos sistemas de armazenamento e aspersão da vinhaça foram utilizados os dados de Rocha (2009). Segundo o autor, para o bombeamento e armazenamento de 1 m<sup>3</sup> necessita-se o consumo de energia elétrica igual a 0,686 kWh. A Tabela 47 apresenta dados da operação do sistema de aspersão.

**Tabela 47 – Dados da operação de 1 m<sup>3</sup> pelo sistema de aspersão da vinhaça**

<b>Entrada/saída</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>
Consumo energia <sup>a</sup>	MJ	8,579487
Consumo de diesel por trator	kg	0,03221
Emissão de CO <sub>2</sub> , fóssil	kg	1,038*10 <sup>-1</sup>
Emissão de N <sub>2</sub> O	kg	2,613*10 <sup>-6</sup>
Emissão de CH <sub>4</sub> , fóssil	kg	5,776*10 <sup>-6</sup>
Emissão de SO <sub>2</sub>	kg	1,650*10 <sup>-4</sup>
Emissão de particulados	kg	5,639*10 <sup>-5</sup>
Emissão de NO <sub>x</sub>	kg	1,224*10 <sup>-3</sup>
Emissão de CO, fóssil	kg	4,401*10 <sup>-7</sup>
Emissão de hidrocarbonetos	kg	1,169*10 <sup>-4</sup>

Fonte: Rocha (2009).

Notas: <sup>a</sup>: por meio da queima de óleo diesel em conjunto motor+motobomba.

#### **4.2.2.3.15 Banco de dados utilizado**

Para este subsistema de produção de cana-de-açúcar foram adotados elementos do banco de dados *Ecoinvent*, no intuito de representar o inventário da produção de



alguns produtos auxiliares. A Tabela 48 indica a relação destes produtos, bem como quais elementos do banco de dados foram utilizados.

**Tabela 48 – Elementos do Ecoinvent adotados na produção de cana-de-açúcar**

<b>Nome</b>	<b>Elemento do Ecoinvent</b>
Calcário	<i>Limestone, milled, loose, at plant/CH U</i>
Gesso	<i>Gypsum, mineral, at mine/CH U</i>
Amônia	<i>Ammonia, liquid, at regional storehouse/RER U</i>
Uréia	<i>Urea, as N, at regional storehouse/RER U</i>
Nitrato de amônio	<i>Ammonium nitrate, as N, at regional storehouse/RER U</i>
MAP	<i>Monoammonium phosphate, as P2O5, at regional storehouse/RER U</i>
SSP	<i>Single superphosphate, as P2O5, at regional storehouse/RER U</i>
KCl	<i>Potassium chloride, as K2O, at regional storehouse/RER U</i>
Glifosato	<i>Glyphosate, at regional storehouse/RER U</i>
Diuron	<i>Diuron, at regional storehouse/RER U</i>
Carbofuran	<i>Carbofuran, at regional storehouse/RER U</i>
Fipronil	<i>Insecticides, at regional storehouse/RER U</i>
Tebuthiuron	<i>Herbicides, at regional storehouse/RER U</i>
Hexazinona	<i>Herbicides, at regional storehouse/RER U</i>
Imazapique	<i>Herbicides, at regional storehouse/RER U</i>
Ethyl Trinexapaque	<i>Growth regulators, at regional storehouse/RER U</i>
Aplicação da vinhaça	<i>Slurry spreading</i>
Transporte rodoviário	<i>Lorry 7,5-16t, EURO 3/RER U Lorry 16-32t, EURO 3/RER U e Lorry 16-32t, EURO 3/RER U</i>
Transporte oceânico	<i>Transoceanic freight ship/OCE U</i>

#### 4.2.2.3.16 Inventário Consolidado da produção de cana-de-açúcar

A Tabela 49 apresenta o Inventário construído para modelar a produção de 1 kg de cana-de-açúcar.

**Tabela 49 – Inventário da produção de 1 kg de cana-de-açúcar**

<b>Entradas/saídas</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>
<i>Entradas</i>		
Carbon dioxide, in air	kg	0,653
Transformation, from pasture and meadow	m <sup>2</sup>	0,0106
Transformation, from arable, non-irrigated	m <sup>2</sup>	0,1175

Transformation, to arable, non-irrigated	m <sup>2</sup>	0,1281
Occupation, arable, non-irrigated	m <sup>2</sup> .a	0,1100
Ammonia, liquid, at regional storehouse/RER U	kg	0,000094
Urea, as N, at regional storehouse/RER U	kg	0,000700
Ammonium nitrate, as N, at regional storehouse/RER U	kg	0,000123
Monoammonium phosphate, as P2O5, at regional storehouse/kg/RER	kg	0,000006
Monoammonium phosphate, as N, at regional storehouse/kg/RER	kg	0,000035
Single superphosphate, as P2O5, at regional storehouse/RER U	kg	0,000387
Potassium chloride, as K2O, at regional storehouse/RER U	kg	0,000774
Limestone, milled, loose, at plant/CH U	kg	0,005156
Gypsum, mineral, at mine/CH U	kg	0,002578
<i>Vinasse, at etanol production</i>	kg	0,000811
<i>Filter cake, at etanol production</i>	kg	0,007950
Diesel, at regional storage	kg	0,002279
Glyphosate, at regional storehouse/RER U	kg	0,000003
Diuron, at regional storehouse/RER U	kg	0,000001
Carbofuran, at regional storehouse/RER U	kg	0,000005
Herbicides, at regional storehouse/RER U	kg	0,000003
Insecticides, at regional storehouse/RER U	kg	0,0000005
Growth regulators, at regional storehouse	kg	0,000001
Slurry spreading, by vacuum tanker/CH U	m <sup>3</sup>	0,000049
Electricity - medium voltage, at grid – BR	kWh	0,000523
Diesel, burned in building machine/GLO U	MJ	0,006538
Transport, transoceanic freight ship/OCE U	t.km	0,026749
Transport, lorry 7,5-16t, EURO3/RER U	t.km	0,003356
Transport, lorry 16-32t, EURO3/RER U	t.km	0,011842
<i>Emissões para o Ar</i>		
Carbon dioxide, land transformation	kg	0,059403
Volatile organic compounds (VOC)	kg	0,000442
Carbon monoxide, biogenic	kg	0,005814
Nitrogen oxides	kg	0,095961
Particulates, <10um	kg	0,000493
Particulates, <2,5um	kg	0,012128
Sulfur oxides	kg	0,000025
Dinitrogen monoxide	kg	0,000040
Methane (biogenic)	kg	0,000171

Ammonia	kg	0,000133
Ammonium, ion	kg	0,000159
Carbon dioxide, fossil	kg	0,009570
Methane, fossil	kg	0,0000003
Sulfur dioxide	kg	0,000002
Benzene	kg	0,000016
Cadmium	kg	$2,3 \cdot 10^{-8}$
Chromium	kg	$1,1 \cdot 10^{-7}$
Copper	kg	$3,8 \cdot 10^{-6}$
Nickel	kg	$1,6 \cdot 10^{-7}$
Selenium	kg	$2,3 \cdot 10^{-8}$
Zinc	kg	$2,2 \cdot 10^{-6}$
Benzo(a)pyrene	kg	$6,8 \cdot 10^{-8}$
Hydrocarbons, aromatic	kg	0,000007
Carbon monoxide , fossil	kg	0,000012
NMVOOC, non-methane volatile organic compounds	kg	0,006762
Hydrocarbons, unspecified	kg	$8,9 \cdot 10^{-8}$
Particulates, unspecified	kg	$4,3 \cdot 10^{-8}$
<i>Emissões para a Água</i>		
Nitrate	kg	0,000155
<i>Emissões para o Solo</i>		
Carbofuran	kg	0,0000054
Diuron	kg	0,0000012
Fipronil	kg	0,0000005
Glyphosate	kg	0,0000029
Hexazinone	kg	0,0000004
Imazapic	kg	0,0000016
Tebuthiuron	kg	0,0000013
Trinexapac-ethyl	kg	0,0000011
Cadmium	mg	0,0103480
Lead	mg	0,2220909
Nickel	mg	0,1205124
Copper	mg	0,1307754
Zinc	mg	0,5455398
Chromium	mg	0,1585222

#### 4.2.2.4 Subsistema de produção de etanol anidro

a) Fonte dos dados: secundários;

- b) Cobertura Temporal: 2004 a 2010; A exceção ocorreu quando se fez uso do banco de dados, visto que o mesmo representa realidades anteriores à cobertura temporal deste ICV;
- c) Cobertura Geográfica: estado de São Paulo. Qualquer variação de ordem geográfica foi introduzida por conta do banco uso de de dados;
- d) Cobertura Tecnológica: típica das usinas brasileiras. Desidratação do etanol hidratado por destilação azeotrópica;
- e) Alocação: adotado o critério econômico, com a utilização de dados de preço médio dos últimos dez anos: US\$ 23,25/ $t_{cana}$ ; US\$ 0,60/ $l_{etanol\ anidro}$ ; US\$ 0,43/ $kg_{açúcar}$ ; e US\$ 23,25/ $t_{bagaço}$ . Para a destilaria, os fatores de alocação para o etanol anidro e o bagaço foram calculados em 99,5% e 0,5%, respectivamente. Para a usina, os fatores foram estimados em 58,0%, 41,4% e 0,6%, respectivamente, para o etanol anidro, açúcar e bagaço.

Assim como no subsistema da produção de cana-de-açúcar, o inventário do subsistema da fabricação do etanol anidro foi construído em parceria com o CTBE.

A modelagem do processo produtivo foi executada com o uso do software de simulação *Aspen Plus*. Esta abordagem leva em consideração dados de diversas naturezas – aspectos técnicos, correntes de entrada e saída, consumos energéticos e perfil dos equipamentos – para simular um processo de produção.

Tanto as produções em destilaria autônoma quanto em usinas anexas foram simuladas, para uma planta industrial típica do cenário nacional com processamento de 500  $t_{cana}/h$ , ou 2 milhões de  $t_{cana}/ano$ . A maioria das características adotadas não variam para cada situação, tais quais: caldeiras com baixa eficiência na produção de vapor (22 bar); autossuficiência na geração de energia; destilação azeotrópica do etanol hidratado com o uso de ciclohexano; venda do bagaço excedente.

Nas destilarias autônomas, todo o caldo extraído da moagem é direcionado para a produção de etanol; nas usinas anexas, o caldo é repartido igualmente para a geração de etanol e açúcar. Cabe destacar que este inventário considera tão somente a produção de etanol de primeira geração – a partir dos colmos da cana-de-açúcar.

As emissões atmosféricas da queima do bagaço na caldeira foram estimadas com o uso de fatores de emissão indicados por Greet (2010). Na destilaria autônoma e na

usina anexa as quantidades de bagaço queimado na caldeira correspondem a 241,6 kg e 240,2 kg, respectivamente. Os valores dos fatores de emissão adotados foram:

- ✓ CO: 0,54597 g/kg bagaço;
- ✓ NO<sub>x</sub>: 0,54318 g/kg bagaço;
- ✓ N<sub>2</sub>O: 0,03000 g/kg bagaço;
- ✓ SO<sub>x</sub>: 0,02915 g/kg bagaço;
- ✓ CH<sub>4</sub>: 0,22499 g/kg bagaço;
- ✓ VOC: 0,03797 g/kg bagaço;
- ✓ Particulados<10 µm: 0,61560 g/kg bagaço; e
- ✓ Particulados<2,5 µm: 0,30780 g/kg bagaço.

Foram elaborados inventários individuais para modelar a produção de etanol anidro em destilaria autônoma e usina anexa. Posteriormente, os mesmos foram combinados (*mix*) a fim de se obter um inventário único da produção de etanol anidro no estado de São Paulo (ver Tabela 52). Esta combinação foi realizada de acordo com as contribuições de cada tipo de planta industrial na geração total do biocombustível no estado.

Em consulta ao site da UNICA, a safra mais recente que apresenta esta distribuição é a 2008/09, com o seguinte perfil de produção de etanol anidro: 93% em usinas anexas e 7% em destilarias autônomas (UNICA, 2011). Esta proporção foi adotada no presente estudo.

#### **4.2.2.4.1 Transportes**

Foram calculadas as distâncias de transporte dos insumos industriais – basicamente produtos químicos – dos seus locais de produção até as plantas industriais.

Em consulta à Abiquim (2011) e MDIC (2011), constatou-se que a importação brasileira destes produtos químicos é muito baixa no Brasil, o que levou a decisão de considerar apenas a produção brasileira.

Ainda a partir de Abiquim (2011) foram adotados os seguintes locais de fabricação para cada insumo:

- ✓ Ácido sulfúrico: Cubatão/SP (Vale Fertilizantes);
- ✓ Ciclohexano: Camaçari/BA (Braskem);
- ✓ Cal: Araçariguama/SP (Votorantim Cimentos);

- ✓ Óleo lubrificante: Diadema/SP (grande número de empresas produtoras na região); e
- ✓ Outros químicos (basicamente polímero floculante): Suzano/SP (Nalco).

A relação e localização das destilarias e usinas produtoras de etanol foi obtida junto ao site da UNICA (UNICA, 2011). Para cada insumo, a distância de transporte foi obtida a partir da média ponderada entre todas as distâncias do local de produção do insumo até à planta de geração de álcool. Os resultados estão apresentados na Tabela 50.

**Tabela 50 – Distâncias de transporte dos insumos da produção de etanol**

<b>Produto</b>	<b>Distância percorrida (km)</b>
Ácido Sulfúrico	463
Ciclohexano	1.976
Cal	371
Óleo lubrificante	415
Outros químicos	445

#### 4.2.2.4.2 Banco de dados utilizado

A Tabela 51 apresenta os elementos do banco de dados *Ecoinvent* utilizados neste subsistema de produção de etanol anidro.

**Tabela 51 – Elementos do Ecoinvent adotados na produção de etanol**

<b>Nome</b>	<b>Elemento do Ecoinvent</b>
Água	<i>Tap water, at user/RER U</i>
Cal	<i>Lime, hydrated, packed, at plant/CH U</i>
Ácido sulfúrico	<i>Sulphuric acid, liquid, at plant/RER U</i>
Ciclohexano	<i>Cyclohexane, at plant/RER U</i>
Óleo lubrificante	<i>Lubricating oil, at plant/RER U</i>
Outros químicos	<i>Chemicals inorganic, at plant/GLO U</i>
Transporte da cana	<i>Lorry 16-32t, EURO 3/RER U e Lorry &gt;32t, EURO 3/RER U</i>
Transporte dos insumos	<i>Lorry 16-32t, EURO 3/RER U</i>

#### 4.2.2.4.3 Inventário Consolidado da produção de etanol anidro

A Tabela 52 apresenta o inventário para a produção de 1 kg de etanol anidro, tanto em destilaria autônoma quanto em usina anexa. A última coluna representa o inventário combinado da produção nestas duas plantas industriais, de acordo com o volume de produção de cada uma.

**Tabela 52 – Inventário da produção de 1 kg de etanol anidro após alocação**

<b>Entradas/saídas</b>	<b>Unidade</b>	<b>Usina</b>	<b>Destilaria</b>	<b>Mix</b>
<i>Entradas</i>				
Sugarcane	kg	14,3583	15,3731	14,4293
Tap water	kg	0,02154	0,02306	0,02164
Lime, hydrated, packed, at plant/CH U	kg	0,01450	0,01245	0,01436
Sulphuric acid, liquid, at plant/RER U	kg	5,14026	7,54819	5,30881
Chemicals inorganic, at plant/GLO U	kg	0,10625	0,11991	0,10721
Lubricating oil, at plant/RER U	kg	0,00019	0,00021	0,0019
Cyclohexane, at plant/RER U	kg	0,00062	0,00106	0,00065
Transport, lorry 16-32t, EURO3/RER U	t.km	0,29555	0,18515	0,28782
Transport, lorry >32t, EURO3/RER U	t.km	0,51968	0,32450	0,50601
<i>Saídas</i>				
Vinhaça <sup>a</sup>	kg	13,75495	13,72488	13,75284
Torta de filtro <sup>a</sup>	kg	0,85149	0,39567	0,81958
Cinzas <sup>a</sup>	kg	0,14356	0,08964	0,13979
Bagaço <sup>a</sup>	kg	0,25743	0,13910	0,24914
Ethanol <sup>b</sup>	kg	0,00198	0,00201	0,00198
Carbon dioxide, biogenic <sup>c</sup>	kg	3,41827	3,59661	3,43076
Carbon monoxide, biogenic	kg	0,00188	0,00203	0,00189
Nitrogen oxides	kg	0,00187	0,00202	0,00188
Dinitrogen monoxide	kg	0,00010	0,00011	0,00010
Sulfur oxides	kg	0,00010	0,00011	0,00010
Methane, biogenic	kg	0,00078	0,00084	0,00078
NMVOOC, unspecified origin	kg	0,00013	0,00014	0,00013
Particulates, < 10 um	kg	0,00212	0,00229	0,00213
Particulates, < 2.5 um	kg	0,00106	0,00114	0,00107

Notas: <sup>a</sup>: não foi aplicada a alocação para este fluxo.

<sup>b</sup>: não foi aplicada a alocação para este fluxo, haja vista que esta emissão ocorre apenas na etapa específica de produção de etanol.

°: emissões combinadas da fermentação e da queima do bagaço na caldeira. Para a quantidade da fermentação não foi aplicada alocação, uma vez que a mesma ocorre apenas na etapa específica de produção de etanol.

#### 4.2.2.5 Subsistema de produção de biodiesel

- a) Fonte dos dados: primários e secundários (quando foram feitas adaptações dos dados primários);
- b) Cobertura Temporal: 2011; A exceção ocorreu quando se fez uso do banco de dados, visto que o mesmo representa realidades anteriores à cobertura temporal deste ICV;
- c) Cobertura Geográfica: estado de São Paulo. Qualquer variação de ordem geográfica foi introduzida por conta do uso de banco de dados;
- d) Cobertura Tecnológica: transesterificação via rota etílica; e
- e) Alocação: adotado o critério econômico. O valor de mercado do biodiesel foi calculado com base nos preços médios de venda nos leilões da ANP (R\$2.227,40/m<sup>3</sup>); para a glicerina, adotou-se o valor disponibilizado por uma empresa produtora de biodiesel do estado de Goiás (R\$230,00/t). Os fatores de alocação foram estimados em 99,18% e 0,82% para o biodiesel e glicerina, respectivamente.

O inventário do subsistema de produção de biodiesel foi elaborado com a utilização de dados primários fornecidos por uma empresa do estado de São Paulo, com autorização para comercialização de biodiesel utilizando a rota etílica.

Em função da empresa não ter permitido a divulgação do seu nome, bem como detalhes da sua localização e do processo produtivo, os dados originais relativos a este subsistema não podem ser rastreados.

A usina de biodiesel adota a rota etílica e produz biodiesel a partir da mistura de diferentes óleos vegetais e sebo bovino. A partir da reação de transesterificação destas oleaginosas com o etanol anidro (em excesso), são gerados o biodiesel e a AGAO – que é uma mistura composta de álcool, glicerina, água e oleína – na seguinte proporção mássica, respectivamente: 35%; 10%; 35%; e 20%.

A oleína é separada da AGAO na própria instalação e reaproveitada no processo produtivo, enquanto que a mistura residual – chamada então de AGA – é



encaminhada para uma usina de etanol encarregada de fazer a separação dos componentes.

Os dados brutos coletados junto à usina produtora do biodiesel, representativos do ano de 2011, estão apresentados na Tabela 53.

**Tabela 53 – Dados brutos da produção de biodiesel, no ano de 2011**

<b>Entradas/Saídas</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>
<i>Entradas</i>		
Óleo de soja degomado e neutralizado	t	62.069,0
Óleo de algodão	t	4.965,0
Óleo de amendoim	t	1.241,0
Óleo residual	t	1.552,0
Sebo bovino	t	7.759
Água	t	27.310,5
Etanol (em excesso)	t	34.914,0
Ácido cítrico	t	47,0
Hidróxido de sódio	t	621,0
Eletricidade	kWh	1.055,0
Óleo diesel (p/ geração de energia térmica)	l	242.000,0
<i>Saídas</i>		
Biodiesel	t	78.030,0
AGAO	t	71.787,6

Em relação às diversas fontes oleaginosas adotadas pela empresa, para efeito do presente estudo assumiu-se a produção de biodiesel exclusivamente a partir de óleo de soja. Além disso, assumiu-se que o óleo de soja substitui os outros tipos de óleo vegetais (e o sebo bovino) nas mesmas quantidades indicadas na Tabela 53.

O consumo de energia indicado na Tabela 53 não contempla a quantidade necessária para o processo de separação dos componentes da AGAO. Isto se justifica em função desta etapa ser realizada em unidade externa à produtora de biodiesel, e não ter sido possível coletar dados específicos do processo.

A respeito do ácido, o banco de dados *Ecoinvent* não possui o inventário da produção de ácido cítrico. Diante disto, decidiu-se substituí-lo por outro ácido cujo inventário estivesse disponível neste banco de dados.

De acordo com um colaborador da empresa produtora de biodiesel, desde o início da operação da planta tem-se adotado o ácido cítrico, mas as alternativas sugeridas seriam os ácidos fosfórico ou clorídrico. Para o presente estudo, decidiu-se pela adoção do ácido fosfórico em razão deste apresentar menor potencial de corrosão para as instalações.

#### 4.2.2.5.1 Transporte

As distâncias de transporte dos insumos industriais encontram-se na Tabela 54.

**Tabela 54 – Distâncias de transporte dos insumos da produção de biodiesel**

<b>Produto</b>	<b>Distância percorrida (km)</b>
Óleo de soja (fornecedor 1 com 70% do total)	800
Óleo de soja (fornecedor 2 com 15% do total)	60
Óleo de soja (fornecedor 3 com 15% do total)	200
Etanol	70
Ácido cítrico	160
Hidróxido de sódio	160
AGAO	70

#### 4.2.2.5.2 Banco de dados

A Tabela 55 indica os produtos que fizeram uso do banco de dados *Ecoinvent*, bem como quais elementos do banco foram utilizados.

**Tabela 55 – Elementos do Ecoinvent adotados na produção de biodiesel**

<b>Nome</b>	<b>Elemento do Ecoinvent</b>
Água	<i>Tap water, at user/RER U</i>
Ácido fosfórico	<i>Phosphoric acid, industrial grade, 85% in H<sub>2</sub>O, at plant/RER U</i>
Hidróxido de sódio	<i>Sodium hydroxide, 50% in H<sub>2</sub>O, production mix, at plant/RER U</i>
Eletricidade	<i>Electricity, medium voltage, at grid/BR<sup>a</sup></i>
Energia térmica (diesel)	<i>Heat, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW/RER U</i>
Transporte de óleo de soja e etanol	<i>Lorry 16-32 t, EURO 3/RER U</i>
Transporte de ácido cítrico e hidróxido de sódio	<i>Lorry 7,5-16 t, EURO 3/RER U</i>

Notas: <sup>a</sup>Inventário da produção de energia elétrica foi adaptado à realidade da matriz brasileira (BEN, 2011)

#### 4.2.2.5.3 Inventário Consolidado da produção de biodiesel etílico de soja

A Tabela 56 apresenta o Inventário construído neste estudo para modelar a produção de 1 kg de biodiesel etílico de soja.

**Tabela 56 – Inventário da produção de 1 kg de biodiesel etílico de soja após alocação**

Entradas/saídas	Unidade	Quantidade
<i>Entradas</i>		
Soybean oil	kg	0,9861
Ethanol	kg	0,1244
Tap water, at user/RER U	kg	0,3471
Sodium hydroxide, 50% in H <sub>2</sub> O, production mix, at plant/RER U	kg	0,0079
Phosphoric acid, industrial grade, 85% in H <sub>2</sub> O, at plant/RER U	kg	0,00003
Electricity, medium voltage, at grid/BR	kWh	0,0134
Heat, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW/RER U	MJ	0,1051 <sup>a</sup>
Transport, lorry 7.5-16t, EURO3/RER U (para produção de óleo em São Paulo)	t.km	0,0013
Transport, lorry 16-32t, EURO3/RER U (para produção de óleo no Mato Grosso)	t.km	0,5994

Notas: <sup>a</sup>: calculado de acordo com dados do processo no *Ecoinvent*, que indica a produção de 1 MJ por meio do consumo de 0,024591 kg de óleo diesel.

#### 4.2.2.6 Subsistema da mistura do biodiesel ao óleo diesel

- a) Fonte dos dados: secundários;
- b) Cobertura Temporal: 2008 a 2011;
- c) Cobertura Geográfica: estado de São Paulo;
- d) Cobertura tecnológica: mistura realizada em tanques nos Terminais de armazenamento.

Baseado na informação de Embrapa (2010a), de que todo biodiesel arrematado nos leilões da ANP é adquirido pela Petrobras, assumiu-se neste estudo que a mistura

do biodiesel ao óleo diesel ocorre nos terminais de armazenamento desta empresa. Destes terminais, posteriormente, a mistura B5 é vendida para as grandes distribuidoras de combustível, que, por sua vez, se encarregam de disponibilizar o produto para o consumidor final.

Para a elaboração do inventário deste subsistema, considerou-se apenas o transporte do biodiesel etílico de soja, da unidade produtora até os terminais de armazenamento da Petrobras. Cabe destacar que as distâncias de transporte do óleo diesel, das refinarias até os terminais, já foram consideradas no item 4.2.1.3.1.

As distâncias entre a usina de biodiesel e os terminais de armazenamento são dadas a seguir:

- ✓ Terminal de Barueri: 397 km;
- ✓ Terminal de São Caetano do Sul: 411 km; e
- ✓ Terminal de Cubatão: 461 km.

Em razão da ausência de informação a respeito de qual (is) terminal (is) de armazenamento recebem o biodiesel etílico de soja, e em quais proporções, assumiu-se que o biocombustível é destinado para os três terminais em proporções igualitárias.

Cabe lembrar que os terminais de armazenamento não recebem somente o biodiesel etílico, mas também – e em maiores volumes – biodiesel metílico oriundo de outras empresas produtoras, que não estão dentro do escopo deste estudo.

#### **4.2.2.6.1 Inventário Consolidado da mistura do biodiesel ao óleo diesel**

A Tabela 57 apresenta o inventário elaborado para modelar a produção da mistura B5, em cada um dos terminais adotados neste estudo. O B5 apresenta 5% e 95%, em volume, de biodiesel e óleo diesel, respectivamente. Adotando os valores de densidade iguais a 0,84 kg/l (EPE, 2011) e 0,867 kg/l (dado da empresa produtora), para o óleo diesel e biodiesel etílico de soja, respectivamente, a massa total da mistura equivale a 0,84135 kg.

**Tabela 57 – Inventário da geração de 0,84135 kg da mistura B5**

<b>Entradas/saídas</b>	<b>Unidade</b>	<b>Term. Barueri</b>	<b>Term. São Caetano do Sul</b>	<b>Term. Cubatão</b>
<i>Entradas</i>				
Diesel, at regional storage - Replan to Barueri	kg	0,798	-	-
Diesel, at regional storage - Revap and Recap to Sao Caetano do Sul	kg	-	0,798	-
Diesel, at regional storage - Rpbc and imported to Cubatão	kg	-	-	0,798
Soybean ethyl ester	kg	0,04335	0,04335	0,04335
Transport, lorry >32t, EURO3/RER U	t.km	0,01721	0,017817	0,01998435

#### **4.2.2.7 Subsistema de uso do B5 em ônibus**

- a) Fonte dos dados: primários e secundários;
- b) Cobertura Temporal: 2006 a 2009 – intervalo em que foram realizados testes de campo e em bancada dinamométrica para o B5;
- c) Cobertura Geográfica: estado de São Paulo (teste de campo realizado no bairro Cidade Dutra);
- d) Cobertura Tecnológica: referente ao ônibus Mercedes-Bens, modelo OF1417; banco dinamométrico da empresa Mercedes-Benz.

O último subsistema modelado para a mistura B5 corresponde ao uso do combustível em um veículo urbano de transporte de passageiros. A fonte dos dados para este subsistema foi anteriormente descrita no item 4.2.1.4.1.

O teste de campo foi realizado com a mistura B5, na qual o biodiesel era metílico de soja. Na ausência de informação sobre o consumo de combustível para o B5 etílico de soja, assumiu-se o mesmo valor da opção metílica, que foi igual a 41,7 litros por 100 km rodados. Tal premissa se baseia nos resultados de Nigro et al. (2007), que não identificaram diferenças no consumo do B5 – em ensaios de bancada dinamométrica –, sendo testadas as misturas etílica e metílica de soja.

Na Tabela 58 são informados os dados utilizados para o cálculo dos fatores de emissão, conforme a Equação 1.

**Tabela 58 – Cálculo dos fatores de emissão dos poluentes atmosféricos para o B5**

Dado	CO	CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	HC	MP	Fonte
fe <sub>din<sub>i</sub></sub> (g/kWh)	0,50333	695,663	861,533	4,90	0,18333	Mercedes-Benz, 2012
cons <sub>din</sub> (g/kWh)	219,0	219,0	219,0	219,0	219,0	Nigro et al., 2007
d <sub>comb</sub>	0,867	0,867	0,867	0,867	0,867	-
cons <sub>cam</sub>	2,3239	2,3239	2,3239	2,3239	2,3239	Mercedes-Benz, 2012
FE <sub>i</sub>	0,8499	1174,67	8,2740	0,18333	0,05567	calculado

Cabe destacar que os ensaios de bancada dinamométrica não separam as emissões de CO e CO<sub>2</sub> em fóssil e biogênica, mas quantificam o valor total da emissão. Seguindo a diretriz adotada neste estudo em fazer esta separação, assumiu-se que a contribuição de cada fonte se baseia exclusivamente no volume de cada combustível na mistura. Dessa forma, do total das emissões de CO e CO<sub>2</sub> calculadas com o uso do fator de emissão da Tabela 58, 95% serão classificadas como fóssil (derivadas do óleo diesel) e 5% como biogênica (oriunda do biodiesel etílico de soja), conforme apresenta a Tabela 59.

#### 4.2.2.7.1 Inventário Consolidado do uso do da mistura B5 em ônibus

Baseado na unidade funcional estabelecida no item 4.1.2.2, o inventário da fase de uso foi calculado para o transporte ao longo de 100 km (Tabela 59).

**Tabela 59 – Inventário do transporte de 100 km, em ônibus da Mercedes-Benz, com combustível B5**

Entradas/Saídas	Unidade	Quantidade
<i>Entradas</i>		
B5 blend, at regional storage	l	42,6962
<i>Saídas</i>		
CO, fossil	kg	0,0807414
CO, biogenic		0,0042495
CO <sub>2</sub> , fossil	kg	111,59371
CO <sub>2</sub> , biogenic		5,873353
NO <sub>x</sub>	kg	0,8273953
HC	kg	0,0309570
MP	kg	0,0093997

### 4.3 AVALIAÇÃO DE IMPACTO

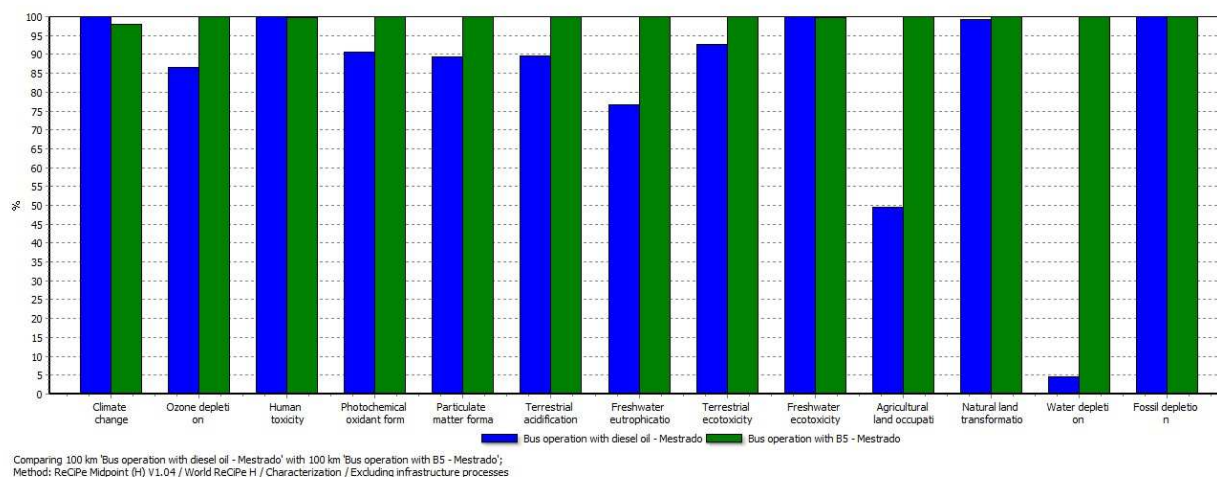
Encerrada a elaboração dos inventários do uso do óleo diesel e da mistura B5, partiu-se para a fase da Avaliação de Impacto. A Tabela 60 apresenta os perfis ambientais, com os resultados de cada categoria avaliada em nível *midpoint*, de acordo com o método *ReCiPe Midpoint (H)* – versão 1.04.

A última coluna da tabela mostra o quanto a mistura B5 se diferenciou do óleo diesel, informação esta que corrobora com o objetivo do trabalho que é avaliar os benefícios e ônus da adição do biodiesel ao combustível de origem fóssil.

**Tabela 60 – Resultados da Avaliação de Impacto, em nível *midpoint*, do transporte de 100 km, em ônibus da Mercedes-Benz**

<b>Categoria</b>	<b>Unidade</b>	<b>Óleo Diesel</b>	<b>Mistura B5</b>	<b>Desvio B5 (%)</b>
Mudanças Climáticas	kg CO <sub>2</sub> eq	127,95	125,24	-2,6
Depleção do Ozônio Estratosférico	kg CFC-11 eq	3,2*10 <sup>-7</sup>	3,7*10 <sup>-7</sup>	+15,5
Toxicidade Humana	kg 1,4-DB eq	67,657	67,399	-0,4
Formação de Foto-Oxidantes	kg NMVOC	0,932	1,028	+10,2
Formação de Material Particulado	kg PM <sub>10</sub> eq	0,207	0,232	+11,9
Acidificação Terrestre	kg SO <sub>2</sub> eq	0,590	0,658	+11,5
Eutrofização em Água Doce	kg P eq	5,7*10 <sup>-5</sup>	7,4*10 <sup>-5</sup>	+30,4
Ecotoxicidade Terrestre	kg 1,4-DB eq	5,4*10 <sup>-4</sup>	5,8*10 <sup>-4</sup>	+8,0
Ecotoxicidade em Água Doce	kg 1,4-DB eq	0,444	0,443	-0,3
Ocupação de Área Agrícola	m <sup>2</sup> a	3,3*10 <sup>-4</sup>	6,7*10 <sup>-4</sup>	+101,9
Transformação de Área Natural	m <sup>2</sup>	1,4*10 <sup>-3</sup>	1,4*10 <sup>-3</sup>	+0,7
Depleção de Água	m <sup>3</sup>	3,1*10 <sup>-3</sup>	7,0*10 <sup>-2</sup>	+2121,7
Depleção Fóssil	kg petróleo eq	41,778	41,729	-0,1

Na Figura 28, um gráfico de barras ilustra de forma geral qual combustível apresentou pior desempenho em cada categoria – representado pelo resultado igual a 100%.



**Figura 28 – Desempenho ambiental para cada uma das categorias de impacto avaliadas, segundo nível *midpoint***

Por sua vez, a Tabela 61 e a Tabela 62 apresentam, respectivamente, os resultados em nível *endpoint*, de acordo com o método *ReCiPe Endpoint (H) / World ReCiPe H/H* – versão 1.04. Nesta tabela apresentam-se os perfis ambientais (resultados após a caracterização), os fatores de normalização e de ponderação – estes adotados de acordo com o modelo *World Recipe H/H* –, os resultados normalizados e ponderados, bem como o resultado agregado na forma de um indicador único de desempenho ambiental. Cabe lembrar que o indicador único é obtido pela somatória dos resultados ponderados de cada categoria de impacto.



**Tabela 61 – Resultados da Avaliação de Impacto, em nível *endpoint*, do transporte de 100 km, em ônibus da Mercedes-Benz, com óleo diesel**

Categoria	Perfil	Fator de	Resultado	Fator de	Resultado
	Ambiental	normalização	normalizado <sup>g</sup>	ponderação	ponderado <sup>g</sup>
	(1)	(2)	(1)*(2)	(3)	(1)*(2)*(3)
Mudanças Climáticas (Saúde Humana)	$1,8*10^{-4}$ <sup>a</sup>	74,6 <sup>d</sup>	$1,3*10^{-2}$	300	4,01
Depleção do Ozônio Estratosférico	$8,5*10^{-10}$ <sup>a</sup>	74,6 <sup>d</sup>	$6,3*10^{-8}$	300	$1,9*10^{-5}$
Toxicidade Humana	$4,7*10^{-5}$ <sup>a</sup>	74,6 <sup>d</sup>	$3,5*10^{-3}$	300	1,06
Formação de Foto-Oxidantes	$3,6*10^{-8}$ <sup>a</sup>	74,6 <sup>d</sup>	$2,7*10^{-6}$	300	$8,1*10^{-4}$
Formação de Material Particulado	$5,4*10^{-5}$ <sup>a</sup>	74,6 <sup>d</sup>	$4,0*10^{-3}$	300	1,21
Mudanças Climáticas (Ecossistemas)	$1,0*10^{-6}$ <sup>a</sup>	$1,17*10^3$ <sup>d</sup>	$1,2*10^{-3}$	400	0,475
Acidificação Terrestre	$3,4*10^{-9}$ <sup>b</sup>	$1,17*10^3$ <sup>e</sup>	$4,0*10^{-6}$	400	$1,6*10^{-3}$
Eutrofização em Água Doce	$2,5*10^{-12}$ <sup>b</sup>	$1,17*10^3$ <sup>e</sup>	$2,9*10^{-9}$	400	$1,2*10^{-6}$
Ecotoxicidade Terrestre	$6,9*10^{-11}$ <sup>b</sup>	$1,17*10^3$ <sup>e</sup>	$8,1*10^{-8}$	400	$3,2*10^{-5}$
Ecotoxicidade em Água Doce	$1,2*10^{-10}$ <sup>b</sup>	$1,17*10^3$ <sup>e</sup>	$1,4*10^{-7}$	400	$5,4*10^{-5}$
Ocupação de Área Agrícola	$4,7*10^{-12}$ <sup>b</sup>	$1,17*10^3$ <sup>e</sup>	$5,5*10^{-9}$	400	$2,2*10^{-6}$
Transformação de Área Natural	$2,5*10^{-9}$ <sup>b</sup>	$1,17*10^3$ <sup>e</sup>	$2,9*10^{-6}$	400	$1,2*10^{-3}$
Depleção Fóssil	671 <sup>c</sup>	$4,56*10^{-5}$ <sup>f</sup>	$3,1*10^{-2}$	300	9,18
<b>Indicador Único (Pt)</b>	-	-	-	-	<b>15,93</b>

Notas: <sup>a</sup>: categoria medida em DALY (disability adjusted life year).

<sup>b</sup>: categoria medida em species.year.

<sup>c</sup>: categoria medida em \$.

<sup>d</sup>: fator medido em 1/DALY.

<sup>e</sup>: fator medido em 1/species.year.

<sup>f</sup>: fator medido em 1/\$.

<sup>g</sup>: resultado medido em Pt.

**Tabela 62 – Resultados da Avaliação de Impacto, em nível *endpoint*, do transporte de 100 km, em ônibus da Mercedes-Benz, com mistura B5**

Categoria	Perfil	Fator de	Resultado	Fator de	Resultado
	Ambiental	normalização	normalizado <sup>g</sup>	ponderação	ponderado <sup>g</sup>
	(1)	(2)	(1)*(2)	(3)	(1)*(2)*(3)
Mudanças Climáticas (Saúde Humana)	$1,8*10^{-4}$ <sup>a</sup>	74,6 <sup>d</sup>	$1,3*10^{-2}$	300	3,92
Depleção do Ozônio Estratosférico	$9,8*10^{-10}$ <sup>a</sup>	74,6 <sup>d</sup>	$7,3*10^{-8}$	300	$2,2*10^{-5}$
Toxicidade Humana	$4,7*10^{-5}$ <sup>a</sup>	74,6 <sup>d</sup>	$3,5*10^{-3}$	300	1,05
Formação de Foto-Oxidantes	$4,0*10^{-8}$ <sup>a</sup>	74,6 <sup>d</sup>	$3,0*10^{-6}$	300	$9,0*10^{-4}$
Formação de Material Particulado	$6,0*10^{-5}$ <sup>a</sup>	74,6 <sup>d</sup>	$4,5*10^{-3}$	300	1,35
Mudanças Climáticas (Ecossistemas)	$9,9*10^{-7}$ <sup>a</sup>	$1,17*10^3$ <sup>d</sup>	$1,2*10^{-3}$	400	0,465
Acidificação Terrestre	$3,8*10^{-9}$ <sup>b</sup>	$1,17*10^3$ <sup>e</sup>	$4,5*10^{-6}$	400	$1,8*10^{-3}$
Eutrofização em Água Doce	$3,3*10^{-12}$ <sup>b</sup>	$1,17*10^3$ <sup>e</sup>	$3,8*10^{-9}$	400	$1,5*10^{-6}$
Ecotoxicidade Terrestre	$7,4*10^{-11}$ <sup>b</sup>	$1,17*10^3$ <sup>e</sup>	$8,7*10^{-8}$	400	$3,5*10^{-5}$
Ecotoxicidade em Água Doce	$1,2*10^{-10}$ <sup>b</sup>	$1,17*10^3$ <sup>e</sup>	$1,3*10^{-7}$	400	$5,4*10^{-5}$
Ocupação de Área Agrícola	$8,5*10^{-12}$ <sup>b</sup>	$1,17*10^3$ <sup>e</sup>	$9,9*10^{-9}$	400	$4,0*10^{-6}$
Transformação de Área Natural	$2,5*10^{-9}$ <sup>b</sup>	$1,17*10^3$ <sup>e</sup>	$2,9*10^{-6}$	400	$1,2*10^{-3}$
Depleção Fóssil	670 <sup>c</sup>	$4,56*10^{-5}$ <sup>f</sup>	$3,1*10^{-2}$	300	9,17
<b>Indicador Único (Pt)</b>	-	-	-	-	<b>15,96</b>

Notas: <sup>a</sup>: categoria medida em DALY (disability adjusted life year).

<sup>b</sup>: categoria medida em species.year.

<sup>c</sup>: categoria medida em \$.

<sup>d</sup>: fator medido em 1/DALY.

<sup>e</sup>: fator medido em 1/species.year.

<sup>f</sup>: fator medido em 1/\$.

<sup>g</sup>: resultado medido em Pt.

Os resultados da presente avaliação indicaram que o desempenho ambiental da operação do ônibus Mercedes-Benz, com a mistura B5 – 95% de óleo diesel e 5% de biodiesel etílico de soja, em base volumétrica – apresentou desvantagem em relação à operação do mesmo veículo com 100% de óleo diesel em nove das treze categorias avaliadas: Depleção do Ozônio Estratosférico; Formação de Foto-oxidantes; Formação de Material Particulado; Acidificação Terrestre; Eutrofização de Água Doce; Ecotoxicidade Terrestre; Ocupação de Área Agrícola; Transformação de Área Natural; e Depleção de Água.

Na categoria Mudanças Climáticas, o desempenho ambiental da mistura B5 foi 2,1% melhor que do óleo diesel. Nas demais três categorias – Toxicidade Humana, Ecotoxicidade em Água Doce e Depleção Fóssil – ambos os combustíveis obtiveram um resultado do indicador da categoria equivalente, com ligeira vantagem ambiental para a mistura B5.

Quando comparados por meio de um indicador único, ambos os combustíveis apresentaram semelhante desempenho ambiental, com o resultado do indicador da mistura sendo 0,2% maior que o obtido pelo óleo diesel.

Cabe destacar que os resultados ora indicados são válidos tão somente para as condicionantes estabelecidas neste estudo, tais como: fronteiras do sistema, fonte dos dados, critério de alocação, método de avaliação de impacto, entre outras. Não é válido o uso dos resultados desta ACV para declarações indiscriminadas e genéricas acerca da mistura do biodiesel ao óleo diesel.

Neste item foram apresentados apenas os valores quantificados das categorias de impacto. No capítulo 5 é feita uma discussão mais profunda em relação a cada uma das categorias avaliadas.

## 5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são discutidas com maior nível de detalhe cada uma das categorias de impacto avaliadas – medidas em nível *midpoint* –, no que diz respeito aos processos elementares (ou subsistemas) e os aspectos ambientais mais significativos.

Em se tratando do desempenho da mistura B5, objetivou-se avaliar qual o benefício e ônus que a incorporação do biodiesel ao óleo diesel pode trazer em termos de desempenho ambiental, medido segundo o exercício da função de transporte de pessoas em um trecho de 100 km.

### 5.1 ANÁLISE DE CONTRIBUIÇÃO

#### 5.1.1 Mudanças Climáticas

Em termos da categoria Mudanças Climáticas, a mistura B5 apresentou desempenho favorável (resultado do indicador da categoria 2,1% inferior) em comparação ao óleo diesel.

A Tabela 63 indica quais os processos que mais contribuíram para as emissões de GEE; na Tabela 64 esta avaliação é feita em termos de quais tipos de emissões foram mais significativas.

**Tabela 63 – Principais processos elementares contribuintes para a categoria Mudanças Climáticas**

Processo	Óleo Diesel		Mistura B5	
	Quantidade (kg CO <sub>2</sub> eq)	Contribuição (%)	Quantidade (kg CO <sub>2</sub> eq)	Contribuição (%)
Bus operation	114,6	89,6	111,6	89,1
Crude oil, at production	3,242	2,5	3,229	2,6
Natural gas, combusted in industrial boiler	3,167	2,5	3,154	2,5
Residual fuel oil, combusted in industrial boiler	2,605	2,0	2,594	2,1
Others	4,287	3,4	4,669	3,7

Para ambos os combustíveis, o processo mais significativo em termos de emissões de CO<sub>2eq</sub> é a operação do veículo, que respondeu por praticamente 90% do total. A produção do petróleo e a combustão de fontes de energia – gás natural e óleo residual – para a geração de energia térmica foram outros processos de maior contribuição para esta categoria.

**Tabela 64 – Principais aspectos ambientais contribuintes para a categoria Mudanças Climáticas**

Aspecto ambiental	Óleo Diesel		Mistura B5	
	<i>Quantidade</i>	<i>Contribuição</i>	<i>Quantidade</i>	<i>Contribuição</i>
	<i>(kg CO<sub>2 eq</sub>)</i>	<i>(%)</i>	<i>(kg CO<sub>2 eq</sub>)</i>	<i>(%)</i>
Carbon dioxide, fossil	123,1	96,2	120,4	96,1
Methane, fossil	3,616	2,8	3,601	2,9
Carbon dioxide, land transformation	0,654	0,5	0,659	0,5
Dinitrogen monoxide	0,575	0,2	0,600	0,5

O principal gás contribuinte para a categoria Mudanças Climáticas é o CO<sub>2</sub>, gerado principalmente da queima de combustíveis fósseis – destaque para o óleo diesel utilizado na operação do ônibus. Outra parcela deste gás decorre do uso do solo, na qual o carbono contido no solo e na biomassa é emitido após a transformação do meio físico.

As emissões de metano ocorrem em sua grande maioria na extração do petróleo, durante a retirada do recurso fóssil das jazidas.

Cabe lembrar que neste estudo foram diferenciadas as emissões fósseis das biogênicas. Nesta situação, as emissões de CO<sub>2</sub> biogênicas e captura deste gás possuem fatores de caracterização equivalentes à zero; no caso do metano, às emissões biogênicas e fósseis estão associados fatores de caracterização positivos, onde a do biogênico é menor que a do fóssil.

### 5.1.2 Depleção do Ozônio Estratosférico

Para a categoria Depleção da Camada de Ozônio, a mistura B5 também se mostrou em desvantagem, com o resultado do indicador da categoria sendo 15,5% superior ao do óleo diesel. Na Tabela 65 são apresentados os processos de maior

significância dentro desta categoria, enquanto que a Tabela 66 reporta as principais emissões atmosféricas de gases do tipo clorofluorcarbono.

**Tabela 65 – Principais processos elementares contribuintes para a categoria Depleção do Ozônio Estratosférico**

Processo	Óleo Diesel		Mistura B5	
	Quantidade (kg CFC-11 <sub>eq</sub> )	Contribuição (%)	Quantidade (kg CFC-11 <sub>eq</sub> )	Contribuição (%)
Transport, natural gas, pipeline	$2,8 \cdot 10^{-7}$	88,2	$2,8 \cdot 10^{-7}$	74,9
Crude oil, at production onshore	$2,2 \cdot 10^{-8}$	6,9	$6,3 \cdot 10^{-8}$	16,8
Others	$1,5 \cdot 10^{-8}$	4,9	$3,1 \cdot 10^{-8}$	8,3

O processo que contribui majoritariamente para a é o transporte de gás natural por gasodutos. Estas emissões não decorrem da queima de algum combustível, e sim em função de vazamentos nas tubulações.

O segundo processo mais impactante, e neste caso mais significativo para a mistura B5, é a extração de petróleo, que também libera gases clorofluorcarbono durante sua operação. Vale lembrar que este processo pertence à base de dados *Ecoinvent*, e não foi aquele escolhido para a modelagem da produção de óleo diesel. O mesmo foi incluído em razão da adoção de outros elementos do *Ecoinvent* que trazem consigo este inventário.

**Tabela 66 – Principais aspectos ambientais contribuintes para a categoria Depleção do Ozônio Estratosférico**

Aspecto ambiental	Óleo Diesel		Mistura B5	
	Quantidade (kg CFC-11 <sub>eq</sub> )	Contribuição (%)	Quantidade (kg CFC-11 <sub>eq</sub> )	Contribuição (%)
Methane, bromochlorodifluoro-, Halon 1211	$2,8 \cdot 10^{-7}$	86,9	$2,8 \cdot 10^{-7}$	75,1
Methane, bromotrifluoro-, Halon 1301	$2,4 \cdot 10^{-8}$	7,3	$7,4 \cdot 10^{-8}$	19,8
Methane, chlorodifluoro-, HCFC-22	$7,3 \cdot 10^{-9}$	2,3	$7,3 \cdot 10^{-9}$	1,9
Ethane, 1,2-dichloro-1,1,2,2-tetrafluoro-, CFC-114	$5,7 \cdot 10^{-9}$	1,8	$5,9 \cdot 10^{-9}$	1,6
Methane, dichlorodifluoro-, CFC-12	$4,9 \cdot 10^{-9}$	1,5	$4,9 \cdot 10^{-9}$	1,3
Methane, tetrachloro-, CFC-10	$5,8 \cdot 10^{-10}$	0,2	$7,6 \cdot 10^{-10}$	0,2

Os principais aspectos ambientais identificados nesta categoria foram o Halon 1211 e o Halon 1301. O primeiro decorre fundamentalmente em razão do transporte de

gás natural em gasodutos; por outro lado, a emissão do gás Halon 1301 ocorre em sua maior proporção durante a extração de petróleo, segundo modelo *Ecoinvent*.

### 5.1.3 Toxicidade Humana

No que diz respeito à categoria Toxicidade Humana, os dois combustíveis apresentaram desempenho similares (apenas 0,4% de diferença) para a mistura B5. Na Tabela 67 são apresentados os processos de maior significância dentro desta categoria, enquanto que a Tabela 68 reporta as principais emissões atmosféricas de gases do tipo clorofluorcarbono.

**Tabela 67 – Principais processos elementares contribuintes para a categoria Toxicidade Humana**

Processo	Óleo Diesel		Mistura B5	
	Quantidade (kg 1,4-DB eq)	Contribuição (%)	Quantidade (kg 1,4-DB eq)	Contribuição (%)
Crude oil, at production	66,731	98,6	66,456	98,6
Natural gas, at extraction site	0,639	0,9	0,636	0,9
Others	0,287	0,5	0,306	0,5

Em termos de Toxicidade Humana, o processo que praticamente responde por todo impacto ambiental desta categoria é a produção de petróleo, que libera componentes tóxicos para a água (principalmente) e para o ar.

**Tabela 68 – Principais aspectos ambientais contribuintes para a categoria Toxicidade Humana**

Aspecto ambiental	Óleo Diesel		Mistura B5	
	Quantidade (kg 1,4-DB eq)	Contribuição (%)	Quantidade (kg 1,4-DB eq)	Contribuição (%)
Barium <sup>a</sup>	66,687	98,6	66,415	98,5
Arsenic, ion <sup>a</sup>	0,562	0,8	0,561	0,8
Others	0,407	0,6	0,423	0,7

Notas: <sup>a</sup>: emissão para a água

A maior emissão de substância tóxica se mostrou na forma de barium, que ocorre no processo de extração de petróleo. O arsênico, segundo maior contribuinte desta categoria, também é emitido para a água no mesmo processo.

### 5.1.4 Formação de Foto-oxidantes

Em termos da categoria Formação de Foto-Oxidantes, a mistura B5 apresentou um resultado do indicador da categoria 10,2% acima do óleo diesel. A Tabela 69 indica quais os processos que mais contribuíram para as emissões atmosféricas desta categoria; na Tabela 70 esta avaliação é feita em termos de quais tipos de emissões foram mais significativas.

**Tabela 69 – Principais processos elementares contribuintes para a categoria Formação de Foto-oxidantes**

Processo	Óleo Diesel		Mistura B5	
	Quantidade (kg NMVOC)	Contribuição (%)	Quantidade (kg NMVOC)	Contribuição (%)
Bus operation	0,740	79,4	0,831	81,6
Diesel, at refinery	0,112	12,0	0,111	10,9
Transport, ocean freighter, residual fuel oil powered	0,045	4,8	0,045	4,4
Others	0,035	3,8	0,031	3,0

Praticamente 80% das emissões atmosféricas de foto-oxidantes decorrem da operação do ônibus, das quais fazem parte o NO<sub>x</sub>, CO e hidrocarbonetos. Um segundo processo relevante para esta categoria é a produção de óleo diesel.

**Tabela 70 – Principais aspectos ambientais contribuintes para a categoria Formação de Foto-oxidantes**

Aspecto ambiental	Óleo Diesel		Mistura B5	
	Quantidade (kg NMVOC)	Contribuição (%)	Quantidade (kg NMVOC)	Contribuição (%)
Nitrogen oxides	0,810	86,9	0,904	88,0
NMVOC, unspecified origin	0,081	8,7	0,081	7,9
Carbon monoxide, fossil	0,025	2,6	0,025	2,4
Others	0,017	1,9	0,018	1,7

O NO<sub>x</sub>, maior contribuinte para a categoria Formação de Foto-Oxidantes, é uma emissão atmosférica que ocorre em diversos processos deste estudo. No entanto, a maior parcela deste gás é emitida nas etapas de transporte, tais quais: marítimo e de operação ônibus.

Por outro lado, as emissões de NMVOC estão em sua maior proporção associadas à atividade das refinarias.



### 5.1.5 Formação de Material Particulado

Na categoria Formação de Material Particulado, a mistura B5 apresentou um resultado do indicador da categoria 11,9% acima do óleo diesel. A Tabela 71 indica quais os processos que mais contribuíram para esta categoria; na Tabela 72 apresentam-se quais aspectos ambientais foram mais significativos.

**Tabela 71 – Principais processos elementares contribuintes para a categoria Formação de Material Particulado**

Processo	Óleo Diesel		Mistura B5	
	Quantidade (kg PM <sub>10</sub> eq)	Contribuição (%)	Quantidade (kg PM <sub>10</sub> eq)	Contribuição (%)
Bus operation	0,162	78,3	0,182	78,4
Diesel, at refinery	0,019	9,3	0,019	8,2
Transport, ocean freighter, residual fuel oil powered	0,012	5,8	0,012	5,2
Others	0,014	6,6	0,019	8,2

Similar ao perfil identificado na categoria Formação de Foto-Oxidante, praticamente 80% das emissões atmosféricas de material particulado decorre da operação do ônibus. Em segundo lugar, encontra-se processo de produção de óleo diesel nas refinarias.

**Tabela 72 – Principais aspectos ambientais contribuintes para a categoria Formação de Material Particulado**

Aspecto ambiental	Óleo Diesel		Mistura B5	
	Quantidade (kg PM <sub>10</sub> eq)	Contribuição (%)	Quantidade (kg PM <sub>10</sub> eq)	Contribuição (%)
Nitrogen oxides	0,178	86,0	0,199	85,8
Sulfur oxides	0,0206	9,9	0,0205	8,8
Others	8,4*10 <sup>-3</sup>	4,1	0,0125	5,4

O NO<sub>x</sub>, maior contribuinte para a categoria Formação de Material Particulado, é uma emissão atmosférica que ocorre em diversos processos deste estudo. No entanto, a maior parcela deste gás é emitida nas etapas de transporte, tais quais: marítimo e de operação ônibus.

Por outro lado, as emissões de SO<sub>x</sub> estão em sua maior proporção associadas à produção de óleo diesel e processamento do gás natural.

### 5.1.6 Acidificação Terrestre

Com um perfil semelhante ao da Formação de Foto-Oxidantes, a mistura B5 apresentou pior desempenho ambiental (resultado do indicador da categoria superior em 11,5%) também na categoria Acidificação Terrestre. Na Tabela 73 são apresentados os processos de maior contribuição; na Tabela 74 são indicadas as principais emissões para o solo constituintes desta categoria.

**Tabela 73 – Principais processos elementares contribuintes para a categoria Acidificação Terrestre**

Processo	Óleo Diesel		Mistura B5	
	Quantidade (kg SO <sub>2</sub> eq)	Contribuição (%)	Quantidade (kg SO <sub>2</sub> eq)	Contribuição (%)
Bus operation	0,412	70,9	0,463	72,3
Diesel, at refinery	0,090	15,5	0,090	14,1
Transport, ocean freighter, residual fuel oil powered	0,030	5,2	0,030	4,7
Natural gas, processed, at plant	0,030	5,2	0,029	4,5
Others	0,019	3,2	0,028	4,4

Semelhante à situação da Formação de Foto-oxidantes, a operação do ônibus é a grande contribuinte para a categoria Acidificação Terrestre, fundamentalmente em decorrência das emissões de NO<sub>x</sub>. Nesta categoria também ocupa a segunda posição, em termos de relevância, a produção de óleo diesel nas refinarias.

**Tabela 74 – Principais aspectos ambientais contribuintes para a categoria Acidificação Terrestre**

Aspecto ambiental	Óleo Diesel		Mistura B5	
	Quantidade (kg SO <sub>2</sub> eq)	Contribuição (%)	Quantidade (kg SO <sub>2</sub> eq)	Contribuição (%)
Nitrogen oxides	0,453	76,8	0,506	76,9
Sulfur oxides	0,103	17,5	0,103	15,6
Sulfur dioxide	0,031	5,3	0,047	7,2
Ammonia	0,002	0,4	0,002	0,3

Conforme apresentado na categoria Formação de Foto-Oxidantes, a liberação de NO<sub>x</sub> está associada aos processos de transporte. Para a categoria Acidificação Terrestre, as emissões de compostos de enxofre também apresentaram destaque, e

as mesmas ocorrem nos processo de produção de óleo diesel e processamento do gás natural.

### 5.1.7 Eutrofização em Água Doce

Para a categoria Eutrofização em Água Doce, a mistura B5 mais uma vez apresentou desvantagem em comparação ao óleo diesel, com resultado do indicador da categoria 30,4% superior. Na Tabela 75 são apresentados os processos de maior contribuição, enquanto que a Tabela 76 reporta as principais emissões aquáticas pertencentes a esta categoria.

**Tabela 75 – Principais processos elementares contribuintes para a categoria Eutrofização em Água Doce**

Processo	Óleo Diesel		Mistura B5	
	Quantidade (kg P eq)	Contribuição (%)	Quantidade (kg P eq)	Contribuição (%)
Disposal, spoil from coal mining, in surface landfill	$4,6 \cdot 10^{-5}$	80,3	$4,8 \cdot 10^{-5}$	65,2
Disposal, spoil from lignite mining, in surface landfill	$4,1 \cdot 10^{-6}$	7,2	$1,8 \cdot 10^{-5}$	24,3
Single superphosphate, as P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , at regional storehouse	$3,3 \cdot 10^{-6}$	5,8	$3,3 \cdot 10^{-6}$	4,5
Disposal, refinery sludge, 89.5% water, to sanitary landfill	$1,9 \cdot 10^{-6}$	3,3	$1,9 \cdot 10^{-6}$	2,5
Sugarcane production, at farm	$1,3 \cdot 10^{-6}$	2,3	$1,3 \cdot 10^{-6}$	1,8
Others	$6,2 \cdot 10^{-7}$	1,1	$1,3 \cdot 10^{-6}$	1,7

Os processos que se mostraram serem os mais impactantes nesta categoria estão relacionados à disposição de material em aterros sanitários. No presente estudo, os materiais de relevância são os rejeitos das minas de carvão e de linhita.

**Tabela 76 – Principais aspectos ambientais contribuintes para a categoria Eutrofização em Água Doce**

Aspecto ambiental	Óleo Diesel		Mistura B5	
	Quantidade (kg P eq)	Contribuição (%)	Quantidade (kg P eq)	Contribuição (%)
Phosphate	$5,5 \cdot 10^{-5}$	97,4	$7,3 \cdot 10^{-5}$	97,9
Phosphorus	$1,5 \cdot 10^{-6}$	2,6	$1,6 \cdot 10^{-6}$	2,1

Dentre os aspectos ambientais pertencentes à categoria Eutrofização em Água Doce, as emissões de fósforo – em especial o fosfato – foram aquelas que mais contribuíram para este impacto.

### 5.1.8 Ecotoxicidade Terrestre

Em termos da categoria Ecotoxicidade Terrestre, a mistura B5 obteve um resultado do indicador da categoria 8,0% superior ao do óleo diesel, o que implica em pior desempenho ambiental.

A Tabela 77 indica quais os processos que mais contribuíram para as emissões desta categoria; na Tabela 78 são discriminados os lançamentos para o solo que causam este impacto.

**Tabela 77 – Principais processos elementares contribuintes para a categoria Ecotoxicidade Terrestre**

Processo	Óleo Diesel		Mistura B5	
	Quantidade (kg 1,4-DB <sub>eq</sub> )	Contribuição (%)	Quantidade (kg 1,4-DB <sub>eq</sub> )	Contribuição (%)
Sugarcane production, at farm	0,0004	72,9	0,0004	73,1
Diesel, at refinery	$5,4 \cdot 10^{-5}$	10,0	$5,4 \cdot 10^{-5}$	9,9
Residual fuel oil, combusted in industrial boiler	$5,1 \cdot 10^{-5}$	9,5	$5,1 \cdot 10^{-5}$	9,3
Others	$4,4 \cdot 10^{-5}$	8,2	$4,2 \cdot 10^{-5}$	7,7

Para a categoria Ecotoxicidade Terrestre o processo de maior relevância é a produção de cana-de-açúcar, no qual ocorre a emissão de pesticidas e metais para o solo.

Nesta categoria não apenas as emissões para o solo contribuem para o impacto, mas também emissões para o ar e água. Na produção de óleo diesel, as emissões atmosféricas de aldeídos são as grandes responsáveis pela Ecotoxicidade Terrestre, enquanto que na combustão do óleo residual o papel cabe à emissão para o ar de níquel.

**Tabela 78 – Principais aspectos ambientais contribuintes para a categoria Ecotoxicidade Terrestre**

Aspecto ambiental	Óleo Diesel		Mistura B5	
	Quantidade	Contribuição	Quantidade	Contribuição
	(kg 1,4-DB eq)	(%)	(kg 1,4-DB eq)	(%)
Diuron <sup>a</sup>	$3,8 \cdot 10^{-4}$	71,7	$3,9 \cdot 10^{-4}$	66,9
Aldehydes, unspecified <sup>b</sup>	$6,2 \cdot 10^{-5}$	11,4	$6,2 \cdot 10^{-5}$	10,5
Nickel <sup>b</sup>	$4,5 \cdot 10^{-5}$	8,4	$4,7 \cdot 10^{-5}$	8,0
Vanadium <sup>b</sup>	$1,6 \cdot 10^{-5}$	2,9	$2,1 \cdot 10^{-5}$	3,6
Cobalt <sup>b</sup>	$7,3 \cdot 10^{-6}$	1,3	$7,5 \cdot 10^{-6}$	1,3
Copper <sup>b</sup>	$4,9 \cdot 10^{-6}$	0,9	$2,5 \cdot 10^{-5}$	4,3
Others	$1,8 \cdot 10^{-5}$	3,3	$3,1 \cdot 10^{-5}$	5,4

Notas: a: emissão para o solo

b: emissão para o ar

O diuron foi identificado como o aspecto ambiental que mais acarreta dano ambiental em termos de Ecotoxicidade Terrestre. Tal elemento é lançado no solo em decorrência do uso de pesticidas na cultura da cana-de-açúcar.

Os aldeídos, por sua vez, são lançados para o ar no processo de produção de óleo diesel nas refinarias.

### 5.1.9 Ecotoxicidade em Água Doce

A categoria Ecotoxicidade em Água Doce foi uma das poucas em que a mistura B5 apresentou desempenho ligeiramente favorável (resultado do indicador da categoria 0,3% menor). Na Tabela 79 são apresentados os processos de maior contribuição; na Tabela 80 são indicadas as principais emissões para o solo constituintes desta categoria.

**Tabela 79 – Principais processos elementares contribuintes para a categoria Ecotoxicidade em Água Doce**

Processo	Óleo Diesel		Mistura B5	
	Quantidade	Contribuição	Quantidade	Contribuição
	(kg 1,4-DB eq)	(%)	(kg 1,4-DB eq)	(%)
Crude oil, at production	0,434	97,8	0,432	97,6
Disposal, refinery sludge, 89.5% water, to sanitary landfill	0,004	1,0	0,004	1,0
Others	0,005	1,2	0,006	1,4

A respeito da categoria Ecotoxicidade em Água Doce, o impacto é quase que exclusivamente (aproximadamente 98%) causado pelas emissões aquáticas de substâncias tóxicas no processo de extração de petróleo.

**Tabela 80 – Principais aspectos ambientais contribuintes para a categoria Ecotoxicidade em Água Doce**

Aspecto ambiental	Óleo Diesel		Mistura B5	
	Quantidade (kg 1,4-DB eq)	Contribuição (%)	Quantidade (kg 1,4-DB eq)	Contribuição (%)
Barium	0,436	98,1	0,434	98,0
Nickel, ion	0,003	0,8	0,003	0,8
Zinc, ion	0,001	0,3	0,001	0,3
Others	0,005	0,8	0,004	0,9

O barium identificado como principal aspecto ambiental na categoria Ecotoxicidade em Água Doce é o mesmo elemento relevante da categoria Toxicidade Humana.

#### 5.1.10 Ocupação de Área Agrícola

A categoria Ocupação de Área Agrícola foi a que apresentou a segunda maior diferença entre os combustíveis avaliados, com a mistura B5 obtendo um resultado do indicador da categoria 101,9% maior que o do óleo diesel. Na Tabela 81 são apresentados os processos de maior contribuição; na Tabela 82 são indicadas as principais emissões para o solo constituintes desta categoria.

**Tabela 81 – Principais processos elementares contribuintes para a categoria Ocupação de Área Agrícola**

Processo	Óleo Diesel		Mistura B5	
	Quantidade (m <sup>2</sup> a)	Contribuição (%)	Quantidade (m <sup>2</sup> a)	Contribuição (%)
Process-specific burdens, sanitary landfill	2,9*10 <sup>-4</sup>	88,1	2,9*10 <sup>-4</sup>	43,5
Softwood, standing, under bark, in forest	1,6*10 <sup>-5</sup>	4,9	1,0*10 <sup>-4</sup>	15,1
Hardwood, standing, under bark, in forest	9,3*10 <sup>-6</sup>	2,8	1,3*10 <sup>-4</sup>	20,1
Softwood, Scandinavian, standing, under bark, in forest	3,1*10 <sup>-6</sup>	0,9	1,3*10 <sup>-4</sup>	19,1
Others	1,1*10 <sup>-5</sup>	3,3	1,4*10 <sup>-5</sup>	2,2

No caso do óleo diesel, o processo de maior relevância foi a operação de aterro sanitário, que demanda uma considerável área (potencialmente agrícola) para tratar os resíduos vindos, principalmente, da extração do petróleo.

Para a mistura B5, o aterro sanitário também é o processo de maior contribuição, mas a utilização de madeira para a produção de papel Kraft (posteriormente utilizado nas embalagens de insumos industriais) e energia elétrica em processos de co-geração adicionalmente contribuem para o impacto desta categoria.

**Tabela 82 – Principais aspectos ambientais contribuintes para a categoria Ocupação de Área Agrícola**

Aspecto ambiental	Óleo Diesel		Mistura B5	
	Quantidade ( $m^2a$ )	Contribuição (%)	Quantidade ( $m^2a$ )	Contribuição (%)
Occupation, shrub land, sclerophyllous	$3,0 \cdot 10^{-4}$	90,6	$3,0 \cdot 10^{-4}$	45,2
Occupation, forest, intensive, normal	$2,6 \cdot 10^{-5}$	7,8	$2,3 \cdot 10^{-4}$	34,6
Occupation, forest, intensive	$3,9 \cdot 10^{-6}$	1,2	$1,3 \cdot 10^{-4}$	19,6
Occupation, permanent crop, fruit, intensive	$2,4 \cdot 10^{-7}$	0,1	$1,7 \cdot 10^{-6}$	0,3
Occupation, forest, intensive, short-cycle	$1,8 \cdot 10^{-7}$	0,1	$1,6 \cdot 10^{-6}$	0,2
Occupation, arable, non-irrigated	$7,3 \cdot 10^{-7}$	0,2	$9,7 \cdot 10^{-7}$	0,1

Esta categoria é medida em função do tamanho e tipo de área ocupada. Para o óleo diesel, a utilização de áreas de cerrado foi identificada como a de maior importância; no caso da mistura B5, o cerrado e áreas de floresta são aquelas mais significativas para a Ocupação de Área Agrícola.

### 5.1.11 Transformação de Área Natural

Na categoria Transformação de Área Natural, ambos os combustíveis obtiveram praticamente o mesmo desempenho, com o resultado do indicador da categoria da mistura B5 sendo apenas 0,7% superior. Na Tabela 83 são apresentados os processos de maior contribuição, enquanto que a Tabela 84 reporta as principais emissões aquáticas pertencentes a esta categoria.

**Tabela 83 – Principais processos elementares contribuintes para a categoria Transformação de Área Natural**

Processo	Óleo Diesel		Mistura B5	
	Quantidade (m <sup>2</sup> )	Contribuição (%)	Quantidade (m <sup>2</sup> )	Contribuição (%)
Electricity, hydropower, at reservoir power plant	1,4*10 <sup>-3</sup>	100,0	1,4*10 <sup>-3</sup>	100,0

Na categoria Transformação de Área Natural, o processo de geração de energia hidrelétrica é responsável por todo este impacto. Tal significância deste processo se justifica pela grande necessidade de terra para a formação dos reservatórios nesta

**Tabela 84 – Principais aspectos ambientais contribuintes para a categoria Transformação de Área Natural**

Aspecto ambiental	Óleo Diesel		Mistura B5	
	Quantidade (m <sup>2</sup> )	Contribuição (%)	Quantidade (m <sup>2</sup> )	Contribuição (%)
Transformation, from forest	1,4*10 <sup>-3</sup>	100,0	1,4*10 <sup>-3</sup>	100,0

Para a formação dos reservatórios, o inventário de geração hidrelétrica do *Ecoinvent* considera uma área anterior de floresta, fato este comprovado pelos dados da tabela acima.

### 5.1.12 Depleção de Água

A categoria Depleção de Água foi a que apresentou maior diferença absoluta entre as alternativas avaliadas, onde o resultado do indicador da categoria da mistura B5 foi 2.121,7% maior que o do óleo diesel. Na Tabela 85 são apresentados os processos de maior contribuição, enquanto que a Tabela 86 reporta as principais emissões aquáticas pertencentes a esta categoria.

**Tabela 85 – Principais processos elementares contribuintes para a categoria Depleção de Água**

Processo	Óleo Diesel		Mistura B5	
	Quantidade (m <sup>3</sup> )	Contribuição (%)	Quantidade (m <sup>3</sup> )	Contribuição (%)
Sulphuric acid, liquid, at plant	1,9*10 <sup>-4</sup>	6,0	6,0*10 <sup>-2</sup>	86,8
Tap water, at user	1,7*10 <sup>-5</sup>	0,5	6,4*10 <sup>-3</sup>	9,3
Water, decarbonised, at plant	1,3*10 <sup>-3</sup>	40,9	1,3*10 <sup>-3</sup>	1,9



Electricity, nuclear, at power plant pressure water reactor	$5,9 \cdot 10^{-4}$	18,6	$5,9 \cdot 10^{-4}$	0,9
Electricity, nuclear, at power plant boiling water reactor	$4,0 \cdot 10^{-4}$	12,6	$4,0 \cdot 10^{-4}$	0,6
Electricity power from bagasse, sugarcane, at fermentation plant	$3,9 \cdot 10^{-4}$	12,3	$3,9 \cdot 10^{-4}$	0,5
Others	$2,9 \cdot 10^{-4}$	9,1	$6,0 \cdot 10^{-7}$	0

Diferentemente das demais categorias, na Depleção de Água o perfil dos principais processos contribuintes não é equivalente entre o óleo diesel e a mistura B5. Para o óleo diesel, um maior conjunto de processos responde pelo total de água consumido (com destaque para a produção de água decarbonizada), ao passo que na mistura B5 a produção de ácido sulfúrico é o processo preponderante em termos de consumo do recurso.

**Tabela 86 – Principais aspectos ambientais contribuintes para a categoria Depleção de Água**

Aspecto ambiental	Óleo Diesel		Mistura B5	
	Quantidade ( $m^3$ )	Contribuição (%)	Quantidade ( $m^3$ )	Contribuição (%)
Water, unspecified natural origin	$3,3 \cdot 10^{-4}$	10,7	0,060	86,3
Water, river	$2,7 \cdot 10^{-3}$	86,8	$6,0 \cdot 10^{-3}$	8,6
Water, well, in ground	$7,5 \cdot 10^{-5}$	2,4	$2,4 \cdot 10^{-3}$	3,5
Water, lake	$3,4 \cdot 10^{-6}$	0,1	$1,2 \cdot 10^{-3}$	1,7

Nesta categoria, o único aspecto ambiental avaliado é o consumo de água. Sendo o recurso natural um mesmo produto, a avaliação pode ser feita em função da sua procedência. No caso do óleo diesel, o consumo se mostrou ser fundamentalmente a partir de rios, enquanto que no caso do biodiesel, a maior procedência foi indicada como não especificada.

### 5.1.13 Depleção Fóssil

Na categoria Depleção Fóssil, novamente os combustíveis obtiveram praticamente a mesma carga de impacto, com uma diferença mínima no resultado do indicador da categoria de 0,1% superior para o óleo diesel. A Tabela 87 indica os processos de maior contribuição, ao passo que a Tabela 88 discrimina os recursos fósseis compreendidos por esta categoria.

**Tabela 87 – Principais processos elementares contribuintes para a categoria Depleção Fóssil**

<b>Processo</b>	<b>Óleo Diesel</b>		<b>Mistura B5</b>	
	<b>Quantidade (kg oil eq)</b>	<b>Contribuição (%)</b>	<b>Quantidade (kg oil eq)</b>	<b>Contribuição (%)</b>
Crude oil, at production	40,045	95,9	39,881	95,6
Natural gas, at extraction site	1,549	3,7	1,543	3,7
Others	0,183	0,4	0,305	0,7

Em termos de Depleção Fóssil, a categoria é medida em função do consumo de recursos fósseis. Dessa forma, o processo de extração de petróleo foi o de maior significância para ambos os combustíveis dada a necessidade do recurso como precursor do óleo diesel.

**Tabela 88 – Principais aspectos ambientais contribuintes para a categoria Depleção Fóssil**

<b>Aspecto ambiental</b>	<b>Óleo Diesel</b>		<b>Mistura B5</b>	
	<b>Quantidade (kg oil eq)</b>	<b>Contribuição (%)</b>	<b>Quantidade (kg oil eq)</b>	<b>Contribuição (%)</b>
Oil, crude, in ground	40,108	96,0	40,055	96,0
Gas, natural, in ground	1,643	3,9	1,644	3,9
Others	0,027	0,1	0,030	0,1

Conforme justificado no parágrafo anterior, esta categoria é medida de acordo com os recursos fósseis consumidos. No presente estudo, o petróleo e o gás natural – este último em menor proporção – foram as fontes de origem não renovável mais utilizadas.

## **5.2 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE**

No intuito de avaliar a confiabilidade dos resultados finais foi realizada uma análise de sensibilidade, que conforme apresentada no item 3.4.4.4, objetiva avaliar de que forma os resultados são influenciados por incertezas nos dados ou por premissas adotadas no estudo.

Dessa forma, os principais pontos de incerteza da modelagem foram levantados e, posteriormente, avaliou-se individualmente o quanto a alteração de cada aspecto modifica os resultados finais, estes últimos medidos por meio do indicador único.

A relação das incertezas avaliadas é apresentada na sequência, bem como quais alterações foram adotadas para a condução da análise de sensibilidade:

- ✓ *Critério de alocação*: substituiu-se o critério de alocação econômica pelo mássico nos subsistemas de produção de óleo de soja; produção de etanol anidro (em destilaria autônoma e em usina anexa); e produção de biodiesel;
- ✓ *Fatores de ponderação*: foram alterados os valores dos fatores de ponderação indicados na Tabela 61. Para todas as categorias de impacto foi associado um mesmo valor igual a 333,33;
- ✓ *Emissões de CO<sub>2</sub> do uso do solo*: em função do modelo adotado para a estimativa desta emissão apresentar um elevado grau de incerteza, decidiu-se zerar esse aspecto ambiental, tanto na produção de soja quanto de cana-de-açúcar;
- ✓ *Fonte de combustível para geração de energia térmica na produção de óleo de soja*: diversas fontes de combustível podem ser utilizadas para a geração de energia térmica nas unidades produtoras de óleo de soja. No presente estudo assumiu-se o uso de óleo combustível, e nesta fase de Interpretação decidiu-se substituir este combustível por gás natural;
- ✓ *Fator de alocação em função do valor comercial da glicerina*: não foram encontradas fontes oficiais e públicas que reportam o preço de mercado da glicerina ao longo da cobertura temporal estabelecida. No presente estudo adotou-se um valor (R\$230,00/t) obtido junto a uma empresa nacional produtora de biodiesel. Para a análise de sensibilidade, adotou-se outro preço (R\$350,00/t) informado por um especialista do setor; e
- ✓ *Inventário do óleo diesel*: conforme indicado no item 4.2.1.2.3, o inventário da produção de óleo diesel foi modelado a partir do uso do banco de dados *USLCI*, enquanto que nos demais subsistemas do estudo, elementos do banco de dados *Ecoinvent* foram adotados. Dessa forma, decidiu-se substituir o inventário do óleo diesel construído pelo original do *Ecoinvent* – nomeado “Diesel, at regional storage/RER U”.

Na Tabela 89 são apresentadas cada uma das incertezas avaliadas por meio da análise de sensibilidade, e o quanto variaram os resultados em relação ao modelo original.

Os resultados da análise de sensibilidade, realizadas em nível *endpoint*, indicaram que nenhuma das incertezas avaliadas alterou significativamente os resultados originalmente obtidos.

A adoção de valores igualitários para os fatores de ponderação alterou os resultados dos indicadores únicos de ambos os combustíveis em 23,0%, e isto acarretou em uma inversão de pior desempenho ambiental, cabendo neste arranjo ao óleo diesel (indicador único da mistura B5 foi 0,04% menor).

Analisando o critério de alocação, as emissões de CO<sub>2</sub> do uso do solo, a fonte de combustível para geração de energia térmica na produção de óleo de soja e o fator de alocação do biodiesel em função do preço da glicerina, constatou-se que essas incertezas não exercem influência sobre o desempenho ambiental do óleo diesel e também são desprezíveis para a mistura B5. Em todas estas modificações, o resultado do indicador da mistura B5 continuou sendo ligeiramente superior ao do óleo diesel.

Por fim, a substituição do inventário construído para a produção de óleo diesel – a partir do banco de dados *USLCI* – pelo original do *Ecoinvent*, alterou em torno de 30% os resultados do indicador único, porém o da mistura B5 permaneceu sendo mais elevado (1,29% superior), e não tão distante da relação no modelo original (0,21%).

**Tabela 89 – Análise de sensibilidade medida em nível *endpoint***

<b>Cenário</b>	<b>Óleo diesel</b>		<b>Mistura B5</b>		<b>Desvio da mistura B5 em relação ao óleo diesel (%)</b>
	<b>Indicador Único</b>	<b>Variação sobre o cenário original (%)</b>	<b>Indicador Único</b>	<b>Variação sobre o cenário original (%)</b>	
Original	15,93	-	15,96	-	0,21
Critério de alocação	15,93	0,0	15,95	-0,1	0,12
Fatores de ponderação	12,27	-22,9	12,27	-23,1	-0,04
Emissões de CO <sub>2</sub> do uso do solo	15,93	0,0	15,96	0,0	0,21
Combustível para geração de energia térmica na produção de óleo de soja	15,93	0,0	15,96	0,0	0,21
Fator de alocação em função do preço da glicerina	15,93	0,0	15,96	0,0	0,21
Troca do inventário do óleo diesel	11,15	-30,0	11,30	-29,2	1,29

## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados da fase de Avaliação de Impacto indicaram que a mistura B5 de biodiesel etílico de soja, quando utilizada em um ônibus urbano da companhia Mercedes-Benz, apresenta pior desempenho ambiental que o óleo diesel em nove das treze categorias avaliadas, quais sejam: *Depleção do Ozônio Estratosférico; Formação de Foto-oxidantes; Formação de Material Particulado; Acidificação Terrestre; Eutrofização de Água Doce; Ecotoxicidade Terrestre; Ocupação de Área Agrícola; Transformação de Área Natural; e Depleção de Água.*

Baseado nos resultados deste estudo de ACV depreende-se que a adição em 5% de éster etílico de soja ao óleo diesel, pelo menos no que se refere à questão ambiental, não se configura em uma medida benéfica. Com exceção da categoria mudanças climáticas, os ônus ambientais, medidos por meio do conjunto de categorias de impacto avaliadas, acentuam-se quando se substitui o óleo diesel pela mistura B5 no transporte de pessoas em um ônibus urbano da Mercedes-Benz.

A qualidade dos resultados do presente estudo foi avaliada por meio de uma análise de sensibilidade, no intuito de verificar de que forma as principais incertezas do estudo influenciam os resultados finais.

O critério de alocação, os fatores de ponderação, as emissões de CO<sub>2</sub> do uso do solo, a fonte de combustível para geração de energia térmica na produção de óleo de soja, o fator de alocação do biodiesel em função do valor comercial da glicerina e o inventário do óleo diesel foram submetidos a testes individuais de sensibilidade, e os resultados (em nível *endpoint*) indicaram que nenhuma das incertezas alterou significativamente os resultados originalmente obtidos.

Cabe reiterar que os resultados desta dissertação são válidos tão somente para as condicionantes estabelecidas neste estudo, tais como: fronteiras do sistema, fonte dos dados, critério de alocação, método de avaliação de impacto, entre outras. Não é válido o uso dos resultados desta ACV para declarações indiscriminadas e genéricas do desempenho ambiental da mistura do biodiesel ao óleo diesel.

Como recomendações para futuros estudos, a elaboração de um inventário da produção de óleo diesel, com o uso de dados próprios dos processos de extração de petróleo e refino que ocorrem no Brasil, é peça fundamental para a determinação do real perfil ambiental do óleo diesel nacional, ou mesmo de qualquer mistura BXX.

Outra recomendação em prol da melhoria da qualidade dos resultados, neste caso mais especificamente para os biocombustíveis, refere-se a uma investigação mais detalhada a respeito do uso do solo e das emissões de CO<sub>2</sub> associadas. Neste caso, é preciso que informações a respeito de como vem ocorrendo o processo de modificação do uso do solo de culturas agrícolas sejam levantadas e estejam disponíveis para a utilização em estudos de ACV. Modelos com menor grau de incerteza na quantificação das emissões de CO<sub>2</sub> decorrentes da modificação do uso do solo também precisam ser desenvolvidos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIOVE – Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais. **Produção Responsável no Agronegócio Soja**. São Paulo, 2007.

\_\_\_\_\_. **Desmistificando o Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel: A visão da indústria brasileira de óleos vegetais**. São Paulo, 2009. Disponível em: < [http://www.abiove.com.br/palestras\\_br.html](http://www.abiove.com.br/palestras_br.html)>. Acesso em: 03 mar. 2010.

\_\_\_\_\_. Apresenta informações sobre a produção de soja no Brasil. Disponível em: < <http://www.abiove.com.br>>. Acesso em: 05 dez. 2011.

ABIQUIM – Associação Brasileira da Indústria Química. **Anuário da Indústria Química Brasileira: Edição 2011**. São Paulo: ABIQUIM, 2011. 256 p.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR ISO 14040: Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR ISO 14044: Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações**. Rio de Janeiro, 2009.

AITA, C.; GIACOMINI, S. J. **Plantas de cobertura de solo em sistemas agrícolas**. In: ALVES, B. J. R. et al. Manejo de sistemas agrícolas: impacto no seqüestro de C e nas emissões de gases de efeito estufa. Porto Alegre: Gênese, 2006, 216p.

ANDA – Associação Nacional para a Difusão de Adubos. **Anuário Estatístico 2010**. São Paulo: ANDA, 2011.

ANDREI, E. **Compêndio de defensivos agrícolas**. 7ª ed. Andrei Ltda: 2005.

ANFAVEA – Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores. **Vendas Atacado Mercado Interno por Tipo e Combustível**. [S.l.], 2011. Disponível em: <[http://www.anfavea.com.br/tabelas/autoveiculos/tabela11\\_vendas.pdf](http://www.anfavea.com.br/tabelas/autoveiculos/tabela11_vendas.pdf)>. Acesso em: 01 fev. 2011.



ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**. Rio de Janeiro: 2011.

\_\_\_\_\_. **Dados estatísticos mensais**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/?pg=59236&m=&t1=&t2=&t3=&t4=&ar=&ps=&cachebust=1338490958562>>. Acesso em: 06 abr. 2012.

BARAKAT, M. A. New trends in removing heavy metals from industrial wastewater. **Arabian Journal of Chemistry**, 2011, v. 4, p. 361-377.

BARBOSA, G. R. **Perspectivas para o Biodiesel no Brasil e no Mundo**. In: 6º Congresso Internacional sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural, 2006, Campinas. Disponível em: <<http://www.feagri.unicamp.br/energia/biocombustiveis/programa.htm>>. Acesso em: 07 mai. 2010.

BAUMANN, H.; TILLMAN, A. M. **The Hitch Hiker's Guide to LCA: An orientation in life cycle assessment methodology and application**. Lund: Studentlitteratur, 2004. 543 p.

BENOÎT, C.; MAZIUN, B. (Ed.). **Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products**. [S.I.]: 2009. 104 p.

BODIESELBR. Curitiba. Apresenta informações sobre a produção de biodiesel no Brasil. Disponível em: <<http://www.biodieselbr.com/>>. Acesso em: 10 fev. 2010.

BRASIL. Governo Federal. **Relatório Final do Grupo de Trabalho Interministerial Encarregado de Apresentar Estudos Sobre a Viabilidade de Utilização de Óleo Vegetal – Biodiesel Como Fonte Alternativa de Energia**. Brasília, 2003. 15 p.

BRASIL. Governo Federal. **Biodiesel. O novo combustível do Brasil**. [S.I.], 2004. 7 p. Disponível em: <<http://www.biodiesel.gov.br/>>. Acesso em: 31 ago. 2009. 8 p.

BRASIL. Câmara dos Deputados. **Biodiesel e Inclusão Social**. Brasília: Câmara dos Deputados, Coordenação de Publicações, 2004. 200 p.

BRASIL. Governo Federal. **Plano Nacional de Agroenergia: 2006-2011**. Brasília, 2005. 120 p.

BRASIL. Lei nº 11.097, de 13 de janeiro de 2005. Dispõe sobre a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira; altera as Leis nos 9.478, de 6 de agosto de 1997, 9.847, de 26 de outubro de 1999 e 10.636, de 30 de dezembro de 2002; e dá outras providências. Brasília, 13 de janeiro de 2005.

BRASIL. Governo Federal. **O futuro da indústria: Biodiesel**. Brasília, 2006. 145 p. Disponível em: < <http://www.biodiesel.gov.br/docs/ofuturodaindustria%20-%20Biodiesel.pdf> >. Acesso em: 07 abr. 2010.

BRASIL. Governo Federal. Apresenta informações sobre o Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel. [S.l], 2006. Disponível em: <<http://www.biodiesel.gov.br/>>. Acesso em: 25 mar. 2010.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética – EPE. **Balanco Energético Nacional 2010**: Ano Base 2009. Rio de Janeiro: EPE, 2010. 276 p.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética – EPE. **Balanco Energético Nacional 2011**: Ano Base 2010. Rio de Janeiro: EPE, 2011. 266 p.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. **Sistema AliceWeb**. Apresenta dados estatísticos das exportações e importações brasileiras. Disponível em: < <http://aliceweb.desenvolvimento.gov.br/> >. Acesso em: 11 mai. 2011.

BRIEU, T. P. **Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel: um Balanco da Primeira Fase até 2008**. 160p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo – EP/FEA/IEE/IF da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

CAMACHO, J. L.; MATAI, P. H. L. S. **Combustíveis e Combustão**. São Paulo: Epusp, 2009. 18 p. Apostila para a disciplina de graduação do Departamento de Engenharia Química, PQI-2110 – Química Tecnológica Industrial.

CAMPOS, A.; CARMELIO, E. C. **Biodiesel e agricultura familiar no Brasil: resultados socioeconômicos e expectativa futura**. [S.l], 2006. 11 p.

CASTRO, A. M. G.; LIMA, S. M. V.; SILVA, J. F. V (Ed.). **Complexo Agroindustrial de Biodiesel no Brasil: Competitividade das Cadeias Produtivas de Matérias-Primas**. Brasília: Embrapa Agroenergia, 2010. 712 p.

CAVALETT, O. **Análise do Ciclo de Vida da Soja. 2008**. 221 p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

CGEE – Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. **Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável**. Rio de Janeiro: BNDES, 2008. 316 p.

COMISSÃO EUROPÉIA. Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC. Official Journal of the European Union, L140/16 de 5.6.2009.

COMISSÃO EUROPÉIA. Institute for Environment and Sustainability. **ILCD Handbook: General guide for Life Cycle Assessment – Detailed guidance**. 1<sup>st</sup> ed. [S.l]: 2010. 414 p.

COMISSÃO EUROPÉIA. Commission Decision of 10 June 2010 on guidelines for the calculation of land carbon stocks for the purpose of Annex V to Directive 2009/28/EC. Official Journal of the European Union, L151/19 de 17.6.2010.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Apresenta informações sobre a agricultura brasileira**. Disponível em: < <http://www.conab.gov.br/>>. Acesso em: 04 dez. 2011.

CORTEZ, L. A. B. **Bioetanol de cana-de-açúcar**: P&D para a produtividade e sustentabilidade. São Paulo: Blücher, 2010. 954 p.

CRISPINO, C. C.; FRANCHINI, J. C.; MORAES, J. Z.; SIBALDELLE, R. N. R.; LOUREIRO, M. F.; SANTOS, E. N.; CAMPO, R. J.; HUNGRIA, M. **Adubação Nitrogenada na Cultura de Soja**: Comunicado Técnico 75. Londrina: Embrapa Soja, 2001. 6 p.

CURRAN, M. A; MANN, M; NORRIS, G. The international workshop on electricity data for life cycle inventories. **Journal of Cleaner Production**, v. 13, n. 13, p. 853-862, 2005.

CURRAN, M. A. **Life Cycle Assessment**: principles and practice. Reston: Scientific Applications International Corporation, 2006. Disponível em: <<http://www.epa.gov/nrmrl/lcaccess/pdfs/600r06060.pdf>>. Acesso em: 03 fev. 2010.

DNPM – DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Anuário Mineral Brasileiro 2010**. Brasília: DNPM, 2011.

DORSA, R. **Tecnologia de Óleos Vegetais**. Campinas: Ideal, 2004.

DUBREUIL, A.; GAILLARD, G.; WENK, R. M. Key Elements in a Framework for Land Use Impact Assessment Within LCA. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 12, n. 1, p. 5-15, 2007.

EBB – European Biodiesel Board. Apresenta informações sobre a produção de biodiesel na União Européia. Disponível em: < <http://www.ebb-eu.org/index.php>>. Acesso em: 04 mai. 2012.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Complexo Agroindustrial de Biodiesel no Brasil**: Competitividade das Cadeias Produtivas de Matérias-Primas. Brasília: Embrapa Agroenergia, 2010. 712 p.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Tecnologias de Produção de Soja** – Região Central do Brasil 2011. Londrina: Embrapa Soja, 2010. 247 p.

EMMENEGGER, M. F.; REINHARD, J.; ZAH, R. **Sustainability Quick Check for Biofuels**: Background Report. Dübendorf, 2009;

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Potencial de Redução de Emissões de CO<sub>2</sub> em Projetos de Produção e Uso de Biocombustíveis**. Convênio nº 039/2005. Rio de Janeiro: EPE, 2007. 66p.

\_\_\_\_\_. Balanço Energético Nacional 2011: Ano Base 2010. Rio de Janeiro: EPE, 2011. 266p.

EPFL. **RSB GHG Calculation Methodology**. Disponível em: <<http://rsb.epfl.ch/files/content/sites/rsb2/files/Biofuels/Version%202/GHG%20Methodology/11-05-20-RSB-STD-01-003-02-Fossil%20Fuel%20Baseline%20GHG%20Calculation%20Methodology.pdf>>. Acesso em: 04 de julho de 2011.

FERRARI, R. A.; OLIVEIRA, V. S.; SCABIO, A. Biodiesel de soja – taxa de conversão em ésteres etílicos, caracterização físico-química e consumo em gerador de energia. **Quim. Nova**, v. 28, n. 1, p. 19-23, 2005.

FRANCHINI, J. **Plantio direto incrementa cultivo de soja**. Londrina, Embrapa, 02 ago. 2010. Entrevista proferida para o programa Prosa Rural, Londrina, 2010. Disponível em: <<http://hotsites.sct.embrapa.br/prosarural/programacao/2010/rotacao-de-culturas-e-plantio-direto-no-cultivo-da-soja>>. Acesso em: 02 mai. 2011.

FRANCO, H.C.J. **Eficiência agrônômica da adubação nitrogenada de cana planta**. Tese (Doutorado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiros. Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2008.

FRISCHKNECHT, R.; JUNGBLUTH, N. (Ed). **Overview and Methodology**. Ecoinvent Report No.1. Dübendorf: 2007.

GABE, U.; RODELLA, A. A. **Trace elements in Brazilian agricultural limestones and mineral fertilizers**. Commun. Soil Sci. Plan., 1999, v. 30, n. 5-6, p. 605–620

GARCIA, C. A.; FUENTES, A. HENNECKE, A.; RIEGELHAUPT, E.; MANZINI, F.; MASERA, O. Life-cycle greenhouse gas emissions and energy balances of sugarcane ethanol production in Mexico. **Applied Energy**. v. 88, p. 2088-2097, 2011.

GLOBALSAT. **Mapeamento e Monitoramento da Moratória da Soja**. S.L.: 2008. Disponível em: [http://www.abiove.com.br/sustent/ms\\_relatorio\\_mon\\_abr08\\_br.pdf](http://www.abiove.com.br/sustent/ms_relatorio_mon_abr08_br.pdf). Acesso em: 26 de agosto de 2011.

\_\_\_\_\_. **2º Ano de Mapeamento e Monitoramento da Moratória da Soja no Bioma Amazônia**. S.L.: 2009. Disponível em: <[http://www.abiove.com.br/sustent/relatorio08/moratoria\\_relatorio\\_globalsat\\_0409.pdf](http://www.abiove.com.br/sustent/relatorio08/moratoria_relatorio_globalsat_0409.pdf)>. Acesso em: 26 de agosto de 2011.

\_\_\_\_\_. **3º Ano de Mapeamento e Monitoramento da Moratória da Soja no Bioma Amazônia**. S.L.: 2010. Disponível em: <[http://www.abiove.com.br/sustent/relatorio09/moratoria09\\_relatorio\\_jul10\\_br.pdf](http://www.abiove.com.br/sustent/relatorio09/moratoria09_relatorio_jul10_br.pdf)>. Acesso em: 26 de agosto de 2011.

\_\_\_\_\_. **4º Ano de Mapeamento e Monitoramento da Moratória da Soja no Bioma Amazônia**. S.L.: 2011. Disponível em: <[http://www.abiove.com.br/sustent/relatorio10/abiove\\_relatorio\\_moratoria\\_br\\_out2011.pdf](http://www.abiove.com.br/sustent/relatorio10/abiove_relatorio_moratoria_br_out2011.pdf)>. Acesso em: 26 de agosto de 2011.

GOEDKOOOP, M.; HEIJUNGS, R.; HUIJBREGTS, M.; DE SCHRYVER, A.; STRUIJS, J.; VAN ZELM, R. **ReCiPe 2008**: A life cycle impact assessment method which comprises harmonized category indicators at the midpoint and endpoint level. First edition, 2009. Disponível em: <<http://www.lcia-recipe.net/>>. Acesso em: 14 mai. 2012.

GONÇALVES, S. L.; GAUDENCIO, C. A.; FRANCHINI, J. C.; GALERANI, P. R.; GARCIA, A. **Rotação de Culturas**: Circular Técnica 45. Londrina: Embrapa Soja, 2007. 10 p.

REET – Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation, version 1.8d. Argonne National Laboratory. Argonne, Illinois, USA, 2010.

GUINÉE, J. B. (Ed.). **Life Cycle Assessment**: an operational guide to the ISO standards. Final Report. Leiden: 2001. Disponível em: <<http://cml.leiden.edu/research/industrialecology/researchprojects/finished/new-dutch-lca-guide.html>>. Acesso em: 16 fev. 2011.

HASSUANI, S. J.; LEAL, M. R. L. V.; MACEDO, I. C. **Biomass Power generation, sugar cane bagasse and trash**. Piracicaba: 2005. Disponível em: <[http://www.ctcanavieira.com.br/media/Seminario\\_Alternativas\\_/00%20-%20Livro\\_BRA96G31.PDF](http://www.ctcanavieira.com.br/media/Seminario_Alternativas_/00%20-%20Livro_BRA96G31.PDF)>.

HOU, J.; ZHANG, P.; YUAN, X.; ZHENG, Y. Life cycle assessment of biodiesel from soybean, jatropha and microalgae in China conditions. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 9, p. 5081-5091, 2011.

HU, Z.; TAN, P.; YAN, X. LOU, D. Life cycle energy, environment and economic assessment of soybean-based biodiesel as an alternative automotive fuel in China. **Energy**, v. 33, p. 1654-1658, 2008.

HUO, H.; WANG, M.; BLOYD, C.; PUTSCHE, A. V. Life-cycle Assessment of Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Soybean-Derived Biodiesel and Renewable Fuels. **Environmental Science & Technology**, v. 43, n. 3, p. 750-756, 2009.

IBAMA. **Produtos agrotóxicos e afins comercializados em 2009 no Brasil**: uma abordagem ambiental. Brasília: 2010.

IDEA. **Indicadores de Desempenho da Agroindústria Canavieira**: safras 2010/11 e 2011/12. Ribeirão Preto: IDEA, 2012.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Biofuels for Transport: An International Perspective**. Paris: Chirat, 2004. 215 p.

INFORMA ECONOMICS FNP. **Agriannual 2007**: Anuário da Agricultura Brasileira. São Paulo: 2007.

\_\_\_\_\_. **Agriannual 2008**: Anuário da Agricultura Brasileira. São Paulo: 2008.

\_\_\_\_\_. **Agriannual 2009**: Anuário da Agricultura Brasileira. São Paulo: 2009.

\_\_\_\_\_. **Agriannual 2010**: Anuário da Agricultura Brasileira. São Paulo: 2010.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Guidelines for national greenhouse gas inventories**, Vol. 4 – Agriculture, forestry and other land use, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Apresenta informações sobre a avaliação das mudanças climáticas. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/>>. Acesso em: 11 mai. 2012.

JUNGBLUTH, N. (Ed). **Life Cycle Inventories of Bioenergy**. Ecoinvent Report No. 17. Uster: 2007.

KIPERSTOK, A.; COELHO, A.; TORRES, E. A.; MEIRA, C. C.; BRADLEY, S. P.; ROSEN, M. **Prevenção da Poluição**. Brasília: SENAI/DN, 2002. 290 p.

KLØVERPRIS, J. H.; BALTZER, K. NIELSEN, P. H. Life Cycle Inventory Modelling of Land Use Induced by Crop Consumption. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 13, n. 1, p. 13-21, 2008.



KNOTHE, G.; VAN GERPEN, J. H.; KRAHL, J. **Manual do Biodiesel**. São Paulo: editora Blucher, 2006. 340 p.

KOELLNER, T.; SCHOLZ, R. W. Assessment of Land Use Impacts on the Nature Environment. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 12, n. 1, p. 16-23, 2007.

KULAY, L. A. **Análise de Ciclo de Vida em Processos Industriais: eAB-007**. São Paulo: EPUSP-EAD/PECE, 2008. 107 p.

LAZZAROTTO, J. J.; HIRAKURI, M. H. **Evolução e Perspectivas de Desempenho Econômico Associadas com a Produção de Soja nos Contextos Mundial e Brasileiro**. Londrina: Embrapa Soja, 2009. 58 p.

LINDEIJER, E. Biodiversity and life support impacts of land use in LCA. **Journal of Cleaner Production**, v. 8, n. 4, p. 313-319, 2000.

LUND; H.; MATHIAESEN, B. V.; CHRISTENSEN P.; SCHMIDT, J. H. Energy system analysis of marginal electricity supply in consequential LCA. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 15, n. 3, p. 260-271, 2010.

MACEDO, I. C.; NOGUEIRA, L. A. H. **Avaliação do Biodiesel no Brasil**. In: BRASIL. Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da República. Cadernos NAE: n. 2 – Biocombustíveis. Brasília, 2004. p. 9-112.

MACEDO, I. C.; SEABRA, J. E. A.; SILVA, J. E. A. R. Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020. **Biomass & Energy**, v. 32, p. 582-595, 2008.

MANDARINO, J. M. G; ROESSING, A. C. **Tecnologia para produção do óleo de soja: descrição das etapas, equipamentos, produtos e subprodutos**. Londrina: Embrapa Soja, 2001. 40 p.

MARBORGES AGROINDÚSTRIA S.A. **A Cultura do Dendê: Mercados e Possibilidades de Expansão.** [S.l]: 2010. Disponível em: <<http://www.pecege.esalq.usp.br/plantas/2.pdf>>. Acesso em: 11 jan. 2011. 50 p.

MARIANO, J. B. **Impactos Ambientais do Refino de Petróleo.** 1ª ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2005.

MARZULLO, R. C. M. **Análise de Ecoeficiência dos óleos vegetais oriundos da soja e palma, visando a produção de biodiesel.** 2007. 302 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2007.

MATTSSON, B.; CEDERBERG, C.; BLIX, L. Agricultural land use in life cycle assessment (LCA): case studies of three vegetable oil crops. **Journal of Cleaner Production**, v. 8, n. 4, p. 283-282, 2000.

MCT – Ministério da Ciência e tecnologia. **Testes e Ensaios para Validação do Uso da Mistura Biodiesel B5 em Motores e Veículos.** Brasília: MCT, 2009. 176 p.

MDIC – Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Sistema AliceWeb. Disponível em: < <http://aliceweb.desenvolvimento.gov.br/>>. Acesso em: 9 nov. 2011.

MERCEDES-BENZ. Dados de testes de campo e em bancada dinamométrica do B5 de soja. Banco de dados da empresa. São Paulo: 2012.

MORETTO, E.; FETT, R. **Óleos e gorduras vegetais: processamento e análises.** 2ª ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1989. 179 p.

MOURAD, A. L. **Avaliação da Cadeia Produtiva de Biodiesel obtido a partir da Soja.** 2008. 141 p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2008.

NBB – National Biodiesel Board. Apresenta informações sobre a produção de biodiesel nos Estados Unidos da América. Disponível em: <<http://www.nbb.org/>>. Acesso em: 04 mai. 2012.

NEMECEK, T.; KÄGI, T. **Life Cycle Inventories of Agricultural Production Systems**. Ecoinvent Report No. 15. Zürich e Dübendorf: 2007.

NIGRO, F.; TRIELLI, M. A.; COSTA, C. M.. Emission characteristics of a diesel engine operating with biodiesel and blends. **SAE Technical Paper** 2007-01-2635, 2007.

NREL – National Renewable Energy Laboratory. Apresenta informações sobre o U.S. Life-Cycle Inventory Database. Disponível em: <<https://www.lcacommons.gov/nrel/search>>. Acesso em 10 dez. 2011.

OMETTO, A. R. **Avaliação do Ciclo de Vida do Álcool Etílico Hidratado Combustível pelos Métodos EDIP, Exergia e Emergia**. 209 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

OMETTO, A. R.; HAUSCHILD, M. Z.; ROMA, W. N. L. Lifecycle assessment of fuel ethanol from sugarcane in Brazil. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 14, n. 3, p. 236-247, 2009.

PANICHELLI, L.; DAURIAT, A.; GNANSOUNOU, E. Life Cycle Assessment of soybean-based biodiesel in Argentina for export. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 14, n. 2, p. 144-159, 2009.

PARENTE, E. J. S. **BIODIESEL: Uma Aventura Tecnológica num País Engraçado**. Fortaleza: 2003, 66 p.

PETROBRAS – PETRÓLEO BRASILEIRO S/A. Apresenta informações da empresa. Disponível em:

<[http://www2.petrobras.com.br/petrobras/portugues/perfil/per\\_EnergRenov.htm](http://www2.petrobras.com.br/petrobras/portugues/perfil/per_EnergRenov.htm)>.

Acesso em: 02 fev. 2011

POTTING, J.; HAUSCHILD, M. **Background for spatial differentiation in life cycle impact assessment: the EDIP2009 Methodology**. Copenhagen: 2004. Disponível em: <<http://www.ipl.dtu.dk/English.aspx>>. Acesso em: 14 mai. 2012.

PRÉ CONSULTANTS. **The Eco-indicator 99: A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment – Methodology Report**. Amersfoort: 2001. Disponível em: <<http://www.pre-sustainability.com/content/reports>>. Acesso em: 14 mai. 2012.

QUEIROZ, M. S. **A Experiência Brasileira em Biocombustíveis**. In: Conferência e Exposição Bial Iniciativa do Ar Limpo nas Cidades da América Latina, 2006, São Paulo. Disponível em: < [http://www.cleanairnet.org/saopaulo/1759/articles-70466\\_resource\\_2.pdf](http://www.cleanairnet.org/saopaulo/1759/articles-70466_resource_2.pdf)>. Acesso em: 29 jan. 2010. 50p.

REIJNDERS, L. HUIJBREGTS, M. A. J. Biogenic greenhouse gas emissions linked to the life cycles of biodiesel derived from Europe rapeseed and Brazilian soybeans. **Journal of Cleaner Production**: v. 16, p. 1943-1948, 2008.

RENOUF, M. A.; PAGAN, R. J.; WEGENER, M. K. Life cycle assessment of Australian sugarcane products with a focus on cane processing. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 16, n. 2, p. 125-137, 2011.

ROCHA, M. H. **Uso da análise do ciclo de vida para comparação do desempenho ambiental de quatro alternativas para tratamento da vinhaça**. 234 p. 2009. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2009.

RODELLA, A. A. **Metais pesados em fertilizantes brasileiros**. [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por: [eduardo.toshio@usp.br](mailto:eduardo.toshio@usp.br) em 20 de jul. 2011

ROMANELLI, T. L.; MILAN, M. **Material flow determination through agricultural machinery management**. *Scientia Agricola*, v. 67, n.4, p. 375-495, 2010.

RUDORFF, B. F. T.; ADAMI, M.; AGUIAR, D. A.; MOREIRA, M. A.; MELLO, M. P.; FABIANI, L.; AMARAL, D. F.; PIRES, B. M. **The Soy Moratorium in the Amazon**

**Biome Monitored by Remote Sensing Images.** Remote Sensing, 2011, 3, p. 185-202.

SÃO PAULO. Protocolo de Cooperação que celebram entre si, o Governo do Estado de São Paulo, a Secretaria de Estado de Meio Ambiente, a Secretaria de Estado da Agricultura e Abastecimento e a União da Agroindústria Canavieira de São Paulo para a adoção de ações destinadas a consolidar o desenvolvimento sustentável da indústria da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo. São Paulo, 04 de junho de 2007. Disponível em: [http://www.cetesb.sp.gov.br/noticentro/2007/06/04\\_protocolo.pdf](http://www.cetesb.sp.gov.br/noticentro/2007/06/04_protocolo.pdf). Acesso em: 31 jan. 2010.

SARTORI, M. A. **Análise de Cenários de Extração de Óleo Vegetal para a Produção de Biodiesel na Região do Norte de Minas Gerais.** 2007. 75 p. Dissertação (Mestrado) – Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Viçosa, 2007.

SCHENCK, R. C. **LCA for Mere Mortals:** a primer on environmental life cycle assessment. [S.l.], 2000. 99 p.

SCHIMDT, J. H. Development of LCIA characterization factors for land use impacts on biodiversity. **Journal of Cleaner Production**, v. 16, n. 8, p. 1929-1942, 2008.

SEABRA, J. E. A. **Avaliação técnico-econômica de opções para o aproveitamento integral da biomassa de cana no Brasil.** 2008. 298 p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

SEABRA, J. E. A.; MACEDO, I. C.; CHUM, H. L.; FARONI, C. E.; SARTO, C. A. Life cycle assessment of Brazilian sugarcane products: GHG emissions and energy use. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 5, p. 519-532, 2011.

SEBRAE – Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas. **Biodiesel**. [S.l]: 2007. Disponível em: < <http://www.biodiesel.gov.br/>>. Acesso em: 31 ago. 2009. 64 p.

SHEEHAN, J.; CAMOBRECO, V.; DUFFIELD, J.; GRABOSKI, M.; SHAPOURI, H. **Life Cycle Inventory of Biodiesel and Petroleum Diesel for Use in a Urban Bus: Final Report**. Colorado: NREL, 1998, 314 p.

SILVA, C. R. U. **Balço de energia e das emissões de gases de efeito estufa da cadeia produtiva do etanol brasileiro**. 2009. 134 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2009.

SILVA, G. A.; KULAY, L. A. **Análise de Ciclo de Vida de Processos Industriais**. São Paulo: EPUSP/PECE, 2007. Apostila da disciplina do MBA em Gestão e Tecnologias Ambientais, AQ-12.

SILVA, G. A.; KULAY, L. A. Avaliação do Ciclo de Vida. In: VILELA JR., A.; DEMAJOROVIC, J. (Org.). **Modelos e ferramentas de Gestão Ambiental: Desafios e perspectivas para as organizações**. 2ª ed. revista e ampliada. São Paulo: Editora Senac, 2010. p. 325-348.

SILVA, P. R. **Transporte Marítimo de Petróleo e Derivados na Costa Brasileira: Estrutura e Implicações Ambientais**. 2004. 148 p. Dissertação (Mestrado) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004.

SIMÕES, A. J. F. **Biocombustíveis: a experiência brasileira e o desafio da consolidação do mercado internacional**. In: MINISTÉRIO DAS RELAÇÕES EXTERIORES. **Biocombustíveis no Brasil: realidades e perspectivas**. Brasília: MRE, 2007. 205 p.

SMITH, E. G.; JANZEN, H. H., NEWLANDS, N. K. Energy balances of biodiesel production from soybean and canola in Canada. **Can. J. Plant. Sci.**, v. 84, p. 793-801, 2007.

SOETAERT, W.; VANDAMME, E. J. **Biofuels**. United Kingdom: John Wiley and Sons, Ltda., 2009. 242 p.

SOUSA, E. L. L.; MACEDO, I. C (Org.). **Etanol e bioeletricidade: a cana de açúcar no futuro da matriz energética**. São Paulo: Luc Projetos de Comunicação, 2010. 315 p.

SZKLO, A. S.; ULLER, C. **Fundamentos do refino de petróleo: tecnologia e economia**. 2ª ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: Interciência, 2008. 285 p.

THOMAS, J. E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. Rio de Janeiro: Interciência, 2004.

THOMASSEN M. A.; DALGAARD, R. HEIJUNGS, R.; DE BOER, I. Attributional and consequential LCA of milk production. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 13, n. 4, p. 339-349, 2010.

THONES, P. **Soybean International Commodity Profile**. FAO: 2008.

TRIVELIN, P.C.O., FRANCO H.C.J., (2011). **Balço de nitrogênio de fertilizantes e a sustentabilidade de agrossistemas: o estado da arte e necessidade de pesquisas**. XXXIII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. Uberlândia: 2011.

UBRABIO – UNIÃO BRASILEIRA DO BIODIESEL. **O biodiesel e sua contribuição ao desenvolvimento brasileiro**. [S.l.]: 2010. Disponível em: <<http://www.ubrabilio.com.br/>>. Acesso em: 20 fev. 2011.

UNICA – União da Indústria de Cana-de-Açúcar. Apresenta informações sobre o setor sucroalcooleiro. Disponível em: < <http://www.unica.com.br/default.asp>>. Acesso em: 05 out. 2011.

USDA – United States Department of Agriculture. Apresenta informações sobre agricultura e outros temas. Disponível em: < <http://www.usdabrazil.org.br/home/>>. Acesso em: 12 jun. 2011.

VIANNA, F. C. **Análise de Ecoeficiência**: Avaliação do Desempenho Econômico-Ambiental do Biodiesel e Petrodiesel. 2006. 183 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2006.

WALTER, A. ET. AL. **Sustainability assessment of bio-ethanol production in Brazil considering land use change, GHG emissions and socio-economic aspects**. Energy and Policy, 2011, vol. 39, p. 5703-5716.

WEIDEMA B. P. **Market information in LCA**. Environment Project n. 863. Copenhagen: Danish Environmental Protection Agency, 2003.

WEIDEMA B. P.; EKVALL, T.; HEIJUNGS R. **Guidelines for application of deepned and broadened LCA**. Project CALCAS n. 037075. [S.I.]: 2009. Disponível em: <[http://www.leidenuniv.nl/cml/ssp/publications/calcas\\_report\\_d18.pdf](http://www.leidenuniv.nl/cml/ssp/publications/calcas_report_d18.pdf)>. Acesso em: 02 fev. 2011.

WWF. **Soya and Cerrado**: Brazil's forgotten jewel. S.L.: 2011. Disponível em: <[http://assets.wwf.org.uk/downloads/soya\\_and\\_the\\_cerrado.pdf](http://assets.wwf.org.uk/downloads/soya_and_the_cerrado.pdf)>. Acesso em: 29 de agosto de 2011.