

Autora: Cinthia Rubio Urbano da Silva

Perspectivas de longo prazo sobre o perfil ambiental do etanol de cana-de-açúcar no Brasil

81/2013

**Campinas
2013**



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

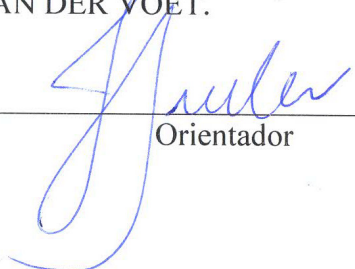
Autora: Cinthia Rubio Urbano da Silva

Perspectivas de longo prazo sobre o perfil ambiental do etanol de cana-de-açúcar no Brasil

Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Doutora em Planejamento de Sistemas Energéticos.

Orientador: **Prof. Dr. Joaquim Eugênio Abel Seabra**
Co-orientadora: **Prof^a. Dr^a. Ester van der Voet**

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA TESE DEFENDIDA PELA ALUNA CINTHIA RUBIO URBANO DA SILVA E ORIENTADA PELO PROF. Dr. JOAQUIM EUGÊNIO ABEL SEABRA E PROF^a. Dr^a. ESTER VAN DER VOET.


Orientador

Campinas
2013

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

Si38p Silva, Cinthia Rubio Urbano da, 1982-
Perspectivas de longo prazo sobre o perfil ambiental do etanol de cana-de-
açúcar no Brasil
/ Cinthia Rubio Urbano da Silva. – Campinas, SP : [s.n.], 2013.

Orientador: Joaquim Eugênio Abel Seabra.
Coorientador: Ester van der Voet.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de
Engenharia Mecânica.

1. Avaliação do ciclo de vida. 2. Bioetanol. 3. Cana-de-açúcar. 4.
Sustentabilidade. I. Seabra, Joaquim Eugênio Abel, 1981-. II. Voet, Ester van
der, 1956-. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia
Mecânica. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Long-term prospects for environmental performance of sugarcane ethanol produced in Brazil

Palavras-chave em inglês:

Life cycle assessment

Bioethanol

Sugarcane

Sustainability

Área de concentração: Planejamento de Sistemas Energéticos

Titulação: Doutora em Planejamento de Sistemas Energéticos

Banca examinadora:

Joaquim Eugênio Abel Seabra [Orientador]

Arnaldo Cesar da Silva Walter

Marcelo Pereira da Cunha

Otávio Cavalett

Aldo Roberto Ometto

Data de defesa: 22-07-2013

Programa de Pós-Graduação: Planejamento de Sistemas Energéticos

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ENERGÉTICOS

TESE DE DOUTORADO

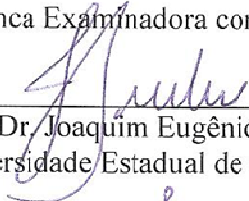
**Perspectivas de longo prazo sobre o perfil
ambiental do etanol de cana-de-açúcar no
Brasil**

Autora: **Cinthia Rubio Urbano da Silva**

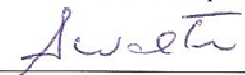
Orientador: **Joaquim Eugênio Abel Seabra**

Co-orientadora: **Ester van der Voet**

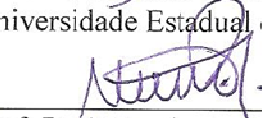
A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Tese:


Prof. Dr. Joaquim Eugênio Abel Seabra

Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Mecânica


Prof. Dr. Arnaldo Cesar da Silva Walter

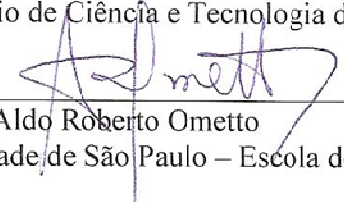
Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Mecânica


Prof. Dr. Marcelo Pereira da Cunha

Universidade Estadual de Campinas – Instituto de Economia


Dr. Otávio Cavalett

Laboratório de Ciência e Tecnologia do Bioetanol – Programa de Avaliação Tecnológica


Prof. Dr. Aldo Roberto Ometto

Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos

Campinas, 22 de julho de 2013

Dedico este trabalho aos meus pais

Agradecimentos

À minha família e aos meus amigos, pelo estímulo, apoio e confiança.

Ao professor Joaquim Seabra pela orientação atenciosa e pacienciosa.

À professora Ester Van der Voet por ter me recebido no CML e pela orientação.

Ao professor Arnaldo Walter pelas oportunidades e apoio diante dos desafios.

Aos membros da banca avaliadora, pelas sugestões e correções. Ao prof. Arnaldo Walter e ao Otávio Cavalett pela avaliação, também, na etapa de Qualificação.

Ao Mateus Chagas e Otávio Cavalett, do Programa de Avaliação Tecnológica (CTBE), pela parceria para a realização da adaptação da base de dados internacionais às condições brasileiras e pela prontidão em ajudar a solucionar as minhas dúvidas.

Ao Henrique C. J. Franco, do Programa Agrícola (CTBE), por ter me ensinado sobre o cultivo da cana-de-açúcar, pela atenção e contribuição dada a este trabalho.

À Tássia Junqueira, do Programa de Avaliação Tecnológica (CTBE), pelas simulações do processo de produção do etanol e pela prontidão em ajudar.

À Daniela Cordeiro pela parceria para a realização das entrevistas com os especialistas para coleta de dados.

Aos especialistas consultados sobre o cultivo da cana-de-açúcar com plantio direto, por gentilmente terem nos atendido e respondido aos questionamentos.

À equipe do CTBE, em especial ao grupo de sustentabilidade, por ter me recebido, pelo convívio agradável e pelo aprendizado.

Ao grupo CML da Universidade de Leiden também por ter me recebido, pelo convívio agradável e pelo aprendizado. Luran van der Oers e Reinout Heijungs, pela contribuição para a minha formação profissional através da prontidão em solucionar as minhas dúvidas.

Aos professores e funcionários da Faculdade de Engenharia Mecânica (UNICAMP) também pela contribuição para a minha formação profissional.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro para o desenvolvimento deste trabalho.

Muito obrigada!

Resumo

O interesse na redução das emissões de gases de efeito estufa e a busca por segurança energética têm promovido o aumento da produção de biocombustíveis e investimentos em tecnologias de produção avançada. Partindo-se da hipótese de que estas tecnologias trariam benefícios para o perfil ambiental dos biocombustíveis, o objetivo deste trabalho foi avaliar, sob o ponto de vista ambiental, cenários prospectivos de produção de etanol no Brasil levando em conta a introdução das melhorias tecnológicas propostas para o setor sucro-energético (e.g., plantio direto e produção do etanol de segunda geração). Adicionalmente, uma comparação prospectiva do etanol de segunda geração produzido a partir de diferentes biomassas foi realizada para avaliar a competitividade do etanol produzido a partir dos resíduos da cana-de-açúcar. A técnica de avaliação do ciclo de vida (ACV) foi adotada, utilizando o método CML para a avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) e o método Monte Carlo para a análise de incertezas. As seguintes categorias de impacto ambiental foram consideradas: depleção de recursos abióticos (consumo de combustível fóssil), aquecimento global, toxicidade humana, ecotoxicidade (terrestre e aquática), oxidação fotoquímica, acidificação e eutrofização. Emissões associadas aos impactos diretos e indiretos da mudança do uso do solo não estão no escopo deste trabalho. Os resultados indicam que as melhorias propostas conferem benefícios ambientais ao etanol de cana no cenário prospectivo frente ao etanol de produção convencional. A prática de plantio direto da cana-de-açúcar contribuiria para a redução dos impactos ambientais ao longo do ciclo de vida do etanol. Considerando todas as melhorias, o uso do etanol de primeira geração traria benefício ambiental maior do que o de produção conjunta (primeira e segunda geração), com exceção das categorias de acidificação e eutrofização. Quando comparado à gasolina, o etanol tem menor impacto em depleção abiótica e aquecimento global, mas não nas outras categorias de impacto. A comparação com o etanol de outras biomassas indica que o etanol derivado da palha da cana tem menor impacto ambiental em todas as categorias de impacto analisadas. A partir desses resultados, conclui-se que a evolução tecnológica projetada para a produção de cana-de-açúcar conduziria à melhoria do perfil ambiental do etanol. A produção de etanol de segunda geração, no entanto, não apresentaria vantagem ambiental frente ao etanol de primeira geração (considerando

os parâmetros utilizados). Mas esta conclusão é sensível principalmente ao nível da coprodução de eletricidade excedente e ao respectivo combustível deslocado.

Palavras-chave: avaliação do ciclo de vida, bioetanol, cana-de-açúcar, sustentabilidade.

Abstract

The interest in greenhouse gas emission mitigation and enhancement of energy security has fostered the production of biofuels and investments in technologies for the production of advantaged biofuels. Assuming that such technologies could improve the environmental performance of biofuels, the goal of this work was to analyze, from an environmental perspective, the ethanol production in Brazil in prospective scenarios. Additionally, a prospective environmental comparison of the ethanol produced from sugarcane residues and from other feedstocks was also performed. The life cycle assessment (LCA) technique was employed using the CML method for the life cycle impact assessment (LCIA) and the Monte Carlo method for the uncertainty analysis. Abiotic depletion (fossil fuels), global warming, human toxicity, ecotoxicity (terrestrial and fresh water), photochemical oxidation, acidification and eutrophication were the environmental impacts categories analyzed. Results indicated that proposed improvements would lead to environmental benefits in the prospective scenarios compared to the current ethanol production. No tillage practice for sugarcane production has potential to contribute for the mitigation of environmental impacts. The projected first generation ethanol would lead to greater environmental benefits than the combined first and second generation ethanol, except for the impacts related to acidification and eutrophication. Compared to gasoline life cycle, sugarcane ethanol has less impact regarding abiotic depletion and global warming. The comparison among different feedstocks showed that ethanol from sugarcane bagasse would lead to less environment impacts. The results suggest that the projected technological evolution for sugarcane production can contribute for improving ethanol environmental performance. Second generation ethanol, on the other hand, would not lead to greater environmental benefits when compared to the projected first generation ethanol. This conclusion, however, is sensitive to the coproduction of electricity and the respective displaced fuel.

Keywords: life cycle assessment, bioethanol, sugarcane, sustainability

Lista de Figuras

Figura 2.1	Avaliação do Ciclo de vida	8
Figura 2.2	Aspectos metodológicos de interesse em ACV de sistemas energéticos	13
Figura 2.3	Evolução dos resultados para emissões de GEE associadas a LUC e ILUC	16
Figura 3.1	Impactos ambientais normalizados associados à exploração e produção de petróleo	32
Figura 3.2	Impactos ambientais da produção de gasolina e de óleo diesel	34
Figura 3.3	Impactos ambientais associados à produção de amônia e à produção de uréia	38
Figura 3.4	Impactos ambientais da cadeia produtiva do TSP	41
Figura 4.1	Estrutura de tráfego controlado (ETC)	45
Figura 4.2	Definição do sistema de produto para os cenários S0, S1 e S2	49
Figura 4.3	Definição do sistema de produto para os cenários S3 e S4	50
Figura 4.4	Análise de sensibilidade com relação à geração de eletricidade excedente	71
Figura 4.5	Impactos ambientais normalizados devido à produção e uso dos produtos de 1ha de cana em substituição à gasolina e energia elétrica	74
Figura 4.6	Análise de sensibilidade considerando substituição de eletricidade produzida a partir do carvão e do mix de eletricidade da rede	76
Figura 4.7	Análise de incerteza dos impactos ambientais do etanol em cenários prospectivos	78
Figura 5.1	Sistema definido para o etanol derivado de bagaço e palha da cana	81
Figura 5.2	Comparação dos impactos ambientais potenciais das diferentes rotas de produção do etanol de segunda geração	89
Figura 5.3	Análise de incerteza dos impactos ambientais do etanol com produção independente	93

Lista de Tabelas

Tabela 3.1	Consumo de energia para a exploração e produção de petróleo offshore no Brasil	30
Tabela 3.2	Inventários e distâncias adotados para cada região fornecedora de petróleo	31
Tabela 3.3	Dados adotados para o inventário de petróleo, na refinaria, no Brasil	32
Tabela 3.4	Consumo de energia para refino de petróleo	33
Tabela 3.5	Produção de derivados do petróleo pela Replan e Reduc	34
Tabela 3.6	Dados de logística de produção e distribuição de uréia	38
Tabela 4.1	Operações agrícolas associadas às práticas de cultivo da cana de açúcar	46
Tabela 4.2	Parâmetros agrícolas para o cultivo de 1ha de cana nos cenários S1 e S3	53
Tabela 4.3	Parâmetros agrícolas para o cenário de produção de 1ha de cana nos cenários S2 e S4	54
Tabela 4.4	Concentração de nutrientes nos resíduos aplicados como fertilizantes nos canaviais	56
Tabela 4.5	Emissões associadas ao uso de insumos agrícolas	57
Tabela 4.6	Consumo de diesel para produção de cana nos cenários S1 e S3	58
Tabela 4.7	Consumo de diesel para produção de cana (1ha) nos cenários S2 e S4	59
Tabela 4.8	Insumos, produtos e emissões associadas à etapa industrial do etanol	61
Tabela 4.9	Emissões gasosas da queima de biomassa em caldeiras de cogeração	62
Tabela 4.10	Processo de produção da enzima celulase	63
Tabela 4.11	Emissões atmosféricas associadas ao uso de etanol hidratado e ao uso de gasolina pura	64
Tabela 4.12	Parâmetros análise de incerteza dos impactos ambientais nos cenários prospectivos	65
Tabela 4.13	Impactos ambientais do ciclo de vida do etanol e da gasolina	67
Tabela 4.14	Mitigação e aumento dos impactos ambientais quando do uso do etanol	72

em substituição à gasolina

Tabela 5.1	Insumos agrícolas e produtividade das biomassas para produção de etanol	84
Tabela 5.2	Insumos, produtos e emissões associadas à etapa industrial do etanol	86
Tabela 5.3	Parâmetros para análise de incerteza do etanol de produção independente	88
Tabela A. 1	Parâmetros para simulação da etapa industrial em AspenPlus	110
Tabela A. 1	Características do método CML para avaliação do impacto do ciclo de vida	114
Tabela B. 1	Comparação dos dados de consumo de diesel nas operações agrícolas de produção da cana com os dados de literatura	118
Tabela C.1	Inventários do ciclo de vida do etanol derivado da cana-de-açúcar em diferentes cenários	120
Tabela D.1	Análise de contribuição para o impacto em eutrofização – cenário S0	123
Tabela D.2	Análise de contribuição para o impacto em acidificação – cenário S0	123
Tabela D.3	Análise de contribuição para o impacto em oxidação fotoquímica – cenário S0	124
Tabela D.4	Análise de contribuição para o impacto em ecotoxicidade terrestre – cenário S0	124
Tabela D.5	Análise de contribuição para o impacto em ecotoxicidade em água doce – cenário S0	125
Tabela D.6	Análise de contribuição para o impacto em toxicidade em saúde humana – cenário S0	125
Tabela D.7	Análise de contribuição para o impacto em aquecimento global – cenário S0	126
Tabela D.8	Análise de contribuição para o impacto em eutrofização – cenário S1	127
Tabela D.9	Análise de contribuição para o impacto em acidificação – cenário S1	127
Tabela D.10	Análise de contribuição para o impacto em oxidação fotoquímica – cenário S1	128
Tabela D.11	Análise de contribuição para o impacto em ecotoxicidade terrestre –	128

	cenário S1	
Tabela D.12	Análise de contribuição para o impacto em ecotoxicidade em água doce – cenário S1	129
Tabela D.13	Análise de contribuição para o impacto em toxicidade em saúde humana – cenário S1	130
Tabela D.14	Análise de contribuição para o impacto em aquecimento global – cenário S1	131
Tabela D.15	Análise de contribuição para o impacto em eutrofização – cenário S2	132
Tabela D.16	Análise de contribuição para o impacto em acidificação – cenário S2	132
Tabela D.17	Análise de contribuição para o impacto em oxidação fotoquímica – cenário S2	133
Tabela D.18	Análise de contribuição para o impacto em toxicidade terrestre – cenário S2	133
Tabela D.19	Análise de contribuição para o impacto em ecotoxicidade em água doce – cenário S2	134
Tabela D.20	Análise de contribuição para o impacto em toxicidade em saúde humana – cenário S2	135
Tabela D.21	Análise de contribuição para o impacto em aquecimento global – cenário S2	136
Tabela D.22	Análise de contribuição para o impacto em eutrofização – cenário S3	137
Tabela D.23	Análise de contribuição para o impacto em acidificação – cenário S3	137
Tabela D.24	Análise de contribuição para o impacto em oxidação fotoquímica – cenário S3	138
Tabela D.25	Análise de contribuição para o impacto em ecotoxicidade terrestre – cenário S3	138
Tabela D.26	Análise de contribuição para o impacto em toxicidade em água doce – cenário S3	139
Tabela D.27	Análise de contribuição para o impacto em toxicidade em saúde humana – cenário S3	140

Tabela D.28	Análise de contribuição para o impacto em aquecimento global – cenário S3	141
Tabela F.29	Análise de contribuição para o impacto em eutrofização – cenário S4	142
Tabela D.30	Análise de contribuição para o impacto em acidificação – cenário S4	142
Tabela D.31	Análise de contribuição para o impacto em oxidação fotoquímica – cenário S4	143
Tabela D.32	Análise de contribuição para o impacto em ecotoxicidade terrestre – cenário S4	143
Tabela D.33	Análise de contribuição para o impacto em ecotoxicidade em água doce – cenário S4	144
Tabela D.34	Análise de contribuição para o impacto em toxicidade em saúde humana – cenário S4	145
Tabela D.35	Análise de contribuição para o impacto em aquecimento global – cenário S4	146
Tabela E.1	Impactos ambientais do etanol de 2G derivado de diferentes biomassas	147
Tabela F.1	Inventários do ciclo de vida do etanol derivado de diferentes biomassas	148
Tabela G.1	Análise de contribuição para o impacto em eutrofização – etanol derivado de <i>switchgrass</i>	151
Tabela G.2	Análise de contribuição para o impacto em acidificação – etanol derivado de <i>switchgrass</i>	152
Tabela G.3	Análise de contribuição para o impacto em oxidação fotoquímica – etanol derivado de <i>switchgrass</i>	152
Tabela G.4	Análise de contribuição para o impacto em ecotoxicidade terrestre – etanol derivado de <i>switchgrass</i>	153
Tabela G.5	Análise de contribuição para o impacto em ecotoxicidade em água doce – etanol derivado de <i>switchgrass</i>	153
Tabela G.6	Análise de contribuição para o impacto em toxicidade em saúde humana – etanol derivado de <i>switchgrass</i>	154
Tabela G.7	Análise de contribuição para o impacto em aquecimento global – etanol derivado de <i>switchgrass</i>	155

Tabela G.8	Análise de contribuição para o impacto em eutrofização – etanol derivado de palha de trigo	156
Tabela G.9	Análise de contribuição para o impacto em acidificação – etanol derivado de palha de trigo	157
Tabela G.10	Análise de contribuição para o impacto em oxidação fotoquímica – etanol derivado de palha de trigo	158
Tabela G.11	Análise de contribuição para o impacto em ecotoxicidade terrestre – etanol derivado de palha de trigo	159
Tabela G.12	Análise de contribuição para o impacto em ecotoxicidade em água doce – etanol derivado de palha de trigo	159
Tabela G.13	Análise de contribuição para o impacto em toxicidade em saúde humana - etanol derivado de palha de trigo	160
Tabela G.14	Análise de contribuição para o impacto em aquecimento global – etanol derivado de palha de trigo	161
Tabela G.15	Análise de contribuição para o impacto em eutrofização – etanol derivado de resíduos do milho	162
Tabela G.16	Análise de contribuição para o impacto em acidificação – etanol derivado de resíduos do milho	163
Tabela G.17	Análise de contribuição para o impacto em oxidação fotoquímica – etanol derivado de resíduos do milho	164
Tabela G.18	Análise de contribuição para o impacto em ecotoxicidade terrestre – etanol derivado de resíduos do milho	164
Tabela G.19	Análise de contribuição para o impacto em toxicidade em água doce – etanol derivado de resíduos do milho	165
Tabela G.20	Análise de contribuição para o impacto em toxicidade em saúde humana – etanol derivado de resíduos do milho	166
Tabela G.21	Tabela A4.20 Análise de contribuição para o impacto em aquecimento global – etanol derivado de resíduos do milho	167
Tabela G.22	Análise de contribuição para o impacto em eutrofização – etanol derivado de resíduos da cana	168

Tabela G.23	Análise de contribuição para o impacto em acidificação – etanol derivado de resíduos da cana	168
Tabela G.24	Análise de contribuição para o impacto em oxidação fotoquímica – etanol derivado de resíduos da cana	169
Tabela G.25	Análise de contribuição para o impacto em ecotoxicidade terrestre – etanol derivado de resíduos da cana	169
Tabela G.26	Análise de contribuição para o impacto em ecotoxicidade em água doce – etanol derivado de resíduos da cana	170
Tabela G.27	Análise de contribuição para o impacto em toxicidade humana – etanol derivado de resíduos da cana	170
Tabela G.28	Análise de contribuição para o impacto em aquecimento global – etanol derivado de resíduos da cana	171

Lista de abreviaturas e siglas

Abreviaturas:

ATR – Açúcares Totais Recuperáveis

bs – base seca

E100 – Etanol hidratado 100% (puro)

ETC – Estrutura de Tráfego Controlado

TSP – Triplo superfosfato

UF – Unidade Funcional

2G – Segunda geração

.....

Siglas:

ABNT – Associação Brasileira de Norma Técnica

ACV – Avaliação do Ciclo de Vida

AICV – Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida

COVNM – Carbono Orgânico Voláteis não Metano

CTBE – Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol

GEE – Gases de Efeito Estufa

LUC – Land Use Change

ILUC – Indirect Land Use Change

ISO – International Organization for Standardization

PCI – Poder Calorífico Inferior

.....

Unidades de medida:

g – Grama

ha - hectare

kg - quilograma

km – Quilômetro
kWh – Quilowatt-hora
L - litros
 m^3 – metro cúbico
MJ - Megajoule
mt – milhões de tonelada
t - tonelada
tc – Tonelada métrica de cana de açúcar
% - Porcentagem
SO₂ eq – Emissões equivalentes de dióxido de enxofre
PO₄³⁻ - Emissões equivalentes de fosfato

.....

Fórmulas estruturais:

C₂H₄ eq – Emissões equivalentes de etileno
CaO – óxido de cálcio
CO₂ – dióxido de carbono
CO₂eq – Emissões equivalentes de dióxido de carbono
CH₄ – metano
CO – monóxido de carbono
DBeq – Emissões equivalentes de diclorobenzeno
H₂SO₄ – ácido sulfúrico
K₂O – óxido de potássio
MP₁₀ – material particulado com diâmetro aerodinâmico menor que 10µm
MP_{2,5} – material particulado com diâmetro aerodinâmico menor que 2,5 µm
N – nitrogênio
NO_x – óxidos de nitrogênio
N₂O – óxido nitroso
P₂O₅ – pentóxido de fósforo
SO_x – óxidos de enxofre

.....

Sumário

1 Introdução	1
1.1 Contexto e objetivo	1
1.2 Estrutura da tese	4
2 Avaliação do ciclo de vida de biocombustíveis.....	7
2.1 Características da avaliação do ciclo vida	7
2.1.1 Estrutura metodológica da ACV de combustíveis	9
2.2 Avaliação do ciclo de vida do etanol de cana-de-açúcar	17
2.2.1 Perfil ambiental do etanol de segunda geração no Brasil.....	21
2.3 Perfil ambiental do etanol lignocelulósico de outras biomassas	24
3 Adaptação do banco de dados para as condições nacionais	28
3.1 Introdução	28
3.2 Petróleo e seus derivados.....	29
3.3 Fertilizantes aplicados nos canaviais.....	35
3.3.1 Fertilizantes nitrogenados	36
3.3.2 Fertilizantes fosfatados.....	39
4 Avaliação ambiental do etanol de cana em cenários prospectivos.....	42
4.1 Introdução	42
4.2 Descrição dos cenários.....	43
4.3 Metodologia e Dados.....	50
4.3.1 Dados da etapa agrícola.....	52
4.3.2 Dados da etapa industrial	59

4.3.3 Dados de distribuição e uso.....	64
4.3.4 Análise das incertezas	65
4.4 Resultados e discussões.....	66
4.4.1 Análise de incerteza	76
5 Análise comparativa de diferentes biomassas para a produção de etanol de segunda geração.....	79
5.1 Introdução	79
5.2 Definição e descrição dos sistemas de produto.....	79
5.3 Metodologia e dados	82
5.3.1 Dados da etapa agrícola e transporte.....	83
5.3.2 Dados da etapa industrial	85
5.3.3 Análise de incerteza	87
5.4 Resultados e discussões.....	88
5.4.1 Análise de incerteza	91
6 Conclusões e sugestões para próximos trabalhos	94
6.1 Conclusões	94
6.2 Sugestões para próximos trabalhos.....	97
Referências	99
ANEXO A – Parâmetros usados para simulação da produção de etanol no AspenPlus	110
APÊNDICE A – Método CML para AICV e software CMLCA para ACV.....	112
A.1 Método CML para Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida	112
A.2 Software CMLCA para avaliação do ciclo de vida.....	116
APÊNDICE B – Comparação do consumo de diesel durante as operações agrícolas – dados adotados neste trabalho e dados de literatura	118
APÊNDICE C – Inventários do Ciclo de Vida do etanol derivado da cana-de-açúcar em diferentes cenários	120

APÊNDICE D – Análise da contribuição dos processos e emissões para os impactos do etanol em cenários prospectivos.....	123
APÊNDICE E – Impactos Ambientais do Etanol de Segunda Geração derivado de diferentes biomassas.....	147
APÊNDICE F – Inventários do Ciclo de Vida do etanol derivado de diferentes biomassas	148
APÊNDICE G – Análise da contribuição dos processos e emissões para os impactos do etanol em cenários prospectivos.....	151

1 Introdução

1.1 Contexto e objetivo

O incentivo ao uso de combustíveis alternativos aos fósseis no setor de transportes vem fazendo cada vez mais parte das agendas internacionais. A adição de biocombustíveis aos combustíveis fósseis está em prática em mais de 50 países, tendo como consequência o aumento da produção global de 16 bilhões de litros em 2000, para 100 bilhões de litros em 2010. No entanto, este volume ainda representa apenas 3% do total consumido no setor (OECD/IEA, 2011).

O interesse pelos biocombustíveis está relacionado à segurança energética e redução das emissões de GEE. O setor de transporte tem potencial para redução das emissões de GEE, através do aumento da eficiência dos veículos e uso de biocombustíveis. Como base no cenário *Blue Map*, o IEA estimou que o uso de biocombustíveis representará 27% do total de combustível no setor de transportes e espera-se que contribua para limitar o aumento da temperatura global em 2°C, ou seja, para a redução das emissões de CO₂ em 50% até 2050. Para isto, a produção de combustíveis de tecnologia avançada deverá aumentar rapidamente a partir de 2015 (OECD/IEA, 2011).

São classificados como biocombustíveis de produção avançada os produzidos a partir de material lignocelulósico, que atualmente estão no estágio de demonstração, também chamados biocombustíveis de segunda geração (BRINGEZU et al., 2009 e OECD/IEA, 2011).

Para aumentar a produção de etanol, países estão investindo no desenvolvimento da tecnologia para produção de etanol de segunda geração (NYKO et al., 2011). Nesse sentido, Bringezu et al. (2009) destacam que embora o termo “avançado” sugira superioridade em relação aos biocombustíveis de produção convencional (também chamados de primeira geração, cuja tecnologia está comercialmente disponível), essa superioridade carece ser demonstrada quanto à

sustentabilidade.

Algumas iniciativas como o GBEP (*Global Bioenergy Partnership*¹), RSB (*Roundtable on Sustainable Biofuels*²) e ISCC (*International Sustainability and Carbon Certification System*³) têm sido desenvolvidas para estabelecimento de critérios e normas de sustentabilidade para os biocombustíveis. De acordo com o OECD/IEA (2011), aspectos associados à sustentabilidade dos biocombustíveis/bioenergia abrangem: emprego, usos da terra, integração de pequenos produtores, segurança alimentar (aspectos sociais), qualidade do ar, da água e do solo, emissões de gases de efeito estufa, uso da água e biodiversidade (aspectos ambientais), autossuficiência e segurança energética, balança de pagamentos, financiamento e custo do combustível (aspectos econômicos).

No Brasil, o Laboratório de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (CTBE) é uma demonstração do incentivo brasileiro ao desenvolvimento de tecnologias que visam ao aproveitamento integral da cana-de-açúcar e uma biorrefinaria com produção de etanol, eletricidade e outros derivados, de forma sustentável. Entendendo que o conceito de sustentabilidade é amplo, seis itens são priorizados pelo grupo de sustentabilidade (CTBE) para a avaliação do aprimoramento da sustentabilidade: balanços de energia e das emissões de gases de efeito estufa, mudanças no estoque de carbono no solo e emissões de N₂O e CH₄, impactos diretos e indiretos da mudança do uso da terra, impactos da expansão da atividade canavieira sobre recursos hídricos, impactos sobre a biodiversidade (CTBE, 2013). Este trabalho está inserido no projeto de balanços de energia e das emissões de gases de efeito estufa do Programa de Sustentabilidade do etanol, no Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (CTBE).

Os balanços de energia e das emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida do etanol de segunda geração têm sido abordados em diversos estudos. No caso do etanol brasileiro, o bagaço tem sido tradicionalmente usado para a co-geração de energia nas usinas com produção de eletricidade excedente para exportação para a rede. Nesse sentido, avaliações comparando o uso do bagaço para a geração de eletricidade excedente ou para a produção do etanol de segunda

¹ <http://www.globalbioenergy.org/>

² <http://rsb.org/>

³ <http://www.iscc-system.org/>

geração também têm sido apresentadas (LUO et al., 2009; SEABRA e MACEDO, 2011; DIAS et al., 2012). Tais estudos, no entanto, não incluem melhorias das práticas de cultivo da cana-de-açúcar, como o plantio direto.

Este trabalho teve como objetivo geral avaliar sob o ponto de vista ambiental as perspectivas para a produção de etanol no Brasil no longo prazo, levando em conta a introdução das tecnológicas propostas para o setor sucro-energético como, por exemplo, a prática de plantio direto da cana-de-açúcar a partir do uso da Estrutura de Tráfego Controlado (em desenvolvimento pelo CTBE) e a produção conjunta do etanol de primeira e segunda geração.

A hipótese testada neste trabalho foi a de que a inserção das tecnológicas para a produção de etanol no cenário prospectivo contribuiria para a redução dos impactos ambientais associados à produção convencional do etanol, favorecendo o aprimoramento da sustentabilidade do processo produtivo do etanol no futuro.

O estudo foi baseado na técnica de avaliação do ciclo de vida (ACV), utilizando o método CML para a avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) e o software CMLCA para criar e relacionar os processos, bem como para a avaliação dos impactos ambientais e para auxiliar a etapa de interpretação dos resultados – ambos desenvolvidos pelo Instituto de Ciências Ambientais (Universidade de Leiden) onde foi realizada parte deste trabalho. As seguintes categorias de impacto ambiental foram consideradas para avaliação do impacto ambiental: depleção de recursos abióticos (consumo de combustível fóssil), aquecimento global, toxicidade humana, ecotoxicidade (terrestre e aquática), oxidação fotoquímica, acidificação e eutrofização.

Para o atendimento do objetivo deste trabalho, alguns objetivos específicos foram definidos:

- Adaptar (às condições brasileiras) bases de dados internacionais utilizadas para a elaboração de inventários do ciclo de vida de produtos utilizados na cadeia produtiva do etanol;

- Definir cenários prospectivos para a produção de etanol de cana-de-açúcar no Brasil para avaliação do impacto ambiental da inserção de tecnologias em desenvolvimento;
- Comparar o perfil ambiental do etanol derivado da cana-de-açúcar produzido no Brasil no cenário prospectivo com o perfil ambiental do etanol produzido no Brasil atualmente para avaliação do aprimoramento ambiental quando da inserção das tecnologias em desenvolvimento.
- Comparar o perfil ambiental do etanol derivado da cana-de-açúcar produzido no Brasil com o perfil ambiental da gasolina para avaliar os impactos ambientais quando da substituição da gasolina por etanol no setor de transportes;
- Avaliar os impactos ambientais líquidos do uso de 1hectare de cana-de-açúcar considerando duas opções: maior produção de etanol para substituição de maior volume de gasolina ou maior cogeração de eletricidade para substituição de eletricidade gerada em termelétricas a gás natural;
- Definir cenários prospectivos relacionados à produção de etanol de segunda geração a partir de diferentes biomassas para avaliação do perfil ambiental do etanol derivado da cana-de-açúcar produzido no Brasil frente às outras opções de matéria-prima para produção do etanol de segunda geração em apostas em outros países;
- Estimar e analisar as incertezas do perfil ambiental estimado para os sistemas de produção do etanol.

1.2 Estrutura da tese

Uma revisão dos aspectos da metodologia de avaliação do ciclo de vida e da sua aplicação para avaliação do etanol combustível, bem como de estudos de comparação entre o etanol e a

gasolina, é apresentada no Capítulo 2.

A partir da revisão bibliográfica sobre estudos de ACV do etanol de cana-de-açúcar produzido no Brasil, constatou-se que, devido à falta de dados representativos das condições brasileiras, bases de dados internacionais são normalmente utilizadas para a descrição dos sistemas de produção de insumos (e.g., combustíveis fósseis e cadeia produtiva de fertilizantes). Neste trabalho, bases de dados foram adaptadas para melhor refletir as condições brasileiras, conforme descrito no Capítulo 3. Assim, inventários do ciclo de vida de sistemas de produção dos insumos para a produção do etanol foram elaborados para subsidiar as análises realizadas nos capítulos seguintes.

No capítulo 4 os cenários prospectivos são definidos com base no levantamento das tecnologias que deverão estar disponíveis comercialmente no longo prazo. A avaliação dos impactos ambientais de cada cenário foi realizada para entender os benefícios ambientais das tecnologias em desenvolvimento para a produção de etanol de cana-de-açúcar, tendo como referência o cenário que representa a produção de etanol no Brasil atualmente. Os benefícios ambientais desses cenários foram avaliados frente às respectivas capacidades de substituição dos combustíveis fósseis equivalentes. Além da gasolina, o gás natural também é considerado por conta da grande geração de energia elétrica excedente esperada para os cenários futuros. Análises de sensibilidade foram realizadas para testar os resultados e as incertezas associadas foram avaliadas para indicar a precisão dos resultados.

Uma vez que outras biomassas, além dos resíduos da cana-de-açúcar, também podem ser usadas para a produção de etanol de segunda geração, uma comparação dos impactos ambientais do etanol derivado do bagaço e da palha de cana-de-açúcar, resíduos de milho, palha de trigo e *switchgrass* foi realizada, conforme apresentado no Capítulo 5. As conclusões e recomendações para trabalhos futuros são apresentadas no Capítulo 6.

O trabalho é complementado por um anexo e sete apêndices. No Anexo A estão listados os parâmetros adotados para simular a produção de etanol em cenários prospectivos. No Apêndice A o método CML e o software CMLCA estão brevemente descritos. No Apêndice B é apresentada

uma comparação dos dados de demanda por óleo diesel adotados para este trabalho para a etapa de produção da cana e os adotados pela literatura publicada. O Apêndice C contém os inventários do ciclo de vida do etanol produzido no Brasil, nos diferentes cenários. No Apêndice D é apresentada a contribuição (acima de 1%) das emissões e respectivos processos associados à produção de etanol no Brasil nos diferentes cenários. No Apêndice E são apresentados os resultados, tabelados e não normalizados, dos impactos ambientais na cadeia produtiva do etanol de segunda geração derivado de diferentes biomassas em usinas independentes. No Apêndice F estão os inventários do ciclo de vida do etanol de segunda geração derivado de diferentes biomassas e a contribuição das emissões e respectivos processos associados à produção do etanol de segunda geração é apresentada no Apêndice G.

2 Avaliação do ciclo de vida de biocombustíveis

2.1 Características da avaliação do ciclo vida

Questionamentos sobre a sustentabilidade dos biocombustíveis têm demandado avaliações que requerem diversos métodos e ferramentas. A metodologia de avaliação do ciclo de vida (ACV) tem sido usada para quantificar o uso de recursos e as emissões associadas ao ciclo de vida de um produto, as quais podem causar impactos ao ambiente na forma de mudança climática, acidificação, eutrofização, entre outras. A mesma abordagem pode também ser usada para análises econômicas, sociais e de sustentabilidade (DREYER, et al., 2006; WEIDEMA, 2006; KLOEPFFER, 2008)

A metodologia de ACV para as questões ambientais direciona o levantamento dos aspectos e impactos ambientais ao longo do ciclo de vida do produto. Conforme delineado pelas normas ISO (ABNT NBR ISO 14040; ABNT NBR ISO 14044, 2009), a metodologia consiste de quatro etapas: i) definição de objetivo e escopo, que consiste no planejamento detalhado para a análise; ii) análise de inventário, que é a etapa de coleta de dados e estruturação do inventário do ciclo de vida; iii) avaliação de impacto do ciclo de vida, que relaciona o inventário do ciclo de vida aos respectivos impactos potenciais ao ambiente; iv) interpretação, que consiste na avaliação da consistência da análise (inventário e/ou impacto ambiental) com o objetivo e escopo definidos. As etapas da metodologia de avaliação do ciclo de vida estão ilustradas na Figura 2.1 a seguir.

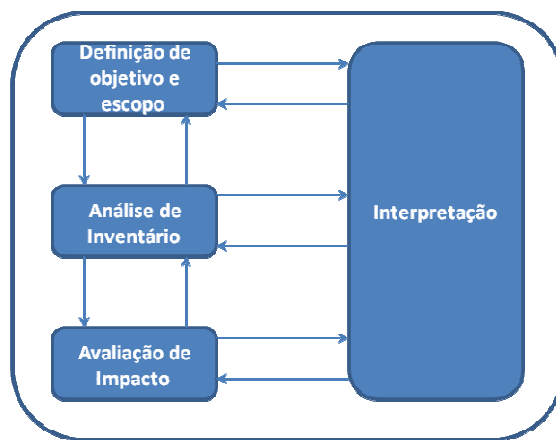


Figura 2.1 Avaliação do Ciclo de Vida

Fonte: ABNT NBR ISO 14040 (2009)

A liberdade para a escolha do método de tratamento dos coprodutos⁴, das categorias de impacto a serem investigadas, escopo da análise, entre outros aspectos da análise (conforme item 2.3) é uma característica da metodologia que pode ser vista tanto como positiva, quanto negativa. Tal liberdade pode facilitar análises e, ao mesmo tempo, dificultar a comparação entre resultados de diferentes análises.

As ACVs podem ser classificadas com relação a aspectos temporais (ACVs retrospectivas ou prospectivas), espaciais (se representa uma região específica ou uma indústria específica), ao nível da avaliação de impacto ambiental (*midpoint* ou *endpoint*) e à abordagem adotada na modelagem dos impactos ambientais (atribucional ou consequencial).

De acordo com Mutel e Hellweg (2009), site-genérico caracteriza a ACV cujo inventário de dados é referente a grandes regiões geográficas (continente ou mesmo o planeta todo) enquanto os dados de uma ACV site-dependente são referentes a um país ou estado, e site-específico corresponde às análises cujos dados são referentes a uma região específica, indústrias particulares.

⁴ Embora haja uma recomendação das ISO 14040 e 14044 de que a alocação deve ser evitada quando possível através da subdivisão dos processos ou pela expansão de fronteira do sistema para incluir os sistemas relacionados (ABNT ISO 14040, 2009 e ABNT ISO 14044, 2009).

As análises retrospectivas têm como objetivo verificar o *status quo* do produto ou serviço de interesse, enquanto as prospectivas têm o objetivo de avaliar a potencial substituição entre produtos ou entre tecnologias. Análises atribucionais focam o fornecimento do produto, enquanto as consequenciais verificam as consequências do aumento da demanda pelo produto avaliado bem como de mudanças na tecnologia que alterem o sistema do produto (WEIDEMA, 2001; KLOVERPRIS et al; 2008).

Com relação à etapa de avaliação do impacto, duas abordagens são possíveis: uma no nível de *midpoint*, que classifica e caracteriza as emissões e demanda por recursos naturais associadas às diversas categorias de impacto; e outra no nível de *endpoint*, que relaciona os resultados do inventário do ciclo de vida (ICV) a danos a áreas de proteção (ou seja, ligam os resultados do ICV a pontos finais do mecanismo ambiental). O workshop sobre modelagem *midpoint* versus *endpoint*, realizado em 2000 em Brighton, indicou que ambas são relevantes e o que os resultados das análises deveriam ser apresentados das duas formas – *midpoint*, para que cada categoria de impacto pudesse ser observada separadamente e *endpoint*, uma vez que são mais facilmente compreendidas pelos tomadores de decisão (BARE, 2000). A principal discussão em torno das abordagens é com relação às incertezas associadas. A abordagem *midpoint* conta com incertezas quanto à representatividade dos dados e classificação e caracterização adotadas. O afunilamento para a abordagem *endpoint* conta com as incertezas ainda maiores, associadas aos modelos, cenários e parâmetros (BARE et al., 2000).

2.1.1 Estrutura metodológica da ACV de combustíveis

Um consenso na literatura de balanço energético e das emissões de gases de efeito estufa de biocombustíveis é o uso da ACV como ferramenta metodológica. No entanto, diferenças nas análises têm levado a resultados diferentes para um mesmo biocombustível (muitas vezes impedindo que resultados sejam passíveis de comparação), e uma inquietação entre os cientistas, público e tomadores de decisão sobre a falta de padronização das análises e, consequentemente, sobre a confiabilidade dos resultados destas análises.

Nesse sentido, estudos têm sido publicados apresentando as principais diferenças entre as análises do ciclo de vida de biocombustíveis (LARSON, 2006; DOHY e POITRAT, 2006; GNANSOUNOU et al., 2008a e 2009; CHERUBINI et al., 2009; CHERUBINI, 2010). Uma metodologia tem sido proposta para tornar as análises e resultados mais claros (GBEP, 2009), e a necessidade de padronização das abordagens usadas nessas análises é, também, mencionada (LISKA e CASSMAN, 2008). Isso indica a utilidade da ferramenta e, ao mesmo tempo, a necessidade de melhorias (esclarecimentos ou padronização) de forma que os resultados possam ser considerados na tomada de decisão.

No que se refere à fronteira do sistema, Gnansounou et al. (2008a) argumentam que a análise deve ser mais detalhada quando o objetivo é a definição do projeto do processo ou mais simplificada quando for para orientação política. No caso específico de combustíveis, os autores afirmam que se a intenção é a comparação entre um mesmo biocombustível derivado de diferentes biomassas (por exemplo, o etanol), a análise pode ser do tipo “do campo à bomba” (“*well-to-pump*” – nomenclatura em inglês), pois, se o biocombustível é o mesmo, o desempenho da combustão nos motores dos veículos não alterará os resultados das análises. No entanto, para comparação entre diferentes combustíveis, Gnansounou et al. (2008a) justificam que a análise “do poço às rodas” (“*well-to-whells*” – nomenclatura em inglês) é a mais apropriada porque a etapa de utilização é fundamental, já que a energia fornecida, bem como as emissões associadas, pode variar conforme o combustível e mistura analisados.

Outro passo da ACV incluído nesta primeira etapa da metodologia é a definição da unidade funcional em que os dados serão tratados. Sobre isto, a literatura também tem chamado atenção indicando que a unidade funcional tem efeito significativo nos resultados (LISKA e CASSMAN, 2008). Gnansounou et al. (2008a) argumentam que MJ de combustível (no tanque) não é uma unidade de medida relevante porque, no caso da comparação entre diferentes biocombustíveis, a unidade de medida não representa a eficiência, que varia de um combustível para outro ou de um motor para outro.

Gnansounou et al. (2009) assumem que quando a mobilidade é de interesse (análises “do poço às rodas”), a unidade de medida deve representar o efeito útil, ou seja, a carga transportada e a distância viajada. Os autores ressaltam que a escolha entre litros e megajoules deveria ser importante no caso de análises para combustível puro ou ao menos quando o combustível de interesse na análise é o principal componente da mistura (E85, por exemplo).

Cherubini et al. (2009) enfatizam que em ACVs de sistemas bioenergéticos os resultados devem ser expressos na mesma unidade funcional⁵ para assegurar a comparação da oferta de um mesmo serviço. Os autores, assim como Gnansounou et al. (2008a), defendem que a distância viajada (veículo-km) é a melhor escolha para ACVs de combustíveis, especialmente para comparação dos resultados da substituição entre combustíveis. No entanto, quando o uso da terra é uma questão de interesse na análise, os autores argumentam que os dados devem ser expressos com relação à área usada para a produção da biomassa, já que a área disponível para a produção da biomassa é um fator limitante da produção de biocombustíveis. Os autores destacam ainda que no caso de comparação com combustíveis fósseis, o resultado expresso em redução das emissões de GEE é mais relevante do que em emissão absoluta sem considerar o sistema de referência.

Outra abordagem que pode variar de uma análise para outra, e que é julgada ter significativa interferência nos resultados finais, é a alocação dos insumos e emissões entre produto e coproduto(s). Curran (2007) ressalta a discussão na literatura sobre a imparcialidade, ou responsabilidade final, da escolha pelo método de alocação, especialmente em sistemas de reciclagem. A autora expõe a falta de estudos que defendam um método para alocação e uma teoria que explique um método como justificável em dada situação.

Neste sentido, cabe citar Weidema (2001), que defende que a alocação de coprodutos pode sempre ser evitada pela expansão do sistema em ACV prospectiva e que, embora na ACV retrospectiva não seja possível impor um procedimento de alocação, evitar a alocação ainda pode ser uma opção. Na ACV consequencial, a alocação também pode ser evitada pelo sistema de expansão, e este é o tratamento mais adequado aos produtos e coprodutos uma vez que aborda a

⁵ Embora o foco dos autores seja os biocombustíveis, sabe-se que o mesmo é válido para qualquer análise comparativa.

consequência de uma escolha em detrimento de outra – o que não é o mesmo caso para as análises atribucionais.

Gnansounou et al. (2009) observam que uma subdivisão completa muitas vezes não é possível devido à dependência dos fluxos de produção. Os autores citam que Kim e Dale (2002) esclarecem que o sistema de expansão é baseado na suposição que a função equivalente do sistema de produção tem impactos ambientais iguais e isto raramente é o caso; soma-se a isto o fato do alto grau de incerteza do método (relacionada à acurácia dos dados) e da implantação ser difícil uma vez que os resultados dependem significativamente do substituto escolhido. Contreras et al. (2009) também observam que embora o sistema de expansão seja o método preferido para evitar a alocação, ele leva a um modelo mais complexo com maior necessidade de dados.

Kloverpris et al. (2008) expõem que em ACV atribucional os coprodutos são tratados pelo método de alocação e ignora-se que coprodutos da produção de biocombustíveis podem, em alguns casos, deslocar a produção de ração animal e, conseqüentemente, reduzir a pressão sobre o uso da terra. Como no caso de ACV consequencial, mecanismos de mercado são considerados e os coprodutos são alocados pelo sistema de expansão, as conseqüências da mudança do uso da terra são levadas em conta.

A Figura 2.2 ilustra alguns aspectos de interesse da ACV de sistemas energéticos.

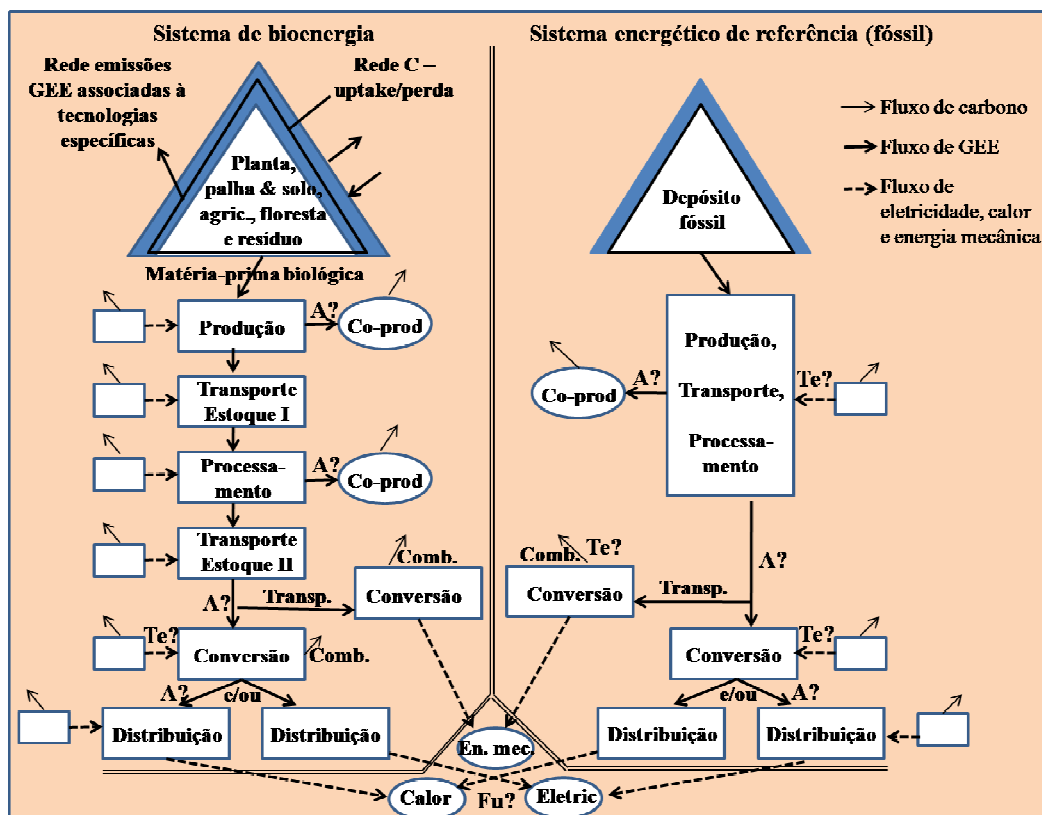


Figura 2.2 Aspectos metodológicos de interesse em ACV de sistemas energéticos

Fonte: Adaptada de Vikman et al. (2004). Os pontos de interrogação indicam exemplos de aspectos de especial interesse metodológico para o método de alocação (A?), escolha da unidade funcional (FU?) e escolha da tecnologia (Te?).

As emissões de óxido nitroso associadas à aplicação de fertilizantes nitrogenados são, por exemplo, outro assunto em debate – principalmente devido ao potencial impacto das emissões de óxido nitroso em aquecimento global. Balanços de emissões de GEE de biocombustíveis têm sido feitos normalmente com base em valores padrões, como os do IPCC (2006). No entanto, Crutzen et al. (2007 e 2008) indicaram que os fatores podem não ser representativos e apresentaram uma variação dos resultados de emissões de GEE no ciclo de vida de biocombustíveis quando estes valores são alterados.

Do Carmo et al. (2012) apresentam resultados de medição das emissões de N_2O , CO_2 e CH_4 em solos cultivados com cana-de-açúcar. Os autores encontraram variações dos fatores de emissão de N_2O e apontam que as incertezas estão associadas ao tipo de solo (aplicação de N fertilizante em solos ácidos têm maior taxa de emissão de N_2O) e ao tipo de N fertilizante

aplicado. Fatores de emissão maiores foram encontrados quando da aplicação de ureia associada à vinhaça e o menor fator de emissão encontrado está relacionado à aplicação de apenas ureia. Quando ureia é aplicada em conjunto com vinhaça e torta de filtro, o fator de emissão é menor (o segundo menor fator de emissão) do que quando há aplicação de ureia e vinhaça. O limite superior do fator de emissão chega a 4% (dentro do intervalo apresentado por Crutzen (2007 e 2008) – de 3% a 5%), e o limite inferior do fator de emissão (quando da aplicação de ureia somente) é de 0,36%. O fator de emissão de ureia, vinhaça e torta, no limite inferior, é de 0,55% - maior que o fator de emissão apresentado pelo IPCC (2006) quando variado para menos, que é de 0,30%.

As emissões de GEE associadas à mudança do uso da terra têm sido um assunto polêmico especialmente pelo fato de ainda não existir uma metodologia apropriada e que padronize a análise das emissões associadas aos efeitos indiretos. Incluir ou não as emissões de GEE associadas à mudança do uso da terra depende da fronteira definida para análise. Nesse sentido, Liska e Cassman (2008) apontam que os efeitos indiretos da mudança do uso da terra têm sido deixados de fora dos sistemas de fronteiras dos estudos de ACV. Ao mesmo tempo, polêmicas causadas por estudos de emissões de GEE associadas à mudança do uso da terra têm fomentado a necessidade da abordagem dessa atividade dentro do sistema de fronteira do produto e da definição de uma metodologia padrão apropriada e reconhecida.

Os gases de efeito estufa associados ao uso da terra são: dióxido de carbono (emissão de carbono quantificada em CO₂ equivalente), associado à mudança do estoque de carbono no solo e na biomassa que ocupava e que passou a ocupar a área (quanto da expansão de áreas para produção da biomassa); metano (CH₄) associado à queima da biomassa que ocupava a área e que passou a ocupar (no caso de queima pré-colheita) e também à aplicação de fertilizante nitrogenado e ao tipo de cultivo⁶; óxido nitroso (N₂O) devido à aplicação de fertilizante nitrogenado e queima da biomassa para colheita (neste caso, as emissões associadas à produção dos fertilizantes nitrogenados também devem ser quantificadas).

⁶ De acordo com Cherubini (2010), estes dois fatores podem reduzir a oxidação de metano no solo aeróbicos e, assim, aumentar a concentração de metano na atmosfera.

As emissões de gases de efeito estufa associadas ao impacto direto da mudança do uso solo podem ser calculadas conforme IPCC (2006), que recomenda diferentes métodos para cálculo dessas emissões. A escolha por um ou outro método depende da quantidade de dados disponíveis para o cálculo.

Quanto às emissões de GEE associadas aos impactos indiretos da mudança do uso da terra, Cornelissen et al. (2009) e Gnansounou et al. (2008b) expõem que estas ficam fora da fronteira na ACV atribucional uma vez que os impactos indiretos da produção de biocombustíveis são resultados de mecanismos de mercado. Gnansounou et al. (2008b) explicam que um sistema sofisticado de cálculo deve ser aplicado para quantificar completamente os efeitos (em relação à variação de preço, mudança em demanda ou melhorias tecnológicas) que podem ser abordados em ACV consequencial, onde os sistemas de fronteiras são expandidos para considerar os impactos nas atividades afetadas.

As emissões de GEE devido ao ILUC podem ser calculadas considerando somente a escala nacional (por macrorregiões), ou as escalas nacional e internacional. Rastrear em escala global os impactos indiretos do aumento da produção de biomassa para biocombustíveis tem dificultado ainda mais o cálculo uma vez que carece de dados e, por isso, é cercado de incertezas. Estimativas para essas emissões quando da produção do etanol de primeira geração derivado da cana-de-açúcar no Brasil, indicam a importância da quantificação e a variação dos resultados frente às diferentes abordagens, conforme ilustrado na Figura 2.3 a seguir.

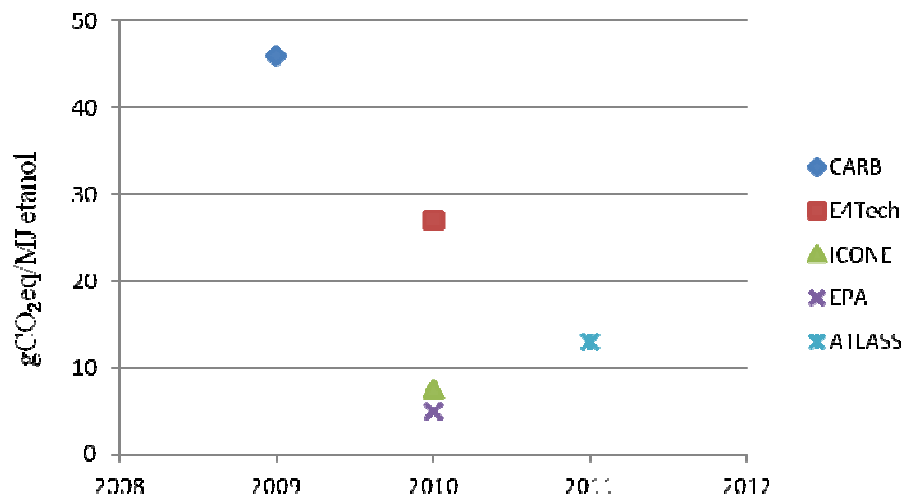


Figura 2.3 Evolução dos resultados para emissões de GEE associadas a LUC e ILUC

Fonte: Wang et al. (2012) e Khatiwada et al. (2012)

Nota-se a evolução e a variação dos resultados de cálculos das emissões de GEE associadas aos impactos diretos e indiretos da mudança do uso da terra (em um mesmo ano (2010), três estimativas diferentes foram publicadas com valores inferiores ao publicado anteriormente).

Segundo Wang et al. (2012), o resultado apresentado pelo CARB (2010) está sendo revisado e foram calculados com base no modelo econômico GTAP (*Global Trade Analysis Project*⁷). De acordo com Khatiwada et al. (2012), as emissões foram estimadas usando o ano de 2001 como referência, um aumento da produção de etanol em 64% e aumento da produtividade da cana-de-açúcar em 8,2%, no período entre 2001 e uma média de 2006-2008.

O resultado estimado a partir do modelo econômico BLUM (*Brazilian Land Use Model*)⁸ é baseado em informações geo espaciais específicas para o país. Khatiwada et al. (2012) indicam

⁷ <https://www.gtap.agecon.purdue.edu/#3>

⁸ O BLUM é um modelo econômico de equilíbrio parcial que trata do uso da terra e apresenta resultados explicitamente para seis macrorregiões brasileiras. Os resultados são baseados em variáveis endógenas (predefinidas no modelo) e exógenas (inseridas por quem faz a análise) que indicam quantos hectares de cana foi (ou deverá ser) cultivado para suprir a demanda por etanol. A demanda por terra é, então, alocada entre as macrorregiões e, considerando as características de uso da terra em cada região, os resultados indicam como a mudança do uso da terra ocorreu (ou ocorrerá). Mais informações estão disponíveis em:

que as emissões apresentadas pelo E4Tech foram estimadas com base em um modelo causal-descriptivo (assim como as do BLUM) e que essa abordagem, associada à informação geo-espacial específica para o país, poderia ser apropriada para cálculo de iLUC.

2.2 Avaliação do ciclo de vida do etanol de cana-de-açúcar

Para o caso dos biocombustíveis, a metodologia de avaliação do ciclo de vida tem sido aplicada com o objetivo de apresentar os balanços de energia e das emissões de GEE no ciclo de vida dos biocombustíveis. Alguns programas computacionais têm sido desenvolvidos para análise comparativa entre combustíveis fósseis e biocombustíveis abordando emissões reguladas e o consumo energético (por exemplo, GREET, BESS, GHGenius, entre outros). Algumas análises, no entanto, são realizadas com o objetivo de abordar a avaliação de outros impactos ambientais e, nesses casos, softwares como SimaPro e CMLCA têm sido adotados para facilitar a compilação dos dados e geração dos resultados (DIAS et al., 2011; LUO et al., 2009; HSU et al., 2010).

Quanto aos estudos do desempenho ambiental do etanol de cana-de-açúcar produzido no Brasil, Macedo et al. (2008) apresentam os balanços das emissões de GEE e de energia para o etanol de primeira geração no cenário atual (referente à safra de 2005/2006) e no cenário de 2020, que aborda melhorias das condições atuais de produção (como eliminação da queima pré-colheita, aumento da produção da eletricidade excedente pelo aumento da eficiência das caldeiras, recuperação de 40% da palha e redução da aplicação de fertilizantes minerais).

A análise apresenta resultados mais favoráveis para o etanol quando comparado à gasolina (nos dois cenários), sendo que para o cenário de 2020 as emissões totais de GEE são ainda menores e o balanço de energia é ainda mais favorável (passando do 9,3 em 2005/2006 para 11,6 em 2020). Para realização de tal análise, os autores utilizaram dados coletados junto ao CTC

(Centro de Tecnologia Canavieira) – uma média de dados de 44 usinas na região Centro-Sul brasileira. Os dados de consumo de energia e emissões de GEE associados à produção dos fertilizantes minerais foram extraídos dos softwares GREET (2006) e EBAMM (2005) – sendo representativos das condições norte americanas de produção. Os dados referentes aos combustíveis fósseis (óleo diesel, gasolina e gás natural) também são representativos das condições internacionais de produção e uso – EUCAR (2006) foi adotado como referência para as emissões da extração, transporte e processamento, e IPCC (2006) foi usado como referência para as emissões da queima dos combustíveis em fontes móveis e estacionárias. Para as emissões de GEE associadas à aplicação de fertilizantes nitrogenados, queima da palha e uso de resíduos no campo, foram adotados fatores de emissões apresentados pelo IPCC (2006). A análise considera os créditos de coprodutos usando o método de substituição (tanto da eletricidade excedente deslocando termoeletricas a gás natural, quanto bagaço deslocando óleo combustível para geração de energia térmica em fábricas).

Seabra (2008) incorporou à análise o consumo de energia e as emissões de GEE relacionados à etapa de distribuição do etanol. O autor considerou a distância de 340 km (tendo como referência uma grande cooperativa no Estado de São Paulo) percorrida por caminhões com consumo específico de $874 \text{ kJ diesel}/(\text{m}^3 \cdot \text{km})$ no cenário de 2005/2006. Para o cenário de 2020 o autor considerou que 80% do etanol seriam transportados por caminhões (considerando os mesmos dados do cenário de 2005/2006) e 20% por dutos, considerando a distância de 1000 km e consumo de energia igual a $130 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{km})$ – baseado no GREET (2006).

Em outro estudo, Macedo e Seabra (2008) adicionaram às suas análises (apresentadas anteriormente) as emissões de GEE associadas aos impactos diretos da mudança do uso do solo devido à expansão de áreas cultivadas com cana-de-açúcar no Brasil para a produção de etanol. Considerando que a expansão da cana na safra de 2005/2006 ocorreu 50% em áreas de pastagem (sendo 70% pasto degradado e 30% pasto natural) e 50% sobre áreas agrícolas (65% com soja e 35% com outras culturas), os autores concluíram que houve emissão de $-118 \text{ kgCO}_2\text{eq.}/\text{m}^3$ de etanol anidro. Para o cenário de 2020, com produção de eletricidade excedente, e considerando que 60% da área expandida para produção de cana-de-açúcar será em pastagem e 40% em áreas com cultivos agrícolas, os resultados indicam emissão de $-109 \text{ kgCO}_2\text{eq.}/\text{m}^3$ de etanol anidro. Em

todos os casos, considerou-se que a área de expansão seria cultivada com cana sem queima durante a pré-colheita. Nota-se que, para os dois cenários, a expansão de áreas cultivadas com cana-de-açúcar contribui para o aumento do estoque de carbono no solo e redução das emissões de GEE pelo uso do etanol de cana em substituição à gasolina.

Ometto et al. (2009) apresentam uma avaliação do ciclo de vida do etanol para as condições de produção no nordeste do estado de São Paulo no período de 2001 a 2008. Foi avaliado o impacto da produção e uso do etanol em aquecimento global, formação de ozônio, acidificação, enriquecimento de nutrientes, ecotoxicidade e toxicidade humana, além do uso de fontes não renováveis. Os resultados apontaram a colheita da cana como atividade de maior contribuição em aquecimento global, formação de ozônio fotoquímico e toxicidade humana, sendo o impacto em toxicidade humana associado ao uso de lubrificantes na colhedora. O enriquecimento de nutrientes é devido, majoritariamente, ao uso de fertilizantes no canavial e a aplicação de agroquímicos está associada aos impactos em ecotoxicidade. A emissão de NO_x da queima da cana e do uso do etanol em veículos e do ácido sulfúrico na usina contribui para a acidificação.

Galdos et al. (2009) analisaram o conteúdo de carbono no solo quando do cultivo de cana-de-açúcar com e sem queima pré-colheita. Para as condições brasileiras de estoque de carbono em outras culturas, estudos de balanços de energia e das emissões de GEE de biocombustíveis que optem por abordar as emissões associadas aos impactos diretos da mudança do uso do solo podem contar com uma ampla bibliografia com dados de estoque de carbono no solo. Walter et al (2011), por exemplo, apresentam balanço de emissões de GEE do etanol de cana-de-açúcar (tendo como referência o estudo de Macedo et al. (2008)) com base na literatura publicada sobre estoque de carbono no solo com diferentes cultivos no Brasil. Galdos et al. (2010) apresentam as características gerais do solo em diferentes regiões do Brasil e o estoque de carbono nos diferentes tipos de solo. Amaral et al (2008) também apresentam dados de estoque de carbono no solo e na biomassa de diferentes culturas agrícolas e do Cerrado.

Um balanço das emissões de GEE para comparação entre o sistema de produção de cana-de-açúcar com e sem queima prévia à colheita e com a manutenção da palha no campo (quando da colheita sem queima prévia da cana-de-açúcar) foi realizado por Galdos et al. (2010), em uma

abordagem “do campo ao portão da usina”. Os autores acrescentam ao balanço as emissões de carbono preto (BC – *Black Carbon* – sigla em inglês) quando da queima pré-colheita e optaram por incluir a energia associada ao trabalho humano, usando como justificativa o interesse da análise em comparar colheita manual (com queima prévia) e colheita mecanizada. Os resultados indicam vantagem do sistema de colheita mecanizada e manutenção da palha no campo em comparação com o sistema de colheita manual com queima prévia. Os balanços *output/input* do carbono equivalente resultaram em 1.4 para o etanol produzido pelo sistema com queima pré-colheita e 6.5 para o sistema em que a colheita é mecanizada e sem queima prévia (sendo: *input* as emissões equivalentes de carbono e *output* o carbono equivalente presente nos produtos do processamento da cana e estoque de carbono no solo pela manutenção da palha no campo). A diferença é devida, principalmente, ao estoque anual de carbono no solo associado à manutenção da palha no campo. No entanto, os autores expõem que há um ponto de saturação do estoque de carbono no solo – o que indica a necessidade de conhecer, de acordo com as características do solo de cada região, a quantidade apropriada de palha a ser retida no campo a fim de que haja estoque de carbono e não emissão associada à saturação do solo.

Diante das discussões relacionadas às emissões de GEE devido ao impacto indireto da mudança do uso do solo, o modelo BLUM tem se mostrado uma ferramenta importante para o entendimento da forma como a expansão da cana-de-açúcar tem ocorrido no Brasil e para o esclarecimento da contribuição dessas emissões em situações em que se pretende analisar o aumento da demanda pelo etanol brasileiro. No entanto, a metodologia para os cálculos dessas emissões ainda está em discussão e, por isso, não tem sido abordada em análises de emissões de GEE do etanol de cana-de-açúcar (SEABRA et al., 2011; GALDOS et al., 2010 e LUO et al., 2009).

Contando com o auxílio do modelo GREET, Seabra et al. (2011) avaliaram os balanços de energia e emissões de GEE do etanol e do açúcar de cana com base nos valores médios das condições de produção da região Centro-Sul do Brasil. O estudo utilizou a mesma base de dados de Macedo et al. (2008), no entanto atualizada para a safra de 2008/2009 e composta por um número maior de usinas (até 168, dependendo do parâmetro). A análise considera a produção integrada de açúcar, etanol e eletricidade. Para tratar o açúcar e o etanol separadamente, os

autores utilizaram uma alocação baseada no balanço médio dos açúcares totais recuperáveis (ATR) da região Centro-Sul. Análises de sensibilidade foram realizadas com respeito ao método de alocação, assim como uma análise de incerteza com base no método de Monte Carlo. Os resultados indicaram que para a condição atual os valores de percentil P5 e P95 foram, respectivamente, 12 e 35 g CO₂eq./MJ. Para 2020, os autores estimaram que estes valores seriam -10 e 14 g CO₂eq./MJ.

Bordonal et al. (2012) apresentam resultados para o etanol de primeira geração considerando a adoção de diferentes práticas para a produção da cana-de-açúcar: i) cultivo convencional⁹ sem queima pré-colheita, ii) cultivo mínimo¹⁰ sem queima pré-colheita, iii) cultivo mínimo sem queima pré-colheita e com rotação de cultura (usando *Crotalaria Juncea L.*) durante o replantio da cana. Os resultados foram mais favoráveis quando da prática sem queima, e o cenário de cultivo mínimo com rotação de cultura teve emissão de GEE cerca de 10% menor do que o cenário com cultivo mínimo sem a rotação de cultura.

2.2.1 Perfil ambiental do etanol de segunda geração no Brasil

Macedo e Seabra (2008) e Seabra (2008) consideraram a produção de etanol de segunda-geração como uso alternativo para os resíduos da cana-de-açúcar como um dos cenários para 2020. Os dados e considerações feitas para a análise do etanol no cenário prospectivo apresentado por Macedo et al. (2008) foram aproveitados pelos autores. A alteração realizada foi para a destinação do bagaço – parte deste é destinada à produção de etanol pelo processo bioquímico com pré-tratamento com ácido diluído e o restante passa a ser usado junto com a palha para produção de energia necessária pela usina e geração de eletricidade excedente. Os autores

⁹ O cultivo convencional da cana-de-açúcar é baseado em todas as operações para preparo do solo – operações para descompactação do solo.

¹⁰ O cultivo mínimo da cana-de-açúcar é viável quando há manutenção de palha no canavial para proteção do solo. Com a proteção do solo pela palha, operações de gradagem pesada e número de operações da gradagem niveladora (para descompactação do solo) podem ser eliminadas.

adotaram os parâmetros do processo de bioconversão apresentados por Aden et al. (2002). Considerando que a produtividade do etanol (com a produção do etanol lignocelulósico) será de 129 L/tc, os autores concluíram que as emissões totais de GEE no ciclo de vida do etanol são menores que no cenário para 2020 onde os resíduos da cana são destinados para a produção de eletricidade. No entanto, devido a menor geração de eletricidade excedente, os créditos de coprodutos são menores e o balanço fica menos favorável (no cenário 2020 com produção de eletricidade as emissões foram avaliadas em -409,3 kg CO₂eq./m³ etanol anidro, enquanto que para a produção de etanol lignocelulósico o valor foi igual a -107,3 kg CO₂eq./m³ de etanol anidro). Já o balanço de energia resultou o mesmo para os dois cenários 2020 (12,1).

Com base nos resultados de Seabra et al. (2010), Seabra e Macedo (2011) avaliaram as vantagens da produção do etanol de segunda geração comparado à produção de eletricidade excedente pelas usinas através da queima do bagaço. Para isso, os autores investigaram os aspectos econômicos, e emissões de gases de efeito estufa. Os resultados indicam que as emissões de GEE evitadas são maiores quando do uso do bagaço para produção do etanol de segunda geração (que também gera certo excedente de eletricidade) em vez da geração de eletricidade excedente. Cabe enfatizar que a maior razão para isso é que as emissões da gasolina são maiores que as emissões do gás natural – combustível tido como referência para a geração de eletricidade em termoeletricas. Para a análise, os autores consideraram parâmetros agrícolas projetados para 2020 coletados junto ao CTC (Centro de Tecnologia Canavieira). A análise de custos indicou a opção de geração de eletricidade excedente como mais vantajosa, especialmente considerando que as usinas atualmente já estão equipadas para isso. Quanto aos aspectos ambientais, os autores indicam a necessidade de investigar outros aspectos importantes quando da comparação com combustíveis fósseis, tais como toxicidade e eutrofização.

Nesse sentido, Luo et al. (2009) apresentam uma avaliação econômica e ambiental da produção do etanol derivado da cana-de-açúcar em dois casos: atual (com geração de eletricidade excedente) e futuro (com produção conjunta de etanol de primeira e segunda geração e produção de eletricidade através do aproveitamento de resíduos). Basicamente, o objetivo do trabalho foi o mesmo que de Seabra e Macedo (2011), no entanto, os autores investigam outros aspectos ambientais (depleção abiótica, gases de efeito estufa, depleção da camada de ozônio, oxidação

fotoquímica, toxicidade ecológica e humana, acidificação e eutrofização). A opção de uso do bagaço para a produção de etanol de segunda geração (caso futuro) se mostrou mais favorável que a opção atual para todos os aspectos ambientais investigados, exceto para as emissões de GEE – que resultaram maiores para o caso futuro. Outro aspecto da análise é que os autores consideraram a produção conjunta de açúcar pelas usinas (tanto no caso atual, quanto no futuro), indicando que, do total do caldo de cana, 48% é destinado à produção de etanol e 52% à produção de açúcar. Com relação aos custos, o trabalho apresenta vantagem quando da produção de etanol de segunda geração em detrimento a de eletricidade excedente. Quanto à comparação dos aspectos ambientais do etanol com a gasolina, com exceção das emissões de GEE e depleção abiótica, a gasolina se mostra ambientalmente mais favorável. O estudo foi realizado com o auxílio do software CMLCA e o método CML de avaliação de impactos ambientais.

Dias et al (2012) trabalharam com seis diferentes cenários para avaliação da viabilidade econômica e ambiental da produção de etanol, considerando também a produção do etanol lignocelulósico. O estudo considera as mesmas categorias de impacto analisadas por Luo et al. (2009) e indica que a produção independente de etanol lignocelulósico com o emprego de hidróxido de sódio para a deslignificação alcalina é o pior cenário com relação aos aspectos ambientais. O melhor cenário é o de produção conjunta de etanol de primeira e segunda geração, sem a etapa de deslignificação alcalina do material lignocelulósico. Os autores indicam que alternativas como recirculação do hidróxido de sódio ou o uso de solvente (para a lignina) com menores impactos ambientais poderiam representar melhorias para o processo.

Para a comparação entre o cenário atual (com aproveitamento de 50% da palha) e o cenário futuro com o aproveitamento do bagaço para produção de etanol lignocelulósico em uma planta conjunta com a primeira geração, os resultados são consistentes com Luo et al (2009) para as emissões de GEE. No entanto, para as demais categorias de impacto, os resultados são opostos, uma vez que Dias et al. (2012) apresentam maiores impactos para todas as outras categorias de impacto para a opção futura, enquanto Luo et al (2009) apresenta vantagens para a opção futura nas demais categorias de impacto. A diferença dos resultados é devida às diferentes abordagens dos trabalhos (método de alocação, por exemplo) e base de dados.

2.3 Perfil ambiental do etanol lignocelulósico de outras biomassas

Uma comparação do desempenho ambiental do uso do etanol derivado do resíduo de milho e de *switchgrass* em substituição à gasolina foi realizada por Spatari et al. (2005) a partir de dados de literatura. Os autores assumiram que a secagem da biomassa seria no campo (pelo sol) e que 62% do resíduo do milho seriam colhidos por um sistema mais avançado (*one pass*) e o restante seria mantido no campo. O consumo de energia para a colheita do resíduo do milho foi alocado entre milho e resíduos em base mássica e a aplicação de fertilizante associada à retirada do resíduo do milho do campo foi alocada para a produção de etanol dessa biomassa. Os autores consideraram conversão bioquímica para a produção de etanol e que a usina produz eletricidade a partir da queima da lignina. Além do consumo de energia fóssil e das emissões de gases de efeito estufa (considerando as emissões de CO₂, CH₄ e N₂O), os autores avaliaram as emissões de outros poluentes atmosféricos (CO, NO_x, COVNM e MP). Os resultados indicaram vantagem do etanol derivado do resíduo de milho quando comparado ao etanol derivado de *switchgrass* devido à maior necessidade de fertilizante para a produção de *switchgrass*. Além disso, o método de colheita do resíduo de milho é mais eficaz e, conseqüentemente, há menor demanda de energia. Para as emissões de GEE e uso de energia fóssil, ambas as biomassas conferem vantagem ao uso de etanol (E85) em substituição à gasolina. Para as outras emissões, há menos emissões no ciclo de vida da gasolina. Os autores examinaram o impacto da variação da produtividade das biomassas e da tecnologia de conversão e concluíram que a variação da produtividade do etanol tem maior influência (de 1 – 11%) do que a variação da produtividade da biomassa ($\pm 1\%$).

Spatari et al. (2010) focaram a avaliação nas tecnologias empregadas para a conversão de resíduos de milho e de *switchgrass* em etanol, abordando as mesmas emissões avaliadas no estudo anterior, incluindo geração de resíduos sólidos, e dados da literatura para a etapa agrícola, de simulações em AspenPlus e teste em laboratórios para a etapa industrial. Os autores avaliaram o impacto das incertezas associadas às tecnologias de pré-tratamento, de hidrólise e de fermentação nos resultados. O pré-tratamento com ácido diluído confere menor produtividade de etanol e maior cogeração de eletricidade quando comparado ao pré-tratamento com explosão de

fibra de amônia (AFEX – sigla em inglês). Comparação entre processo de sacarificação e co-fermentação simultânea (SSCF – sigla da nomenclatura em inglês) dos açúcares predominantes (glicose e xilose) e o de todos os açúcares também foi realizada. Porém, a maior influência é do sistema de pré-tratamento – que torna disponíveis os açúcares a serem fermentados. Para todos os casos, é considerado o uso da lignina como matéria prima para o sistema de cogeração de eletricidade. Os resultados são mais favoráveis à tecnologia de pré-tratamento com ácido diluído devido à maior cogeração de eletricidade (o sistema de expansão foi adotado e assume que a eletricidade excedente substitui a eletricidade da rede nos Estados Unidos), com exceção da emissão de COVNM e da geração de resíduos sólidos, que são menores quando da aplicação do pré-tratamento com explosão de fibra de amônia.

Para avaliar os impactos das incertezas associadas à produção da biomassa (*switchgrass* e resíduos de milho), Spatari e MacLean (2010), com base em dados da literatura, consideraram as incertezas associadas às emissões de N₂O quando do uso de fertilizantes nitrogenados e as incertezas associadas à mudança do uso da terra. Os resultados indicam que maiores incertezas estão associadas ao etanol derivado de *switchgrass*, uma vez que o uso de fertilizantes é maior e nenhuma mudança do uso da terra é assumida para a produção do resíduo do milho.

Hsu et al. (2010) analisaram as emissões de GEE e os balanços de energia de cinco opções de biomassa usadas como matéria-prima, considerando três tecnologias de conversão para etanol em 2022: *dry mill* avançado (grão de milho), conversão bioquímica (palha de milho, palha de trigo e *switchgrass*¹¹) e conversão termoquímica (resíduos florestais). Os autores utilizaram dados norte americanos projetados para 2022 e contaram com a base de dados Ecoinvent e *U.S. Life Cycle Inventory* (U.S. LCI) como referência quando da não disponibilidade de dados primários. Um caso de referência, baseado na extrapolação da média dos dados nacionais e antecipada melhoria e aprendizado da indústria de etanol nos Estados Unidos, foi adotado para comparação com a gasolina (dados de 2005 foram adotados considerando que as melhorias de eficiência na produção da gasolina são negligenciáveis).

¹¹ *Switchgrass* é um capim nativo da América do Norte (WANG et al., 2012).

Os resultados indicaram que a produção avançada de etanol de milho (a seco) poderá alcançar balanços de emissões de GEE e de energia melhores do que os da produção convencional atual, porém os balanços resultaram menos favoráveis do que os balanços de energia e de emissões de GEE do etanol por conversão bioquímica. O etanol por conversão termoquímica dos resíduos florestais foi o que resultou balanços menos favoráveis entre todas as tecnologias e biomassas avaliadas. Os autores enfatizam que o processo de conversão bioquímica conta com créditos da eletricidade excedente cogerada e que, se esses créditos fossem eliminados, as emissões de GEE seriam 20 a 30% maiores. Embora todas as alternativas avaliadas tenham apresentado vantagens em comparação com a gasolina, quando comparado com o caso adotado como referência, os balanços resultaram menos favoráveis. Uma análise de sensibilidade foi realizada para entender quais parâmetros tem maior influência nesses balanços e os resultados indicaram que irrigação, produtividade e uso de fertilizantes são os mais significativos.

Luo et al. (2010) também apresentam uma análise comparativa do etanol derivado de diferentes biomassas: resíduos de milho, caldo, bagaço e palha da cana, *switchgrass*, *flax shives* e *hemp hurds*. Os autores obtiveram dados de revisão de literatura e optaram por alocação em base econômica. No entanto, a produção de etanol de cana tem a coprodução de açúcar (apenas) e somente *switchgrass* tem excedente de eletricidade. Para aquecimento global, o etanol de *switchgrass* é a opção que resulta em menor impacto e o etanol de cana é a segunda melhor alternativa. O etanol de cana é a melhor opção quanto à oxidação fotoquímica e depleção de recursos abióticos, e a pior opção em relação à toxicidade humana e ecotoxicidade. *Flax shives* é a melhor opção quanto à acidificação, eutrofização e toxicidade humana e ecotoxicidade.

Wang et al. (2012) comparam o desempenho ambiental do etanol de milho, cana-de-açúcar (somente primeira geração), *switchgrass* e *miscanthus*¹² com base no balanço energético e das emissões de GEE no ciclo de vida (análise “do campo às rodas”). Etanol de *miscanthus* é a melhor opção, e o etanol de resíduos de milho é melhor opção que o etanol de *switchgrass*. Os autores consideraram cenários para 2015 e usaram o GREET para análise. Além disso, emissões associadas à mudança do uso do solo também foram consideradas. O software GREET tem um

¹² De acordo com Bringezu et al. (2009), *miscanthus* é uma biomassa para a produção de energia.

módulo – CCLUB¹³ (*Carbon Calculator for Land Use Change from Biofuels* – sigla em inglês) – que permitiu a quantificação dessas emissões. Para o caso da cana-de-açúcar, os autores consideraram os dados publicados pela EPA sobre as emissões associadas à mudança do uso do solo. Além disso, dados de produção da cana foram ajustados pelos autores com base nos dados de Macedo et al. (2004 e 2008) e Seabra et al. (2011). Os autores, assim como Luo et al. (2009 e 2010) não consideraram os dados de produção da enzima para hidrólise da biomassa.

¹³ O módulo combina dados do GTAP (Global Trade Analysis Project) e as emissões domésticas, que são calculadas a partir do software CENTURY (WANG et al., 2012).

3 Adaptação do banco de dados para as condições nacionais

3.1 Introdução

O óleo diesel é utilizado nas máquinas agrícolas para a produção da cana-de-açúcar e em caminhões para o transporte de insumos para produção de cana, transporte da cana e distribuição do etanol. Um levantamento referente aos anos de 2005/2006 apresentado por Seabra (2009), indica que o consumo de diesel representa cerca de 62% do total de energia primária fóssil no ciclo de vida do etanol. Quando o propósito da avaliação do ciclo de vida é verificar o impacto ambiental quando do uso do etanol em substituição à gasolina, dados referentes ao ciclo de vida da gasolina são necessários e as análises têm adotado base de dados internacionais para a gasolina (MACEDO et al., 2008, SEABRA, 2008, SEABRA e MACEDO, 2011, SEABRA et al., 2011).

Outros combustíveis fósseis derivados do petróleo são contabilizados indiretamente na análise do ciclo de vida do etanol, pois são insumos para a produção de fertilizantes aplicados nos canaviais – o gás natural, o resíduo asfáltico e o gás de refinaria são insumos para a produção de amônia e, conseqüentemente, ureia e nitrato de amônio. Os fertilizantes também representam uma parcela significativa do consumo de energia primária fóssil (18%) no ciclo de vida do etanol (SEABRA, 2008).

Assim, o objetivo deste capítulo foi coletar dados a partir de informações da literatura para construir uma base de dados mais apropriada para análises de sistemas nacionais. Para isso, processos existentes na base de dados do Ecoinvent e que possuem tecnologias similares às adotadas no Brasil foram tomados como referência. Dados sobre a produção e distribuição de combustíveis e de fertilizantes foram, então, utilizados para a adaptação do banco de dados, os quais subsidiaram as análises apresentadas nos capítulos seguintes.

3.2 Petróleo e seus derivados

A exploração e produção de petróleo no Brasil ocorrem majoritariamente em águas profundas (*offshore*). De acordo com a ANP (2012), em 2011, a produção *offshore* representou 91,4% do total de petróleo e 83,6% do total de gás natural produzidos no país.

De acordo com Chagas (2011), as condições brasileiras de exploração e produção *offshore* de petróleo são similares às da Noruega, onde há produção conjunta de gás natural em lâminas de água de grande profundidade. Assim, a base de dados do Ecoinvent para a exploração e produção de petróleo na Noruega foi adaptada com base nos dados de consumo de energia e produção de petróleo e gás natural na Bacia de Campos durante o período de 2001 a 2003 disponibilizados por D'Agosto (2004).

Alocação da demanda por energia entre o petróleo e o gás natural produzidos na Bacia de Campos (Santos/SP) foi feita em base energética. A energia necessária para a atividade de exploração foi alocada somente ao petróleo, considerando que o propósito da atividade de exploração é a produção de petróleo. Pelo mesmo motivo, o gás reinjetado durante a atividade de produção foi alocado somente ao petróleo produzido. Além disso, o inventário do Ecoinvent para exploração e produção de petróleo e gás natural na Noruega foi adaptado a partir da realocação, em base energética, dos demais insumos e das emissões com base na produtividade de petróleo e gás natural na Bacia de Campos entre 2001 e 2003. Os dados de consumo de energia adotados para a adaptação da base de dados estão na Tabela 3.1 a seguir.

Tabela 3.1 Consumo de energia para exploração e produção de petróleo offshore no Brasil

	Unidade	Exploração	Produção
Diesel	MJ/tp ^b	1,68E+02	2,06E+02
Gás natural (reinjetado)	MJ/tp	-	1,02E+02
Gás natural (queimado) ^a	MJ/tp	-	1,21E+03
Gás natural (consumido) ^a	MJ/tp	-	8,18E+02

Nota: a) considera a alocação, em base energética, entre o petróleo e gás natural produzidos na Bacia de Campos no período de 2001 a 2003. b) tp: tonelada de petróleo bruto

Fonte: D'Agosto (2004)

Para o transporte de petróleo, da bacia de exploração offshore ao terminal de distribuição, foi considerado, arbitrariamente, a distância média de 100 km e que a distribuição é feita por oleoduto.

As condições de exploração e produção de petróleo em terra (*onshore*) no Brasil são similares às da Nigéria, onde há a produção conjunta de petróleo e gás natural (CHAGAS, 2011). Assim, o inventário do Ecoinvent para esse processo na Nigéria foi usado como referência para a adaptação às condições brasileiras, com base na produção de petróleo e gás natural no Brasil no ano de 2010. Os dados de produção são da ANP (2012) e todos os insumos e emissões da base de dados do Ecoinvent para o processo de exploração de produção de petróleo e gás natural na Nigéria foram realocados entre produto e coproduto em base energética.

O Brasil não é autossuficiente em petróleo. As principais regiões geográficas fornecedoras do Brasil são: África Central (61,9% do total importado), Oriente Médio (27,9%), Norte da África (3,3%), América do Norte (2,2%), América Latina (1,6%), Europa (1,5%), Rússia (1,1%) e Austrália (0,5%) (ANP, 2011). A partir dessa informação, foi criado um processo para cada região geográfica fornecedora, utilizando os inventários Ecoinvent de extração e produção nessas regiões e adicionado a cada um os dados de distância para transporte por navio do principal porto da região produtora até o porto de Santos (CHAGAS, 2011 e CHAGAS et al., 2012). Como não há inventário de exploração e produção de petróleo para cada uma das regiões, por aproximação, inventários Ecoinvent que fossem representativos foram adotados como referência, conforme

indicado na Tabela 3.2. Um inventário foi então criado ponderando a participação de cada região fornecedora no total importado pelo Brasil.

Tabela 3.2 – Inventários e distâncias adotadas para cada região fornecedora de petróleo

Inventário <i>Ecoinvent</i>		Distância (km)
Europa	Crude oil, production GB, at long distance transport/RER	1,00E+04
Rússia	Crude oil, production RU, at long distance transport/RER	1,23E+04
América Latina	Crude oil, production RLA, at long distance transport/RER	7,30E+03
Oriente Médio	Crude oil, production RME, at long distance transport/RER	1,49E+04
Norte da África	Crude oil, production RAF, at long distance transport/RER	8,90E+03
África Central	Crude oil, production NG, at long distance transport/RER	6,40E+03
América do Norte	Crude oil, production RME, at long distance transport/RER	9,90E+03
Austrália	Crude oil, production RME, at long distance transport/RER	1,43E+04

Fonte: Chagas, 2011 e Chagas et al., 2012

Finalmente, considerando que as refinarias REDUC e REPLAN são representativas da média nacional, foram criados dois inventários que representam o petróleo que chega à REDUC e REPLAN.

D’Agosto (2004) apresenta dados referentes às condições de produção pela REDUC (Refinaria de Duque de Caxias) no estado do Rio de Janeiro (análise do tipo “do poço à bomba”) nos anos de 1999 a 2003, e os dados de Chan (2006) são representativos das condições de refino e processamento na REPLAN (Refinaria de Paulínia) no estado de São Paulo em 2005.

Os inventários foram criados considerando a parcela de petróleo nacional e importada processada em cada refinaria e a distância de transporte por oleoduto, do Terminal Marítimo da Ilha Grande até a REDUC e do Terminal de São Sebastião até a REPLAN, conforme dados apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 Dados adotados para o inventário de petróleo, na refinaria, no Brasil

Inventário Ecoinvent		Distância (km)	Importação (%)
REDUC	Transport, crude oil pipeline, onshore/RER	2,50E+02 ^a	5,00E+01 ^a
REPLAN		2,37E+02 ^b	1,70E+01 ^c

Fonte: a) D'Agosto (2004). b) Ko (2010). c) ANP (2010)

A comparação dos impactos ambientais, normalizados, do processo de exploração e produção de petróleo antes e após a adaptação das bases de dados é apresentada na Figura 3.1.

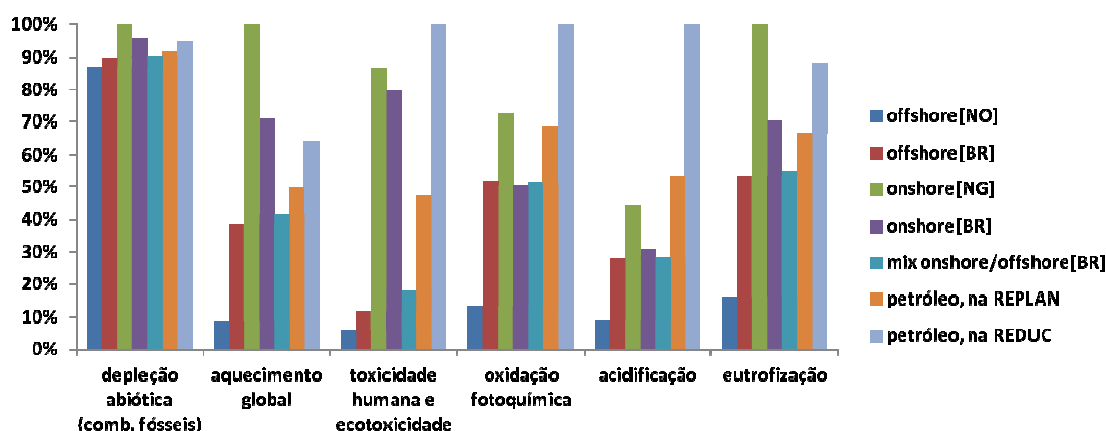


Figura 3.1 Impactos ambientais normalizados associados à exploração e produção de petróleo

Os impactos ambientais da extração e produção de petróleo offshore no Brasil são maiores que na Noruega porque há maior consumo de diesel, uma vez que, conforme exposto anteriormente, o consumo de diesel para a exploração foi alocado somente ao petróleo. Além disso, queima do gás natural em flares é maior no Brasil do que na Noruega e foi adicionado, ao processo brasileiro, o transporte do petróleo por dutos da bacia de exploração ao terminal de distribuição do petróleo para as refinarias.

O processo de exploração e produção onshore de petróleo no Brasil, no entanto, tem menor impacto ambiental que na Nigéria. Isso acontece devido à realocação dos insumos e emissões entre petróleo e gás natural. Os impactos ambientais do petróleo que chega à REDUC são maiores que os do petróleo que chega à REPLAN devido principalmente à parcela de petróleo

processado que é importado pelas refinarias. Uma vez que aos impactos ambientais do petróleo importado foram adicionados os impactos ambientais associados ao transporte por navio.

O inventário Ecoinvent de refino do petróleo foi usado como referência para a adaptação de dados representativos das condições de refino na REDUC e na REPLAN, considerando os dados levantados por D’Agosto (2004) e Chan (2006). No processo de refino, não somente os consumos de fósseis foram adaptados para representarem as condições brasileiras, mas também o total produzido de cada produto da refinaria. Os dados de consumo de energia pelas refinarias são apresentados na Tabela 3.4 e os dados de produção de cada produto pelas refinarias estão na Tabela 3.5. O método de alocação em base energética foi adotado.

Tabela 3.4 Consumo de energia para refino de petróleo

	Unidade	REPLAN	REDUC
Gás natural	MJ/tp	3,62E+02	4,25E+02
Óleo combustível	MJ/tp	1,39E+02	1,845E+03
Gás de refinaria	MJ/tp	7,97E+02	8,09E+02
Coque	MJ/tp	6,12E+02	4,89E+02
Queima de gás em <i>flare</i>	MJ/tp	5,16E+02	1,40E+00
Energia elétrica	kWh/tp	2,20E+01	2,61E+01

Fonte: D’Agosto (2004), Chan (2006).

Novos inventários foram criados para a gasolina e óleo diesel considerando a proporção da produção somente da REDUC e da REPLAN. Assim, a participação de cada refinaria no total produzido no Brasil, com base nos dados de produção divulgados pela ANP (2010) foi: óleo diesel: 23% produzido pela REDUC e 77% produzido pela REPLAN; gasolina: 32% produzida pela REDUC e 68% produzida pela REPLAN. Além disso, foi adicionado o inventário de distribuição por caminhão considerando, arbitrariamente, a distância média de 300 km, da refinaria até o posto de abastecimento.

Tabela 3.5 Produção de derivados do petróleo pela REPLAN e REDUC

	Unidade	REPLAN	REDUC
Gasolina	kg/tp	1,92E+02	1,42E+02
Óleo Lubrificante	kg/tp	-	5,10E+01
Óleo diesel	kg/tp	5,14E+02	2,21E+02
Óleo combustível	kg/tp	7,29E+01	3,11E+02
Querosene de aviação	kg/tp	2,69E+01	7,10E+01
Nafta	kg/tp	3,13E+01	9,10E+01
GLP	kg/tp	6,17E+01	7,10E+01
Asfalto	kg/tp	5,00E+00	1,10E+01
Coque	kg/tp	8,62E+01	-
Querosene iluminante	kg/tp	7,00E-01	-
Outros ^a	kg/tp	9,30E+00	3,10E+01

Nota: a) inclui diluentes, solventes, parafina e outros produtos não energéticos.

Fonte: D'Agosto (2004), Chan (2006).

A Figura 3.2 a seguir apresenta a comparação dos impactos ambientais da gasolina e diesel, considerando os inventários adaptados às condições brasileiras e os inventários adotados como referência para a adaptação.

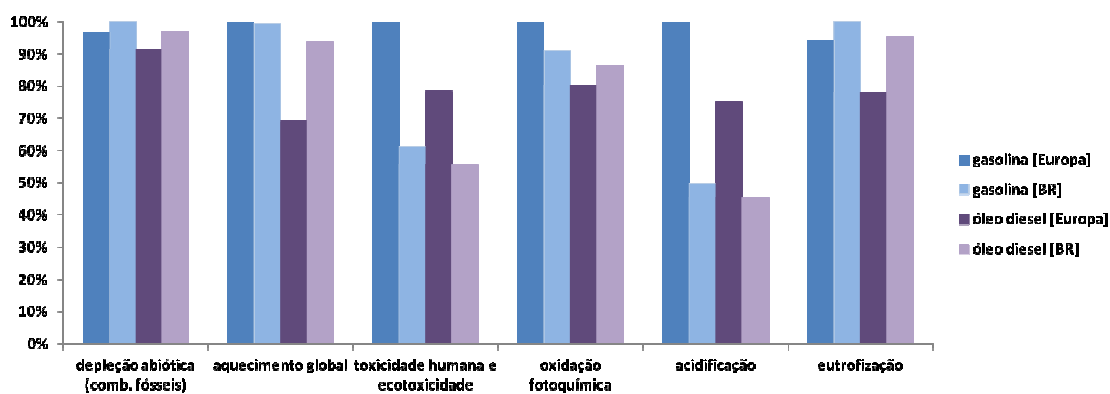


Figura 3.2 Impactos ambientais da produção de gasolina e de óleo diesel

A adaptação da base de dados da etapa de exploração e produção de petróleo no Brasil e o uso de dados representativos das condições brasileiras de consumo de energia durante o refino do

petróleo justifica a diferença dos impactos ambientais da cadeia produtiva do óleo diesel e da gasolina no Brasil em comparação à internacional. A produção de óleo diesel e de gasolina pela REDUC e pela REPLAN justifica a diferença de impactos ambientais desses produtos, uma vez que os insumos e emissões da refinaria são alocados entre os produtos.

3.3 Fertilizantes aplicados nos canaviais

Os macronutrientes aplicados nos canaviais são nitrogênio (N), fósforo (P_2O_5) e óxido de potássio (K_2O). Para os fertilizantes fosfatados, dados nacionais são baseado em Souza e Fonseca (2009), que expõem dados para a produção dos insumos, como ácido sulfúrico, enxofre, entre outros, e dados referentes à produção dos fertilizantes fosfatados.

Ribeiro (2009) expõe dados da cadeia produtiva da ureia, obtidos junto à Fosfértil (Araucária/PR) e Petrobrás/FAFEN (Laranjeiras/SE), e do nitrato de amônio, cujos dados foram obtidos junto à Fosfértil (Cubatão/SP).

A cadeia produtiva dos fertilizantes é constituída de mineração (ou exploração e produção), transporte da matéria-prima até as indústrias, produção de fertilizantes, distribuição dos fertilizantes até as misturadoras e distribuição das misturas NPK até os consumidores finais. Embora haja a possibilidade de o produtor de cana comprar os fertilizantes direto das indústrias e/ou das misturadoras, optou-se, conservadoramente, por considerar que a distribuição dos fertilizantes ocorre em duas etapas: i) da fábrica de fertilizante até a misturadora; ii) da misturadora até a COPLACANA (Piracicaba/SP). Essa abordagem foi baseada no fato de a produção de cana em Piracicaba ser tradicional e representativa do total produzido no estado de São Paulo, e a COPLACANA ser uma cooperativa dos produtores de cana da região.

3.3.1 Fertilizantes nitrogenados

Os fertilizantes nitrogenados têm como principal matéria-prima a amônia anidra (NH_3) – produto da reação do gás de síntese, ou seja, de uma mistura de 1:3 de nitrogênio do ar (N_2) e hidrogênio proveniente de fontes fósseis como o gás natural, nafta, óleo combustível e outros derivados do petróleo (DIAS e FERNANDES, 2006). No Brasil há dois processos de produção de amônia: i) reforma catalítica de hidrocarbonetos leves com vapor de água e, ii) oxidação parcial de hidrocarbonetos pesados. A reforma catalítica é a tecnologia empregada pela Petrobras/FAFEN, localizadas em Camaçari (BA) e Laranjeiras (SE), que tem como insumo o gás natural, e pela Fosfertil (Cubatão/SP) para a produção de nitrato de amônio utilizando o gás combustível de refinaria. O processo de oxidação parcial é empregado somente pela Fosfertil, unidade de Araucária (PR), que usa o resíduo asfáltico como fonte de hidrogênio (RIBEIRO, 2009).

Os dados de consumo de energia elétrica foram alterados considerando o inventário de produção de eletricidade no Brasil. Com relação ao consumo de energia para produção de amônia, nota-se que a Petrobras/FAFEN consome energia elétrica da rede, além da energia térmica disponibilizada através do gás natural. O consumo de energia elétrica é praticamente o mesmo da Fosfertil para a produção de amônia a partir do resíduo asfáltico.

O inventário de produção de amônia na Europa por reforma catalítica tem como insumo o óleo combustível. Assim, este insumo foi alterado, passando de óleo combustível para gás natural.

Outra alteração necessária para o processo de reforma catalítica está relacionada à produção de energia térmica. O processo de referência usa o óleo combustível para geração de energia térmica, enquanto a Petrobras/FAFEN usa o gás natural. A alteração do insumo para geração de energia térmica exigiu que as emissões do processo também fossem recalculadas, considerando o insumo adotado, conforme apresentado por Chagas (2011 e 2012).

O processo de produção da amônia por oxidação parcial usado como referência representa, também, as condições europeias, onde o óleo combustível pesado é usado como insumo. Embora no Brasil a matéria-prima seja o resíduo asfáltico, manteve-se o óleo combustível como insumo porque não há inventário para o processo produtivo de resíduo asfáltico. A demanda dos insumos, gás natural e óleo combustível, é a mesma apresentados por Ribeiro (2009) e, conseqüentemente, não houve necessidade de alteração.

De acordo com Ribeiro (2009), para a produção de uma tonelada de nitrogênio nutriente são necessárias 2,2 toneladas de ureia e, para produzir esta quantidade de ureia, são necessários 1,2 tonelada de amônia. O inventário de produção de ureia baseado em amônia por reforma catalítica, representativo das condições europeias (Ecoinvent, 2007c), foi adotado como referência para a criação de dois processos que representassem as condições brasileiras – um usando o inventário de amônia por reforma catalítica adaptado para representar as condições brasileiras, e o outro substituindo a amônia por reforma catalítica pela amônia por oxidação parcial. Além dessas alterações, o processo de produção de eletricidade (insumo da indústria de ureia) foi substituído pelo processo que representa as condições brasileiras.

A produção brasileira de ureia é dominada por dois fabricantes: Fosfertil, unidade de Araucária (PR), que representa 37% da produção nacional e Petrobras/Fafen, unidades de Camaçari (BA) e Sergipe (SE), que representam 63% da produção nacional (ANDA, 2008 *apud* Ribeiro, 2009). Além disso, em 2010 o Brasil importou 72% da ureia consumida no país, sendo a Rússia a principal fornecedora (MDIC, 2011). Com base nesses dados, um inventário foi criado para representar o mix nacional de ureia, adicionando os processos de transporte da ureia por navio (no caso da importação), e transporte por caminhão do porto até a misturadora, e da misturadora até a COPLACANA (Piracicaba/SP). O processo de produção da ureia na Europa foi usado como referência para a parcela de ureia importada. As distâncias percorridas pelos caminhões e navio estão na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 Dados de logística de produção e distribuição de ureia

Percurso	Distância (km)	Modal
Produção nacional – Misturadora	4,17E+02	caminhão
Rússia – Santos	1,60E+04	navio
Santos – Misturadora	1,80E+01	caminhão
Misturadora – Coplacana	2,27E+02	caminhão

Fontes: da Silva et al. (2011)

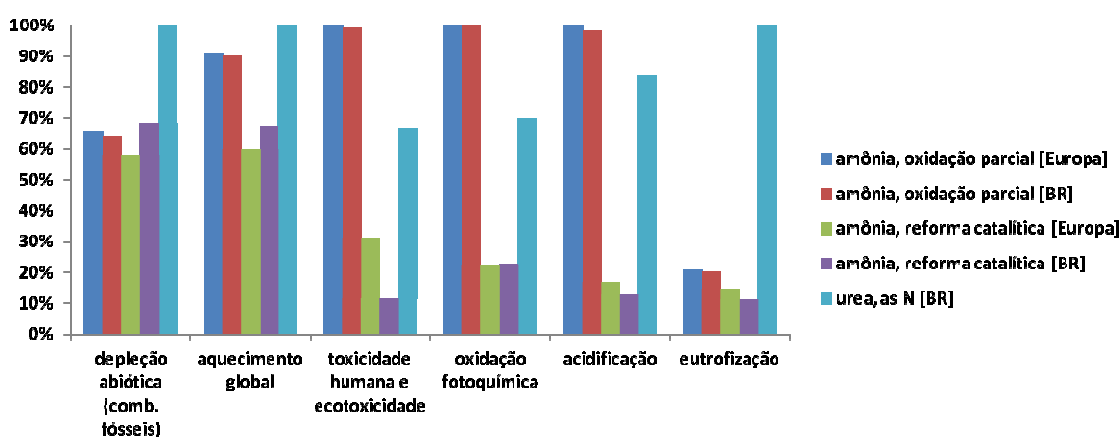


Figura 3.3 Impactos ambientais associados à produção de amônia e à produção de uréia

Conforme apresentado na Figura 3.3, os impactos ambientais associados à cadeia produtiva da amônia pelo processo de oxidação parcial no Brasil são quase os mesmos que na Europa, já que a alteração do processo que representa mix de eletricidade da rede na Europa pelo processo que representa o mix de eletricidade da rede brasileira foi única adaptação realizada para este caso, ou seja, a energia elétrica não é muito relevante para os processos. Por outro lado, a diferença entre os impactos ambientais da produção de amônia pelo processo de reforma catalítica no Brasil e na Europa é devido à alteração do uso de óleo combustível para a produção de energia térmica necessária por gás natural.

3.3.2 Fertilizantes fosfatados

O triplofosfato simples (TSP) contém 45% de P_2O_5 e a sua produção consiste da associação do concentrado fosfático ao ácido sulfúrico para a produção do ácido fosfórico, e da associação do ácido fosfórico ao concentrado fosfático para a produção do TSP. Para a produção de uma tonelada de TSP são necessárias 0,4 tonelada de concentrado fosfático e 0,7 tonelada de ácido fosfórico, e para a produção de uma tonelada de ácido fosfórico são necessárias 1,7 tonelada de concentrado fosfático e 1,4 tonelada de ácido sulfúrico (KULAY, 2004).

O enxofre é o principal insumo para a produção do ácido sulfúrico. No Brasil, 100% do enxofre usado para a produção do ácido sulfúrico nas indústrias de fertilizantes é importado (BNDES, 2010). Embora a produção da Petrobras (através da recuperação de gases ácidos do petróleo) tenha, em 2006, atendido 7% da demanda nacional, essa produção foi destinada às indústrias químicas, de cosméticos e de papel e celulose (DIAS e FERNANDES, 2006). O maior fornecedor de enxofre para o Brasil é o Canadá (RIBEIRO, 2009).

A adaptação do inventário de ácido sulfúrico seguiu os procedimentos adotados por Chagas (2011). O autor usou o inventário representativo das condições europeias e ajustou os insumos e emissões do processo multiplicando-os por um fator de 1,38 – que representa 10,5% do ácido sulfúrico produzido no Brasil a partir do dióxido de enxofre, e 65% para que os insumos e emissões representem a produção autônoma de ácido sulfúrico (uma vez que na Europa 35% do ácido sulfúrico é coproduzido nas atividades de mineração). Além dessa alteração, Chagas (2011) substituiu o processo de produção de eletricidade pelo processo de produção de eletricidade no Brasil e acrescentou o transporte por navio (distância de 12000 km) para representar a parcela de enxofre importada pelo país.

O ácido fosfórico é produzido através da mistura de concentrado fosfático e ácido sulfúrico. De acordo com Kulay (2004), para a produção de 1 tonelada de ácido fosfórico (H_3PO_4) são necessários 1,7 tonelada de concentrado fosfático e 1,4 tonelada de ácido sulfúrico. A

concentração de P_2O_5 no ácido fosfórico é de 52%. No Brasil, a tecnologia majoritariamente empregada para a produção de ácido fosfórico é a Dihidrato (DH) e depende da manutenção da faixa de temperatura de trabalho do sistema (Kulay, 2004). As reações envolvidas no processo são fracamente exotérmicas e seria necessária a instalação de unidades de resfriamento para garantir a remoção contínua da energia térmica excedente.

Do mesmo modo que para o ácido sulfúrico, a adaptação do inventário Ecoinvent do ácido fosfórico foi realizada de acordo com Chagas (2011). Para o caso do ácido fosfórico, o autor considerou a parcela de concentrado de rocha fosfática, ácido fosfórico e intermediários importada pelo Brasil e os principais exportadores desses produtos para o Brasil (chegando, assim às distâncias percorridas por navio e à ponderação entre nacional e importado). Além disso, o autor substituiu o processo de produção de eletricidade pelo processo de produção de eletricidade no Brasil.

O processo de produção do triplofosfato simples (TSP) representativo das condições europeias de produção, disponível no relatório do Ecoinvent, foi usado como referência para a adaptação de acordo com a realidade brasileira. Essa adaptação foi feita com base na substituição dos inventários de insumos como ácido sulfúrico e ácido fosfórico pelos inventários adaptados, bem como pela substituição do inventário de produção de eletricidade pelo inventário que representa as condições brasileiras.

Além disso, uma ponderação foi feita considerando a parcela de TSP importada pelo Brasil, bem como o transporte por navio. Em 2010 o Brasil importou 53% do TSP, sendo Israel o principal fornecedor (MDIC, 2011). A distância percorrida por navio durante a importação é de 14000 km (www.ports.com). O inventário usado para representar a parcela importada é representativo das condições de produção do TSP no Marrocos.

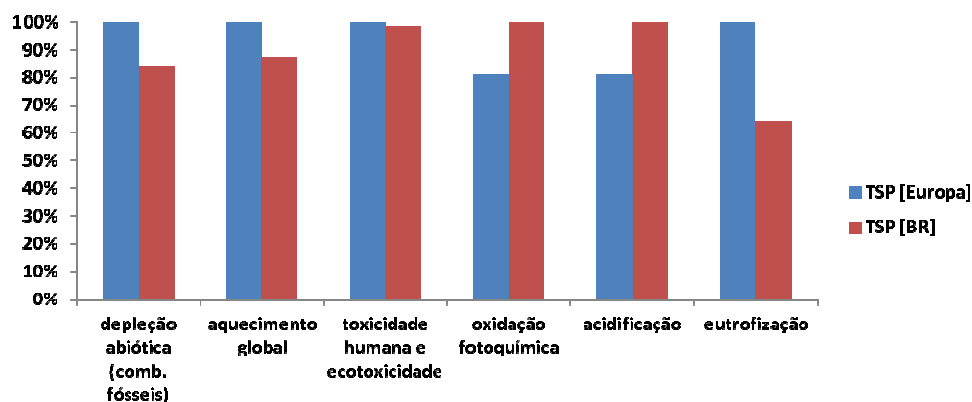


Figura 3.4 Impactos ambientais da cadeia produtiva do TSP

A diferença entre os resultados apresentados na Figura 3.4 é devida, principalmente, ao transporte dos insumos até a fábrica do fertilizante. O processo representativo das condições europeias considera o transporte dos insumos, enquanto para o caso brasileiro foi considerado que produção do fertilizante acontece no mesmo local que a fabricação dos insumos (todos derivados de rocha fosfática).

4 Avaliação ambiental do etanol de cana em cenários prospectivos

4.1 Introdução

A produção de bioetanol tem aumentado mundialmente devido à necessidade de substituição de combustíveis fósseis e de redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE). De acordo com a regulamentação US RFS2, o etanol de primeira geração produzido no Brasil é classificado como um biocombustível avançado, uma vez que as emissões de GEE são 61% menores quando do seu uso em substituição à gasolina (EPA, 2010), enquanto a EU RED indica que o etanol de cana-de-açúcar mitiga 71% das emissões da gasolina (EU RED, 2009). Ainda assim, ações têm sido tomadas para melhoria do perfil ambiental do etanol de cana no Brasil.

Investimentos em pesquisa e desenvolvimento de etanol derivado de material lignocelulósico (por exemplo, palha e bagaço da cana) compõem os esforços para aumentar a produção de etanol por hectare de cana-de-açúcar. Nesse sentido, a criação do Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (CTBE) é uma demonstração do suporte do Governo para o desenvolvimento de tecnologias objetivando a expansão sustentável da produção de etanol no Brasil (NYKO et al., 2011; CTBE, 2012).

Estudos têm sido publicados provendo informações sobre as projeções de desempenho econômico e ambiental da produção do etanol de resíduos da cana no Brasil (ver Capítulo 2). Apesar de haver uma concordância relativa aos aspectos econômicos, os resultados para as diferentes categorias de impacto ambiental apontam para direções diferentes (LUO et al., 2009; SEABRA e MACEDO, 2011). O balanço de emissões de GEE, por exemplo, favorece a hidrólise enzimática comparada à conversão termoquímica do bagaço de cana (SEABRA, 2008), enquanto outras análises indicam impactos ambientais negativos com relação ao pré-tratamento alcalino do processo de conversão bioquímica (DIAS et al., 2012).

Em adição ao desenvolvimento do etanol de segunda geração, melhorias na etapa de cultivo da cana-de-açúcar também são esperadas. Por exemplo, práticas de cultivo mínimo já têm sido introduzidas em alguns canaviais. Nesse sentido, o CTBE está desenvolvendo uma Estrutura de Tráfego Controlado (ETC) para redução da compactação do solo (e, conseqüentemente, para a redução do número de operações requeridas para o preparo do solo) e para facilitar a introdução do plantio direto (CTBE, 2013).

A expectativa é a de que essas melhorias favoreçam a sustentabilidade do etanol de cana-de-açúcar, mas os benefícios ambientais ainda não estão claros. Assim, análises são requeridas para avaliar os ganhos ambientais do uso da ETC, de tecnologias para a produção do etanol de bagaço e palha (em comparação ao uso alternativo dos resíduos da cana) e de avanços tecnológicos esperados na produção futura de cana-de-açúcar e do etanol.

O objetivo deste capítulo foi analisar o perfil ambiental do etanol no Brasil em cenários prospectivos, assumindo a implantação de tais avanços tecnológicos.

4.2 Descrição dos cenários

Quatro cenários prospectivos foram considerados, abrangendo duas opções para utilização do bagaço e palha da cana e duas diferentes opções para o sistema de produção da cana-de-açúcar. Dessa forma, os impactos associados à produção de etanol de segunda geração e os impactos associados às mudanças das práticas agrícolas de cultivo da cana de açúcar puderam ser observados separadamente. Um cenário (S0) baseado nas melhores condições atuais de produção de etanol foi adotado como sistema de comparação.

- Cenário S0: cultivo convencional da cana-de-açúcar (sem queima na pré-colheita); produção de etanol de primeira geração a partir do caldo da cana e geração de eletricidade excedente pelo sistema de cogeração alimentado com resíduos da cana (bagaço e palha);

- Cenário S1: cultivo mínimo da cana-de-açúcar; produção de etanol de primeira geração a partir do caldo da cana e geração de eletricidade excedente pelo sistema de cogeração alimentado com resíduos da cana (bagaço e palha);

- Cenário S2: cultivo da cana-de-açúcar com plantio direto; produção de etanol de primeira geração derivado do caldo e excedente de eletricidade derivada dos resíduos da cana;

- Cenário S3: cultivo mínimo da cana-de-açúcar; produção conjunta de etanol de primeira geração (do caldo da cana) e segunda geração (palha e bagaço da cana), com produção reduzida de eletricidade excedente;

- Cenário S4: cultivo da cana-de-açúcar com plantio direto; produção conjunta de etanol de primeira geração (do caldo da cana) e segunda geração (palha e bagaço da cana), com reduzida produção de eletricidade excedente.

No sistema de cultivo mínimo, a cana-de-açúcar é cultivada com algumas operações para o preparo do solo, enquanto nenhuma operação para preparo do solo é necessária quando do uso da prática de plantio direto. Nos cenários S3 e S4, o etanol de caldo de cana (primeira geração) e de resíduos de biomassa (segunda geração) são produzidos na mesma planta, compartilhando alguns processos (DIAS et al., 2012). Mais detalhes são descritos abaixo.

Cultivo da cana-de-açúcar: a completa eliminação da prática de queima na pré-colheita é uma mudança esperada no cultivo da cana no curto prazo em diversas áreas (São Paulo, 2002). No sistema sem a queima prévia, a cana-de-açúcar é colhida mecanicamente e uma quantidade de biomassa (palha da cana) ficará disponível para aplicações industriais. No entanto, uma quantidade de palha deve também ser deixada no campo para conservação e/ou melhoria das condições do solo, incluindo proteção do solo e redução da lixiviação. A quantidade de palha a ser deixada no campo e a ser recuperada para uso industrial deve ser definida de acordo com as propriedades do solo em cada canavial, observando os benefícios esperados pelo uso industrial e agrícola da biomassa.

Neste trabalho, assumiu-se que 50% do total de palha disponível (ou seja, 70kg(bs)/t de cana) será deixada no campo e os 50% restantes será coletado e transportado junto com a cana para o uso industrial. Dado que parte dos resíduos serão deixados no canavial, práticas de cultivo mínimo podem ser adotadas.

Nos cenários S1 e S3, a prática de cultivo mínimo é adotada, eliminando algumas operações (existentes atualmente em canaviais com o sistema de cultivo tradicional) para o preparo do solo devido à proteção promovida pela palha deixada no campo. Nesses cenários, a colheita da cana é realizada com a colhedora convencional.

Nos cenários S2 e S4, por outro lado, a implantação da mecanização de baixo impacto para o plantio direto é considerada. Nesse sistema, a cana-de-açúcar é colhida com o uso da ETC, a qual se espera que seja capaz de prevenir a compactação do solo e, assim, eliminar a necessidade de operações de preparo do solo. Isto é possível porque as rodas da ETC foram projetadas para correr em um trilho permanente georeferenciado, com espaçamento de 9 metros. Esse sistema reduz o tráfego de implementos agrícolas nos canaviais de 60% (mecanização atual) para menos de 10% da área plantada (CTBE, 2012). A Estrutura de Tráfego Controlado (ETC) está ilustrada na Figura 4.1.



Figura 4.1 Estrutura de tráfego controlado (ETC)

Fonte: CTBE (2013)

Devido às práticas de manejo conservacionista, os ganhos de produtividade projetados para os cenários S2 e S4 são maiores, comparados com aqueles dos cenários S1 e S3. A Tabela 4.1

apresenta as operações agrícolas definidas para cada cenário. Em termos da qualidade da cana-de-açúcar (concentração de açúcar na cana), nenhuma diferença foi definida entre os cenários.

Tabela 4.1 Operações agrícolas associadas às práticas de cultivo da cana-de-açúcar

Etapas	S1 e S3		S2 e S4	
	Operações	Equipamentos	Operações	Equipamentos
Pre-plantio	Dessecação da soqueira antiga	TP 75 cv 4x4 + pulv. Barra 18m	Dessecação da soqueira antiga	TP 75 cv 4x4 + pulv. Barra 18m
	Eliminação da soqueira antiga	TP 120 cv 4x4 + subsolador	-	-
	Correção do solo (calagem e gessagem)	Tp 90 cv 4x2 + distribuidor de calcário 2,3m3	Correção do solo (calagem e gessagem)	Tp 90 cv 4x2 + distribuidor de calcário 2,3m3
Preparo do solo	Subsolagem	Tp 240 cv + subsolador	-	-
	Gradagem niveladora (1x)	Tp 240 cv + subsolador	-	-
Plantio	Plantio mecanizado	Tp 180 hp 4x4 + plantadora DMB	Plantio mecanizado	Tp 180 hp 4x4 + plantadora DMB
	Aplicação de torta de filtro	Tp 90 cv + distr. Torta de filtro	Aplicação de torta de filtro	Tp 90 cv + distr. Torta de filtro
	Transporte interno de insumos	Caminhão truck	Transporte interno de insumos	Caminhão truck
Tratos culturais da cana planta	Aplicação de herbicida	Tp 75 cv 4x4 + pulv. Barra 18m	Aplicação de herbicida	Tp 75 cv 4x4 + pulv. Barra 18m
Tratos culturais da cana soca	Aplicação de herbicida	Tp 75 cv 4x4 + pulv. Barra 18m	Aplicação de herbicida	Tp 75 cv 4x4 + pulv. Barra 18m
	Aplicação de torta de filtro	Tp 90 cv 4x2 + distr. Torta de filtro	Aplicação de torta de filtro	Tp 90 cv 4x2 + distr. Torta de filtro
	Adubação da soqueira (tríplice operação)	Tp 120 cv 4x4 + cultivador	Adubação da soqueira (tríplice operação)	Tp 120 cv 4x4 + cultivador
	Transporte interno de insumos	Caminhão truck	Transporte interno de insumos	Caminhão truck
Colheita	Colheita mecanizada	colhedora 342cv + Esteira d=457,2mm	Colheita mecanizada	ETC (CTBE) 240 cv
	Conjunto transbordo	TP 120 cv 4x4 + transbordo	Conjunto transbordo	TP 120 cv 4x4 + transbordo

Outra melhoria assumida para todos os cenários é a concentração da vinhaça, que poderá favorecer a logística de distribuição, permitindo, assim, a sua aplicação como fertilizante em todo o canavial. A vinhaça concentrada seria aplicada diretamente (6%) e por aspersão (94%). Devido às melhorias nas práticas de produção e melhor uso dos resíduos, assume-se que nenhuma

aplicação de potássio será requerida e que uma menor quantidade de fósforo será necessária para o cultivo da cana-de-açúcar no futuro.

Transporte da cana-de-açúcar: o transporte da cana-de-açúcar do campo para a usina é realizado por caminhões com diferentes capacidades de carga e eficiências. Atualmente, o transporte pode ser feito por caminhões “truck” (15 t), Romeo e Julieta (28 t) e Rodotrem (45 – 58 t). A participação de cada tipo de caminhão no total de cana transportada depende do produtor/usina, mas o tipo “truck” tem sido substituído pelas outras opções devido à viabilidade econômica. Neste trabalho, assumiu-se que o transporte da cana-de-açúcar, do canavial até a usina, será feito do mesmo modo em todos os cenários – 100% por Rodotrem.

Produção de etanol: nas últimas décadas as usinas de etanol no Brasil têm experimentado melhorias consideráveis em termos de eficiência de conversão de açúcar (LEAL et al., 2013). Mas para o futuro pouca evolução é esperada. No entanto, progresso é esperado com respeito ao balanço de energia das usinas e utilização dos resíduos da cana. Hoje, a produção de etanol no Brasil é autossuficiente em energia, uma vez que a planta de cogeração fornece todo o vapor e eletricidade requeridos pelo processo através do uso do bagaço como combustível nas caldeiras. Além disso, muitas usinas já são capazes de exportar eletricidade para a rede. Tais configurações permitem a geração de mais de 60 kWh/t de cana de eletricidade excedente usando somente o bagaço como combustível, enquanto que a implementação e evolução do recolhimento da palha da cana eventualmente levará a produção ainda maior de eletricidade excedente (SEABRA e MACEDO, 2011; DIAS et al., 2012).

Essas melhorias foram consideradas na definição dos cenários prospectivos analisados neste trabalho. Basicamente, considera-se a adoção dos seguintes equipamentos/configurações: i) eletrificação dos sistemas em substituição às turbinas de acionamento a vapor; ii) extração do caldo com difusores; iii) sistemas de cogeração de alta pressão/temperatura; iv) concentração da vinhaça a 4 vezes do volume inicial. Adicionalmente, é considerada a redução do consumo de vapor do processo relacionado à produção do etanol de primeira geração e o uso de palha como combustível suplementar ao bagaço.

Para os cenários S1 e S2, essas melhorias resultam em menor consumo de energia, maior capacidade de cogeração e, conseqüentemente, maior capacidade de exportação de eletricidade para a rede. Para os cenários S3 e S4, as melhorias permitem a utilização de maior quantidade de bagaço para a conversão bioquímica, e a exportação de eletricidade ainda pode ser mantida (embora a eletricidade excedente seja menor que nos cenário com produção de etanol de primeira geração).

Nos cenários S3 e S4, a produção do etanol de primeira e segunda geração ocorre em uma usina integrada. Conforme ilustrado na Figura 4.3, depois do pré-tratamento (explosão a vapor) e a hidrólise enzimática, os sólidos seguem para a planta de cogeração, enquanto o licor hidrolisado é misturado ao caldo da cana-de-açúcar. Com essa configuração, as etapas de concentração do caldo, fermentação e destilação são compartilhadas entre o processo de produção do etanol de primeira e segunda geração (DIAS et al., 2012). Nesse cenário, assume-se que tanto as pentoses quanto as hexoses presentes no licor hidrolisado serão fermentados à etanol.

Distribuição de etanol: este estudo assume que o etanol será produzido e consumido no Brasil. Para todos os cenários é considerado que o etanol será distribuído por dutos e caminhões (SEABRA, 2008).

Uso de etanol: o uso do etanol hidratado E100 se dá como combustível para veículos com motor de ignição por centelha.

Um sistema convencional de produção de etanol, cenário S0, adotado para comparação, é baseado em Cavalett et al. (2012), que consideram o sistema convencional de produção de cana-de-açúcar, colheita mecanizada sem queima prévia, usina autônoma com eletrificação dos sistemas, porém sem uso de difusores, sem concentração de vinhaça e sem queima da palha na caldeira de cogeração de eletricidade. As Figuras 4.2 e 4.3 ilustram os sistemas de produto.

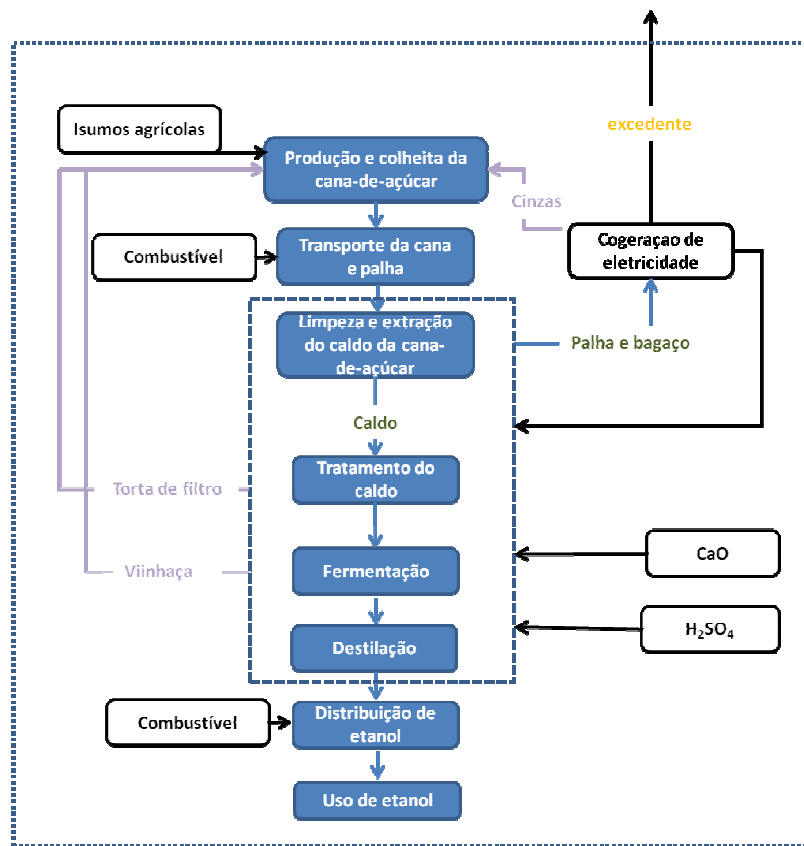


Figura 4.2 Definição do sistema de produto para os cenários S0, S1 e S2

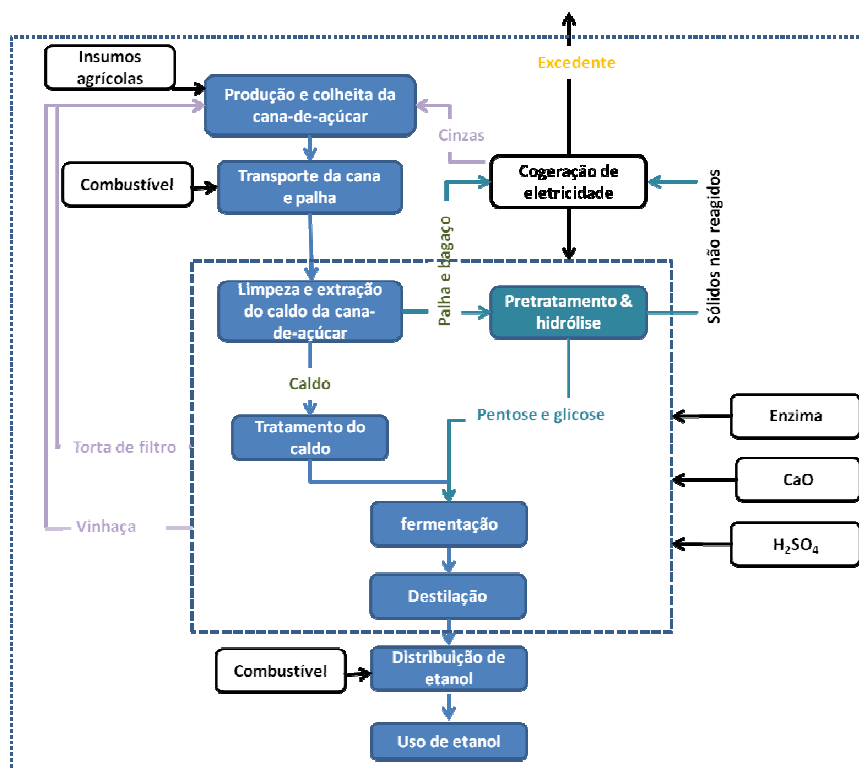


Figura 4.3 Definição do sistema do produto para os cenários S3 e S4

4.3 Metodologia e Dados

A análise segue a metodologia de avaliação do ciclo de vida, utilizando o método CML 1999 (GUINÉE et al., 2002), versão 3.9 (2010), para a avaliação do impacto do ciclo de vida. Oito categorias de impacto foram consideradas: depleção dos recursos abióticos (combustíveis fósseis), aquecimento global, oxidação fotoquímica, ecotoxicidade (aquática e terrestre) e toxicidade humana, acidificação e eutrofização – sendo ecotoxicidade e toxicidade humana agrupadas em uma única categoria. A escolha por avaliar especificamente essas categorias de impacto foi baseada nas expectativas com relação aos biocombustíveis (redução da demanda por fontes fósseis de energia e das emissões de GEE) e nas principais emissões do ciclo de vida do etanol.

Para entender qual alternativa é a melhor opção para substituir o uso da gasolina no setor de transporte, foi adotada a alocação em base energética e 1 MJ como unidade funcional (UF). Por outro lado, para entender qual é a melhor opção para o aproveitamento de 1 ha de cana (maior produção de etanol ou maior produção de eletricidade), os benefícios ambientais de cada cenário foram estimados considerando a substituição das alternativas fósseis, ou seja, gasolina como um combustível de transporte e gás natural em termoeletricas. Foi assumido que 1 MJ de etanol substitui 1 MJ de gasolina. Para esta análise, adotou-se os produtos de um hectare (1 ha) de cana como fluxo de referência para a normalização do desempenho ambiental. Em ambos os casos a análise é “do berço ao túmulo”. Para o inventário do ciclo de vida da gasolina, bem como da eletricidade gerada em uma termoeletrica a gás natural, não foram consideradas mudanças na cadeia produtiva para o horizonte temporal desta análise. Com relação à termoeletricidade a partir de gás natural, inventário do Ecoinvent foi adotado.

Dados representativos das condições brasileiras foram coletados para sistemas primários e a base de dados do EcoInvent foi utilizada para sistemas secundários. Nenhum critério de corte foi adotado, ou seja, todos os sistemas de produto anteriores aos sistemas dos insumos do ciclo de vida do etanol foram considerados. Emissões e absorção de CO₂ biogênico foram consideradas como sincronizadas ao longo do ciclo de vida e, assim, não foram computadas neste trabalho.

As emissões de GEE devido aos impactos diretos da mudança do uso do solo apresentam incertezas com relação ao tipo de solo em que ocorreu a mudança (solos arenosos têm menor capacidade de estocar carbono que solos argilosos, por exemplo – Macedo e Seabra (2008)) e o estoque de carbono nas diferentes culturas em diferentes práticas de manejo. Além disso, não se sabe o impacto da produção da segunda geração em necessidades ou redução de novas áreas para produção da matéria-prima e o impacto do uso da ETC no estoque de carbono no solo não é conhecido. Dadas as incertezas relacionadas, este trabalho não aborda as emissões associadas à mudança do uso do solo.

Para os sistemas de produto que representam situações futuras (2020-2035) dados de cultivo e transporte da cana-de-açúcar foram coletados a partir de entrevistas a especialistas e dados associados ao processamento da cana foram obtidos através de simulações do processo em

AspenPlus realizadas pelo Programa de Avaliação Tecnológica/CTBE, considerando as melhorias tecnológicas descritas anteriormente. Para as etapas de distribuição e uso, assim como para o cenário atual (S0), dados foram obtidos de literatura publicada. Como dados das etapas agrícola e de transporte da cana foram obtidos com base nas entrevistas a especialistas, este trabalho adotou a opinião de apenas um dos especialistas entrevistados para a análise. Então, a análise de incerteza foi realizada com base na variação de opiniões de especialistas para alguns parâmetros agrícolas e com base na literatura publicada.

4.3.1 Dados da etapa agrícola

Os parâmetros projetados, de acordo com a opinião de especialista, alimentaram o modelo CanaSoft (2013)¹⁴ para obter o total de insumos para a produção e transporte de cana-de-açúcar do campo à usina. Os principais parâmetros de entrada que definem o cenário agrícola no CanaSoft são apresentados nas Tabelas 4.2 e 4.3.

¹⁴ O CanaSoft é um modelo desenvolvido pelo Programa de Avaliação Tecnológica/CTBE com o objetivo de integrar dados de entrada às análises ambiental e econômica. A base de dados do software representa a etapa de produção e transporte da cana-de-açúcar e parâmetros podem ser alterados de modo a representar uma determinada realidade, de acordo com o interesse de quem faz a análise (CTBE, 2013).

Tabela 4.2 Parâmetros agrícolas para o cultivo de 1 ha de cana-de-açúcar nos cenários S1 e S3

Parâmetros	Unidade	Cana Planta ^a	Cana Soca ^a	Ciclo ^b
Área com plantio manual (semi-mecanizado)	%	-	-	-
Área com colheita manual	%	-	-	-
Área com queima pré-colheita	%	-	-	-
Palha enviada para usina	%	5,00E+01	5,00E+01	5,00E+01
Área que recebe vinhaça	%	1,00E+02	1,00E+02	1,00E+02
Área que recebe torta e cinza	%	7,42E+01	-	1,26E+01
Aplicação de herbicida	L	4,00E+00 ^c	-	6,70E-01
Aplicação de calcário ^d	kg	3,50E+03	1,50E+03	8,33E+02
Aplicação de gesso ^d	kg	1,50E+03	1,50E+03	5,00E+02
Aplicação de N ^e	kg			
Áreas com torta e cinza		4,00E+01		
Áreas sem torta e cinza		6,00E+01	1,10E+02	8,09E+01
Aplicação de P ₂ O ₅ ^f	kg			
Áreas com torta e cinza		-	-	
Áreas sem torta e cinza		1,80E+02	-	7,70E+00
Aplicação de K ₂ O	kg	-	-	-
Aplicação de torta e cinza	kg	6,00E+03	-	6,70E+02
Aplicação de inseticida	kg	3,00E-01 ^g	-	5,00E-02
Aplicação de nematicida	L	6,00E+00 ^h	-	1,00E+00
Aplicação de herbicida	L	1,20E+00 ⁱ	-	2,00E-01
Aplicação de herbicida	L	-	2,00E-01 ^j	1,00E-01
Aplicação de vinhaça ^l	m ³		1,97E+01 ^m /2,51E+01 ⁿ	
Produtividade do canavial	t	-	-	9,16E+01 ^o

Nota: a) Um ciclo de cana de seis anos, com a colheita de uma cana-planta seguida de quatro cana-soca. b) Valores médios por hectare total de um ciclo de seis anos. c) Roundup Ready (princípio ativo: glifosato – 65%). d) Usado para o preparo do solo para plantio e uma vez mais na cana soca. e) Ureia. f) TSP. g) Regent 800 WG. h) Furadan 100 G (princípio ativo: carbofuran – 10%). i) Combine 500 SC e Velpar K (princípio ativo: diuron – 49%). j) Plateau. l) Vinhaça concentrada (4%). m) 1ª geração. n) 1ª e 2ª geração. o) Produtividade da área colhida é 110 tc/ha.

Tabela 4.3 Parâmetros agrícolas para o cenário de produção de 1 ha de cana-de-açúcar nos cenários S2 e S4

Parâmetros	Unidade	Cana planta ^a	Cana soca ^a	Ciclo ^b
Área com plantio manual (semi-mecanizado)	%	-	-	-
Área com colheita manual	%	-	-	-
Área com queima pré-colheita	%	-	-	-
Palha enviada para a usina	%	5,00E+01	5,00E+01	5,00E+01
Área que recebe vinhaça	%	1,00E+02	1,00E+02	1,00E+02
Área que recebe torta e cinza	%	8,90E+01	-	1,51E+01
Aplicação de herbicida	L	4,00E+00 ^c	-	2,70E+00
Aplicação de calcário ^d	kg	3,50E+03	1,50E+03	8,33E+02
Aplicação de gesso ^d	kg	1,50E+03	1,50E+03	5,00E+02
Aplicação de N ^e	kg			
Área com torta e cinza		4,00E+01	1,32E+02	9,50E+01
Área sem torta e cinza		6,00E+01		
Aplicação de P ₂ O ₅ ^f	kg			
Área com torta e cinza		-		3,60E+00
Área sem torta e cinza		1,80E+02	-	
Aplicação de K ₂ O	kg	-	-	-
Aplicação de torta e cinza	kg(bs)	6,00E+03	-	6,70E+02
Aplicação de inseticida	kg	3,00E-01 ^g	-	5,00E-02
Aplicação de nematicida	L	6,00E+00 ^h	-	1,00E+00
Aplicação de herbicida	L	1,20E+00 ⁱ	-	2,00E-01
Aplicação de herbicida	L	-	2,00E-01 ^j	0,1,00E-01
Aplicação de vinhaça ^l	m ³	2,40E+01 ^m /3,05E+01 ⁿ		
Produtividade do canavial (t)	t	-	-	1,10E+02 ^o

Nota: a) Um ciclo de cana de seis anos, com a colheita de uma cana planta seguida de quatro cana soca. b) Valores médios por hectare total de um ciclo de seis anos. c) Roundup Ready (princípio ativo: glifosato – 65%). d) Usado para o preparo do solo para plantio e uma vez mais na cana soca. e) ureia. f) TSP. g) Regent 800 WG. h) Furadan 100 G (princípio ativo: carbofuran – 10%). i) Combine 500 SC e Velpar K (princípio ativo: diuron – 49%). j) Plateau. l) Vinhaça concentrada (4%). m) 1ª geração. n) 1ª2ª geração. o) produtividade da área colhida é 132tcana/ha.

Após a aplicação dos insumos agrícolas no solo, parte pode se perder na forma de emissão para o ar, para água e/ou para o solo. Este trabalho adotou, em alguns casos, valores padrões para a parcela do insumo aplicado que se perde na forma de emissão (fatores de emissão) e, em outros casos, dados de medições em solos cultivados com cana-de-açúcar.

Para o caso da aplicação de nitrogênio na forma de fertilizante mineral, o fator de emissão apresentado pelo IPCC (2006) foi adotado para o cálculo das emissões atmosféricas – 1,325% do nitrogênio aplicado é emitido na forma óxido nitroso (N_2O). Os resíduos da etapa de produção do etanol, como vinhaça, torta de filtro e cinzas dos lavadores de gases e das caldeiras de cogeração são, tradicionalmente, aproveitados como fertilizantes nos canaviais devido às suas concentrações de nutrientes. Outros resíduos, como a palha da cana que é mantida no canavial (quando da colheita sem queima prévia) e as raízes da cana (quando da reforma dos canaviais) possuem nutrientes que podem se perder na forma de emissões para o ambiente. Um desses nutrientes é o nitrogênio e, nesses casos, o IPCC (2006) sugere que 1,225% do conteúdo de nitrogênio nos resíduos são emitidos na forma de N_2O .

O fosfato aplicado como fertilizante mineral, ou contido nos resíduos aproveitados nos canaviais, também pode ser parcialmente perdido, na forma de lixiviação para a água. Para o caso de produção da cana no Brasil, essa emissão não é conhecida e especula-se que as condições do solo brasileiro (ácido) contribuem para que essa emissão seja praticamente nula. Assim, para o caso de referência, essas emissões são consideradas nulas neste trabalho. A análise de incerteza, no entanto, aborda essa emissão, conforme apresentado no item 4.3.4. Assim como para o caso das emissões de óxido nitroso devido à aplicação de fertilizantes nitrogenados, as emissões de fosfato dependem da concentração de fósforo nos resíduos aplicados nos canaviais. As concentrações de nutrientes, nitrogênio e fósforo, consideradas neste trabalho para cada um dos resíduos estão na Tabela 4.4 a seguir.

Tabela 4.4 Concentração de nutrientes nos resíduos aplicados como fertilizantes nos canaviais

Resíduo	Unidade	Valor
Torta de filtro	kgN/t(bs)	1,25E+01 ^a
Torta de filtro	kgP ₂ O ₅ /t(bs)	2,18E+01 ^a
Vinhaça – cenários S1 e S2	kgN/m ³	1,44E+00 ^b
Vinhaça – cenários S1 e S2	kP ₂ O ₅ /m ³	5,60E-01 ^b
Vinhaça – cenários S3 e S4	kgN/m ³	1,13E+00 ^b
Vinhaça – cenários S3 e S4	kP ₂ O ₅ /m ³	4,40E-01 ^b
Palha	kgN/t(bs) [*]	5,00E+00 ^c
Palha	kgP ₂ O ₅ /t(bs)	7,00E-01 ^a
Raízes	kgN/t(bs)	6,00E+00 ^d
Fuligem dos lavadores de gases	kgN/t(bs)	8,00E-03 ^e
Fuligem dos lavadores de gases	kgP ₂ O ₅ /t(bs)	3,60E-02
Cinzas das caldeiras	kgN/t(bs)	1,00E-04 ^e
Cinzas das caldeiras	kgP ₂ O ₅ /t(bs)	5,70E-03

Nota: ^{*} De acordo com Seabra et al. (2010), cada tonelada de cana (não queimada) contém 140kg de palha (bs).

Fontes: a) Macedo (2005). b) Baseado em Macedo (2005) e na concentração da vinhaça. c) Hassuani et al., 2005 *apud* Cavalett et al. (2012). d) Cavalett et al. (2012). e) Alterado de Copersucar (1995) considerando umidade de 50%.

Ainda com relação aos fertilizantes nitrogenados, este trabalho assume que 30% do nitrogênio se perdem na forma de emissão gasosa de amônia e 5% lixivia na forma de nitrato para as águas, conforme adotado Cavalett et al. (2012). Esses fatores de emissão foram estimados com base em medições em canaviais brasileiros. Além dessas emissões, o IPCC (2006) indica um fator de emissão de 0,2kgC/kg de ureia no solo e esse fator de emissão foi adotado para as estimativas de emissões neste trabalho.

Para o caso dos defensivos químicos, assim como Cavalett et al. (2012), este trabalho assume que 1,5% do princípio ativo dos defensivos químicos aplicado é emitido para água por escoamento. Esse dado é baseado em Renouf et al. (2010), que apresenta dados representativos das condições de produção da cana-de-açúcar na Austrália. Embora possa não ser representativo

das condições brasileiras, esse dado é usado neste trabalho devido à falta de dados que representem as condições brasileiras. O restante do princípio ativo dos defensivos químicos (98,5%) é assumido como emissão para o solo. As emissões calculadas com base nos conteúdos de nutrientes e nos fatores de emissões estão apresentadas na Tabela 4.5 a seguir.

Tabela 4.5 Emissões associadas ao uso de insumos agrícolas

Parâmetro	Unidade	Valores
Emissão de CO ₂ – aplicação de calcário dolomítico	kgCO ₂ /kg	4,80E-01
	kgN ₂ O/kg	2,08E-02
	kgNH ₃ /kg	3,64E-01
Emissões – aplicação de fertilizante nitrogenado	kgNH ₃ /kg	2,21E-01
	kgCO ₂ /kg	1,57E+00
Emissão (N ₂ O) da vinhaça (cenários S1 e S2)	kgN ₂ O/m ³	2,77E-02
Emissão (N ₂ O) da vinhaça (cenários S3 e S4)	kgN ₂ O/m ³	2,18E-02
Emissão (N ₂ O) – aplicação de torta de filtro	kgN ₂ O/kg(bs)	2,41E-04
Emissão (N ₂ O) da palha no campo	kgN ₂ O/t(bs)	9,63E-02
Emissão (N ₂ O) de raízes da cana no campo	kgN ₂ O/t(bs)	1,16E-01
Emissão (N ₂ O) de fuligem do lavador de gases	kgN ₂ O/t(bs)	1,54E-04
Emissão (N ₂ O) da fuligem da caldeira	kgN ₂ O/t(bs)	1,93E-06
Fator de emissão de defensivos agrícolas (água)	kg/kg	9,85E-01
Fator de emissão de defensivos agrícolas (solo)	kg/kg	1,5E-02

A demanda por diesel é um dos dados que o modelo CanaSoft provê a partir da informação dos parâmetros de entrada. O consumo de diesel para a produção de cana está discriminado, por operação agrícola, nas Tabelas 4.6 e 4.7 a seguir. Observa-se que a demanda por diesel por hectare é menor que a reportada por Macedo et al. (2008) – com base em um levantamento de dados junto ao Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), com uma amostragem de 40 usinas, os autores obtiveram valores variando de 68 a 285 l/ha na safra de 2005/2006 e assumiram a demanda de 230 l/há.ano. Macedo et al. (2004) reportam o consumo de diesel por operação agrícola e uma comparação entre o consumo de diesel adotado neste trabalho e o reportado por Macedo et al. (2004), por operação agrícola, encontra-se no Apêndice B. Embora Macedo et al.

(2004) reportam maior demanda por diesel do que adotado neste trabalho para algumas operações agrícolas, algumas das operações de maior consumo de diesel (como gradagens para preparo do solo e sucção, abubação e operação de cobrição no plantio manual) deixaram de existir nos cenários definidos neste trabalho. Ainda assim, o consumo de diesel reportado neste trabalho para os cenários com cultivo mínimo é maior que o reportado por Macedo et al. (2004). Diante disso, a demanda por diesel no canavial é um dos parâmetros observados na análise de incerteza, conforme apresentado no item 4.3.4.

Tabela 4.6 Consumo de diesel para produção de cana (1ha) nos cenários S1 e S3

Parametros	Unidade	Cana Planta^a	Cana Soca^a	Ciclo^b
Dessecação da soqueira antiga	L	3,80E-01	-	6,00E-02
Eliminador de soqueira	L	1,32E+01	-	2,20E+00
Calagem	L	5,88E+00	5,88E+00	1,96E+00
Gessagem	L	5,88E+00	5,88E+00	1,96E+00
Construção de carregadores	L	1,12E+01	-	1,86E+00
Manutenção de estradas	L	5,60E-01	5,60E-01	5,60E-01
Subsolagem	L	2,32E+01	-	3,87E+00
Gradagem niveladora	L	3,85E+00	-	6,40E-01
Aplicação da torta de filtro	L	9,40E+00	-	1,16E+00
Plantio mecanizado	L	1,50E+01	-	2,50E+00
Operação quebra lombo	L	1,00E+01	-	1,67E+00
Aplicação de herbicida	L	3,80E-01	3,80E-01	3,20E-01
Adubação da soqueira (tríplice operação)	L	-	1,28E+01	8,56E+00
Colheita mecanizada	L	8,31E+01	8,31E+01	6,92E+01
Transbordo	L	4,18E+01	4,18E+01	3,43E+01
Total	L	-	-	1,31E+02

Nota: a) Um ciclo de cana de seis anos, com a colheita de uma cana-planta seguida de quatro cana-soca. b) Valores médios por hectare total de um ciclo de seis anos.

Fonte: CTBE (2013)

Tabela 4.7 Consumo de diesel para produção de cana (1ha) nos cenários S2 e S4

Parâmetros	Unidade	Cana Planta^a	Cana Soca^a	Ciclo^b
Dessecação da soqueira antiga	L	3,80E-01	-	6,00E-02
Eliminador de soqueira	L	1,32E+01	-	2,20E+00
Calagem	L	5,88E+00	5,88E+00	1,96E+00
Gessagem	L	5,88E+00	5,88E+00	1,96E+00
Construção de carreadores	L	1,12E+01	-	1,86E+00
Manutenção de estradas	L	5,60E-01	5,60E-01	5,60E-01
Plantio mecanizado	L	1,50E+01	-	2,50E+00
Aplicação da torta de filtro	L	9,40E+00	-	1,05E+00
Aplicação de herbicida	L	3,80E-01	3,80E-01	3,20E-01
Adubação da soqueira (triplice operação)	L	-	1,28E+01	8,56E+00
Colheita mecanizada	L	2,74E+01	2,74E+01	2,28E+01
transbordo	L	3,70E+01	3,70E+01	3,08E+01
total	L	-	-	7,47E+01

Nota: a) Um ciclo de cana de seis anos, com a colheita de uma cana-planta seguida de quatro cana-soca. b) Valores médios por hectare total de um ciclo de seis anos.

Fonte: CTBE (2013)

Para o transporte da cana e palha, o caso de referência é baseado no raio de 22km entre o canavial e usina. Considerando a volta do caminhão vazio (com capacidade de carga maior que 32t) e a palha que é levada junto com a cana, o transporte foi estimado em 47,4 tkm.

Para o cenário S0, os dados de produção e de transporte da cana-de-açúcar adotados por Cavalett et al. (2012) foram adotados e replicados no software CMLCA para facilitar a análise dos resultados.

4.3.2 Dados da etapa industrial

Os dados para modelagem da etapa de produção do etanol foram obtidos através de simulações em AspenPlus. Essas simulações, realizadas por Junqueira (2013), representam o cenário industrial definido (conforme apresentado na seção anterior) e as tecnologias de pretratamento com explosão a vapor e hidrólise enzimática para a conversão da biomassa (palha e bagaço) em etanol. Essas tecnologias foram adotadas para alinhar esta análise às atuais simulações do processo industrial realizadas no CTBE, uma vez que este trabalho está inserido no Programa de Sustentabilidade do etanol, do CTBE (conforme apresentado no Capítulo 1).

Os parâmetros usados para a simulação em AspenPlus estão no Anexo A deste trabalho. Já os dados de rendimentos da usina, insumos e emissões, obtidos através das simulações em AspenPlus, são apresentados na Tabela 4.8 a seguir.

O uso de bens de capital (prédios e equipamentos), no entanto, foi estimado com base em Boddey et al. (2008), que apresentam uma estimativa para uma destilaria de etanol que processa 2 Mt de cana por ano. Os dados foram adaptados de acordo com a capacidade de processamento da usina em cada cenário. Para todos os casos, foi considerada que a usina de etanol tem vida útil de 30 anos.

Tabela 4.8. Insumos, produtos e emissões associados à etapa industrial do etanol

Item	Unidade	S1 e S2	S3 e S4
Produtos			
Etanol hidratado	kg	1,00E+00	1,00E+00
Elettricidade	kWh	2,60E+00	1,10E+00
Recursos			
Água	m ³	1,00E-02	2,00E-02
Materiais e combustíveis			
Cana-de-açúcar	kg	1,32E+01	1,04E+01
CaO	kg	8,00E-03	6,20E-03
H ₂ SO ₄	kg	5,90E-03	1,10E-02
Enzima	kg	-	1,00E-02
Aço (equipamentos)	kg	2,00E-03	1,00E-03
Edificações	m ²	2,1E-06	1,6E-06
Biomassa queimada na caldeira (bs)	kg	2,6E+00 ^a	1,7E+00 ^b
Emissões			
Etanol	kg	1,9E-03	1,8E-03

Notas: a) 34,8% palha e 65,2% bagaço.

b) 42,3% palha, 24,8% bagaço e 32,9% celulignina (PCI da celulignina = 10,6 MJ/kg(bs))

Emissões associadas à queima da biomassa (palha e bagaço da cana-de-açúcar) nas caldeiras foram estimadas com base nos fatores de emissão de caldeiras a bagaço (extraídos do modelo GREET (2012)) e na composição e PCI do material lignocelulósico. Os fatores de emissão da caldeira são apresentados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9. Emissões gasosas da queima de biomassa em caldeiras de cogeração

Gases	Unidade	Valores
NO _x	g/MJ	3,00E-03
N ₂ O	g/MJ	4,00E-03
VOC	g/MJ	5,00E-03
PM ₁₀	g/MJ	8,20E-02
PM _{2,5}	g/MJ	4,10E-02
CO	g/MJ	7,20E-02
CH ₄	g/MJ	3,00E-02

Fonte: GREET (2012)

Este trabalho considerou o processo de produção de enzima (celulase) necessária para o processo de hidrólise enzimática do material celulósico durante a produção do etanol de segunda-geração. Os dados de insumos e emissões para o ambiente referentes à produção de enzima (celulase) são apresentados na Tabela 4.10. Foi considerado que a fábrica de produção da enzima será anexa à usina de etanol de segunda geração. Assim, a etapa de transporte das enzimas foi desconsiderada.

Assim como para a produção e transporte da cana-de-açúcar, os dados de produção de etanol no cenário S0 foram obtidos de Cavalett et al. (2012). Duas alterações, no entanto, foram necessárias: correção das emissões associadas à queima do bagaço nas caldeiras de cogeração de eletricidade (os autores reportaram as emissões da caldeira com base na queima do bagaço em base úmida quando, na verdade, foram estimadas considerando a biomassa em base seca) e a alteração do poder calorífico inferior do etanol hidratado (os autores adotaram o PCI igual a 27,8MJ/kg de etanol hidratado e este trabalho adota o PCI igual a 24,8MJ/kg).

Tabela 4.10 Processo de produção da enzima celulase

Item		Unidade	Valores
Produto			
	Enzima celulase	kg	1,00E+00
Recursos			
	Água	kg	2,0E+01
Matérias/combustíveis ^a			
	Açúcar ^b	kg	4,20E+00
	Amônia	kg	1,40E-01
	Dióxido sulfúrico ^c	kg	1,20E-02
	Óleo de soja ^c	kg	1,60E-02
	Sulfato de amônio ^c	kg	2,80E-02
	Nitrato de potássio ^c	kg	4,00E-02
	Sulfato de magnésio ^c	kg	6,00E-03
	Cloreto de cálcio ^c	kg	8,00E-03
	Químicos inorgânicos ^c	kg	4,00E-03
	Gás Natural, queimado em turbina	MJ	5,21E+01
Emissões para o ar ^d			
	CO ₂	kg	4,09E+00
	SO ₂	kg	1,50E-02
	Eteno	kg	2,00E-03
Emissões para o solo ^d			
	Fosfato	kg	9,00E-03

Nota: a) processo baseado em Humbrid et al. (2011). b) o processo de produção de açúcar é baseado em Cavalett et al. (2011). Uma adaptação foi necessária: substituição do processo de produção da cana pelos processos de produção de cana definidos neste trabalho. c) processos representativos das condições europeias de produção (Ecoinvent, 2007a). d) emissões são baseadas em Hsu et al. (2010).

4.3.3 Dados de distribuição e uso

Parâmetros para a distribuição do etanol foram obtidos da literatura (SEABRA, 2008) – 340 km de distância entre a usina e o posto de abastecimento, sendo parte distribuída por caminhão (com capacidade de carga maior que 32t) e parte por duto. Arbitrariamente, neste trabalho foi considerado que 80% será por caminhão e 20% será por duto.

Embora não seja a realidade brasileira, neste trabalho foi considerado o uso da gasolina pura em veículos para que as emissões evitadas pelo uso de etanol hidratado (E100) pudessem ser avaliadas. As emissões associadas ao uso do etanol hidratado (E100) e ao uso da gasolina pura foram obtidas da literatura e são apresentados na Tabela 4.11 a seguir.

Os mesmos dados de emissões associadas ao uso do etanol hidratado foram adotados para o cenário S0, conforme Cavalett et al. (2012). A distância percorrida para a distribuição do etanol, no entanto, foi alterada considerando a mesma distância adotada para os cenários prospectivos.

Tabela 4.11 Emissões atmosféricas associadas ao uso de etanol hidratado e ao uso de gasolina pura

Emissão para o ar	Unidade	Etanol ^a	Gasolina ^b
monóxido de carbono	kg/MJ	2,60E-04	7,76E-04
óxido nitroso	kg/MJ	2,60E-06	2,31E-06
metano	kg/MJ	6,90E-06	3,08E-06
óxidos de nitrogênio	kg/MJ	1,76E-05	3,33E-05
dióxido de carbono, fóssil	kg/MJ	-	6,60E-02

Fonte: a) CETESB (2011) *apud* Cavalett et al. (2012); b) GREET (2012)

4.3.4 Análise das incertezas

Como as análises consideram condições projetadas baseadas em estimativas de especialistas, variações nas estimativas existem e, conseqüentemente, incertezas. Análise de contribuição foi, então, realizada como parte da etapa de interpretação para auxiliar a análise de incerteza. A análise de incerteza foi feita de acordo com o método Monte Carlo (MC), usando 2000 iterações. Os parâmetros considerados na análise de MC estão listados na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 Parâmetros para análise de incerteza dos impactos ambientais nos cenários prospectivos

Parâmetro	Distribuição	Unidade	Valores ^a
Fator de emissão de calcário dolomítico	Triangular	kgCO ₂ /kg	3,6E-01; 1,2E-01
Fator de emissão de N ₂ O ^b	Triangular	kgN ₂ O/kgN	5,0E-02; 5,0E-02
Fator de emissão de fósforo ^c	Triangular	kgP/kgP ₂ O ₅	4,0E-02; 4,0E-02
Fator de emissão para vinhaça (cenários S1 e S2) ^d	Triangular	kgN ₂ O/m ³	8,0E-02; 8,0E-02
	Triangular	kgP/m ³	8,0E-02; 8,0E-02
Fator de emissão para torta de filtro ^d	Triangular	kgN ₂ O/kg(bs)	6,7E-04; 6,1E-04
	Triangular	kgP/kg(bs)	9,0E-04; 9,0E-04
Fator de emissão para fuligem ^d	Triangular	kgN ₂ O/t(bs)	4,3E-04; 3,9E-04
	Triangular	kgP/t(bs)	1,5E-03; 1,5E-03
Fator de emissão para cinza (caldeira) ^d	Triangular	kgN ₂ O/t(bs)	5,3E-06; 4,9E-06
	Triangular	kgP/t(bs)	2,4E-04; 2,4E-04
Fator de emissão para palha no campo ^d	Triangular	kgN ₂ O/t(bs)	2,7E-01; 2,4E-01
		kgP/t(bs)	3,0E-02; 3,0E-02
Fator de emissão para vinhaça (cenários S3 e S4) ^d	Triangular	kgN ₂ O/m ³	6,0E-02; 6,0E-02
	Triangular	kgP/m ³	2,0E-02; 2,0E-02
Aplicação de glifosato	Triangular	kg/ha	3,1E-01; 3,5E-02
Aplicação de calcário dolomítico	Triangular	kg/ha	9,2E+02; 1,7E+02
Aplicação de carbofuran	Triangular	kg/ha	5,0E-02; 5,0E-02
Aplicação de diuron	Triangular	kg/ha	7,0E-02; 3,0E-02

Aplicação de ureia (cenários S1 e S3)	Triangular	kg/ha	8,1E+01; 1,6E+01
Aplicação de ureia (cenários S2 e S4)	Triangular	kg/ha	9,5E+01; 1,9E+01
Consumo de diesel (cenários S1 e S3)	Normal	kg/ha	1,11E+02; 2,2E+01
Consumo de diesel (cenários S2 e S4)	Normal	kg/ha	6,4E+01; 1,9E+01
Produtividade da cana (cenários S1 e S3)	Normal	tcana/ha	9,2E+01; 1,4E+01
Produtividade da cana (cenários S2 e S4)	Normal	tcana/ha	1,1E+02; 1,6E+01
Transporte da cana ^m	Normal	tkm/tcana	4,7E+01; 1,3E+01
Rendimento de etanol (cenários S1 e S2)	Normal	kg/tcana	7,5E+01; 4,00E+00
Rendimento de etanol (cenários S3 e S4)	Normal	kg/tcana	9,6E+01; 5,09E+00
Distância para dist. do etanol (duto)	Normal	tkm/kg	7,0E-02; 2,0E-02
Distância para dist. do etanol (caminhão)	Normal	tkm/kg	2,7E-01; 8,0E-02

Nota: a) Distribuição normal e lognormal (média; desvio padrão), triangular (média; amplitude). b) Baseado na faixa de incerteza apresentada pelo IPCC (2006), fatores de emissão apresentados por Crutzen et al. (2007 2 2008) e fator de emissão apresentado por Cherubini (2010). c) Emissões para a água, baseado em Renouf et al. (2005). d) O fator de emissão do N₂O é baseado na faixa de incerteza apresentada pelo IPCC (2006) e, o fator de emissão de P (para água) é baseado em Renouf et al. (2005).

4.4 Resultados e discussões

A comparação entre os impactos ambientais do etanol nos cenários prospectivos e os impactos ambientais do etanol no cenário atual (S0) indica que as melhorias consideradas para a definição dos cenários futuros poderiam contribuir para a redução dos impactos em todas as categorias analisadas. A exceção é para oxidação fotoquímica, que nos cenários S3 e S4 é maior devido ao uso da enzima necessária para o processo de hidrólise da biomassa. Um dos insumos necessários para a produção da enzima é o açúcar. Neste trabalho, foi considerada a produção de açúcar em uma usina de produção conjunta (etanol de primeira geração e açúcar) com cogeração de eletricidade excedente. A alocação entre produto e coprodutos, em base energética, foi realizada no final do processo e, assim, parte das emissões de etanol na destilação foi alocada ao açúcar. Essa abordagem é conservadora, já que durante o processo de produção de açúcar não há emissão de etanol, indicando que o impacto em oxidação fotoquímica está superestimado nos cenários S3 e S4. Excluindo essas emissões, o impacto em oxidação fotoquímica resultaria menor

que no cenário S0 (atual). Os resultados para cada cenário, assim como para a gasolina, são apresentados na Tabela 4.13 abaixo.

Tabela 4.13 Impactos ambientais do ciclo de vida do etanol e da gasolina (UF = 1 MJ)

Categorias de Impacto	S0	S1	S2	S3	S4	Gasolina	Unidade
Depleção abiótica (comb. fósseis)	1,99E-01	1,55E-01	1,37E-01	1,77E-01	1,60E-01	1,22E00	MJ
Aquecimento global	2,70E-02	1,96E-02	1,81E-02	2,00E-02	1,85E-02	8,26E-02	kg CO ₂ eq.
Toxicidade humana e ecotoxicidade	6,85E-03	4,55E-03	3,74E-03	4,56E-03	3,79E-03	3,02E-03	kg 1.4DBeq.
Oxidação fotoquímica	3,98E-05	3,39E-05	3,36E-05	4,28E-05	4,26E-05	2,96E-05	kg C ₂ H ₄ eq.
Acidificação	3,96E-04	3,08E-04	2,95E-04	3,05E-04	2,93E-04	1,05E-04	kg SO ₂ eq.
Eutrofização	9,50E-05	7,42E-05	7,11E-05	7,30E-5	7,01E-05	1,17E-05	kg PO ₄ ⁻⁻⁻ eq.

As principais razões para a melhoria do perfil ambiental nos cenários prospectivos em relação ao cenário atual são: i) a prática de cultivo da cana-de-açúcar, que implica em maior ou menor produtividade do canavial e demanda por diesel para as operações agrícolas; ii) o uso de fertilizantes minerais, uma vez que nos cenários prospectivos a concentração da vinhaça permite o seu uso em todo o canavial, reduzindo, assim, a demanda por fertilizantes minerais; iii) a demanda por defensivos químicos nos canaviais, que é a mesma em todos os cenários (conforme apresentado anteriormente, nas Tabelas 4.6 e 4.7, espera-se que não haverá aumento da demanda por defensivos químicos proporcionalmente ao aumento da produtividade. Maior controle biológico de pragas do que praticado atualmente é esperado para os cenários futuros); iv) produtividade de etanol, maior nos cenários prospectivos já que cana com maior ART foi considerada (16% de ART); v) coprodução de eletricidade excedente, que é menor no cenário atual (S0) pois não é considerado o uso da palha no sistema de cogeração de eletricidade. Os inventários do etanol em cada cenário estão tabelados no Apêndice C.

Comparando os resultados entre os cenários prospectivos, nota-se que os impactos ambientais dos cenários S2 e S4 são menores. Isso é devido ao uso da ETC associada à prática de plantio direto, o que indica que a implantação dessa tecnologia nos canaviais representaria uma boa alternativa para redução dos impactos ambientais na cadeia produtiva do etanol. O uso da ETC e a prática de plantio direto (cenários S2 e S4) confeririam maior produtividade de cana-de-açúcar (a produtividade é esperada ser maior do que no cenário com produção da cana com cultivo mínimo), um dos fatores que contribuem para que os impactos nesses cenários sejam menores que nos cenários S1 e S3.

Além disso, o menor uso de defensivos químicos por tonelada de cana, em comparação à produção convencional, justifica o menor impacto em toxicidade humana e ecotoxicidade (em água doce e no solo). A análise de contribuição indica que o carbofuran, usado como nematicida nos canaviais, é um parâmetro significativo para os impactos em toxicidade humana e aquática – com contribuição, no ciclo de vida do etanol nos cenários prospectivos, de 18% para o impacto em toxicidade humana e de 27% para o impacto em ecotoxicidade aquática. A emissão de diuron, associado à aplicação de diuron herbicida no canavial, tem contribuição em 16% para o impacto em toxicidade humana, 17% para o impacto em toxicidade aquática e 14-15% para o impacto em toxicidade. Isso indica a importância da substituição desses insumos por outros com melhores características ambientais para a redução dos impactos da produção do etanol no Brasil nessas categorias. O uso do carbofuran está proibido nos Estados Unidos, por exemplo (EPA, 2013).

A menor demanda por diesel nas atividades agrícolas é outro fator que justifica os melhores resultados dos cenários S2 e S4 em comparação aos cenários S1 e S3. A ETC tem menor consumo de diesel do que a colheitadeira convencional. Além disso, com o uso da ETC as operações de preparo do solo deixariam de existir (conforme indicado na Tabela 4.1) e, assim, haveria maior redução da demanda por diesel nos canaviais. A Figura 4.3 apresenta as operações necessárias para a produção da cana-de-açúcar nos cenários definidos, bem como a contribuição de cada operação para o total de diesel consumido no canavial.

No ciclo de vida do etanol nos cenários S2 e S4, a etapa agrícola é onde há a menor demanda por diesel, representando 22% do total consumido. Nos cenários S1 e S2, a demanda

por diesel no canavial é relativamente o mesmo que para as etapas de transporte da cana e distribuição do etanol (33-34%).

As emissões de dióxido de carbono devido ao uso de diesel no ciclo de vida do etanol é o que mais contribui para o impacto em aquecimento global. Ao todo, essas emissões representam 26% do impacto em aquecimento global do ciclo de vida do etanol no cenário S0 (sendo 13% associado ao transporte da cana e distribuição do etanol e 11% devido à operação das máquinas agrícolas). Nos cenários prospectivos essas emissões representariam 28% nos cenário S1, 26% nos cenários S2 e S3 e 25% no cenário S4 (sendo 19%, 21%, 18% e 20% associado ao transporte da cana e à distribuição do etanol nos cenários S1, S2, S3 e S4, respectivamente). As emissões de óxido nitroso (N_2O) associadas ao uso de fertilizantes nitrogenados representam 11% do impacto em aquecimento global, em todos os cenários.

Conforme exposto anteriormente (item 4.3.1) parte do nitrogênio dos fertilizantes minerais nitrogenados aplicados no solo se perdem como emissões para o ar e água. A emissão de amônia associada ao uso do fertilizante nitrogenado no canavial contribui entre 64-66% para o impacto do ciclo de vida do etanol (nos cenários prospectivos) em acidificação. A mesma emissão tem contribuição para o impacto em eutrofização, variando entre 58-60%.

Quanto à tecnologia de produção conjunta de etanol de primeira e segunda geração (cenários S2 e S4), observa-se, pela Tabela 4.13, que o cenário S3 é o menos favorável entre os cenários prospectivos, e o cenário S4 é menos favorável que o cenário S2, ou seja, os impactos ambientais são maiores. A exceção é para os impactos em acidificação e em eutrofização, que são menores nos cenários S3 e S4 do que, respectivamente, nos cenários S1 e S2 (em que há a tecnologia de produção de etanol de primeira geração apenas). Isso é devido às emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x), associadas à queima da biomassa nas caldeiras de cogeração de eletricidade. As emissões de NO_x têm impacto em acidificação e eutrofização e, portanto, os impactos nessas categorias são maiores nos cenários em que maior quantidade de biomassa é destinada à cogeração de eletricidade.

As emissões de NO_x associadas à queima de biomassa na caldeira também contribuem para os impactos em acidificação e eutrofização, representando 14-15% do impacto em acidificação e de 16% do impacto em eutrofização nos cenários S1 e S2. Para os cenários de produção conjunta (primeira e segunda geração – S3 e S4), a emissão de NO_x contribui em 10-11% para o impacto em acidificação e de 11-12% para o impacto em eutrofização. Nesse sentido, cabe mencionar que os fatores de emissão da caldeira foram obtidos da literatura e podem não representar a realidade do setor (embora sejam próximos aos limites estabelecidos pelo CONAMA¹⁵). No entanto, os limites de emissão das caldeiras podem ser alterados dentro do horizonte considerado nesta análise. A contribuição (acima de 1%) dos processos e emissões para o impacto em cada categoria avaliada para cada cenário estão tabeladas no Apêndice D.

Para as outras categorias de impacto, a maior geração de eletricidade excedente nos cenários S1 e S2 poderia justificar os resultados, uma vez que, devido à alocação, os usos de insumos e as emissões são menores para o etanol do que nos cenários S3 e S4, em que há menor geração de eletricidade excedente e, conseqüentemente, o etanol tem maior responsabilidade sobre o uso de insumos e emissões. Com base nisso e considerando que a quantidade de eletricidade excedente coproduzida em cada cenário poderia não alcançar os valores considerados neste trabalho e que pode não haver mercado para tal quantidade de eletricidade excedente, uma análise foi realizada para observar quão sensível os resultados são à quantidade de eletricidade excedente cogerada na usina. A análise, no entanto, não considera a remodelagem dos sistemas e das simulações, apenas a alteração da quantidade da eletricidade excedente (e emissões associadas) para 10% , 30% e 50% menor em referência à quantidade considerada neste trabalho. Os resultados são apresentados na Figura 4.4 a seguir.

¹⁵ O limite de emissão é de 350 mg/Nm³, em base seca a 8% de oxigênio, para uma caldeira queimando biomassa de cana-de-açúcar, com potência térmica nominal maior que 100 MW (CONAMA, 2011).

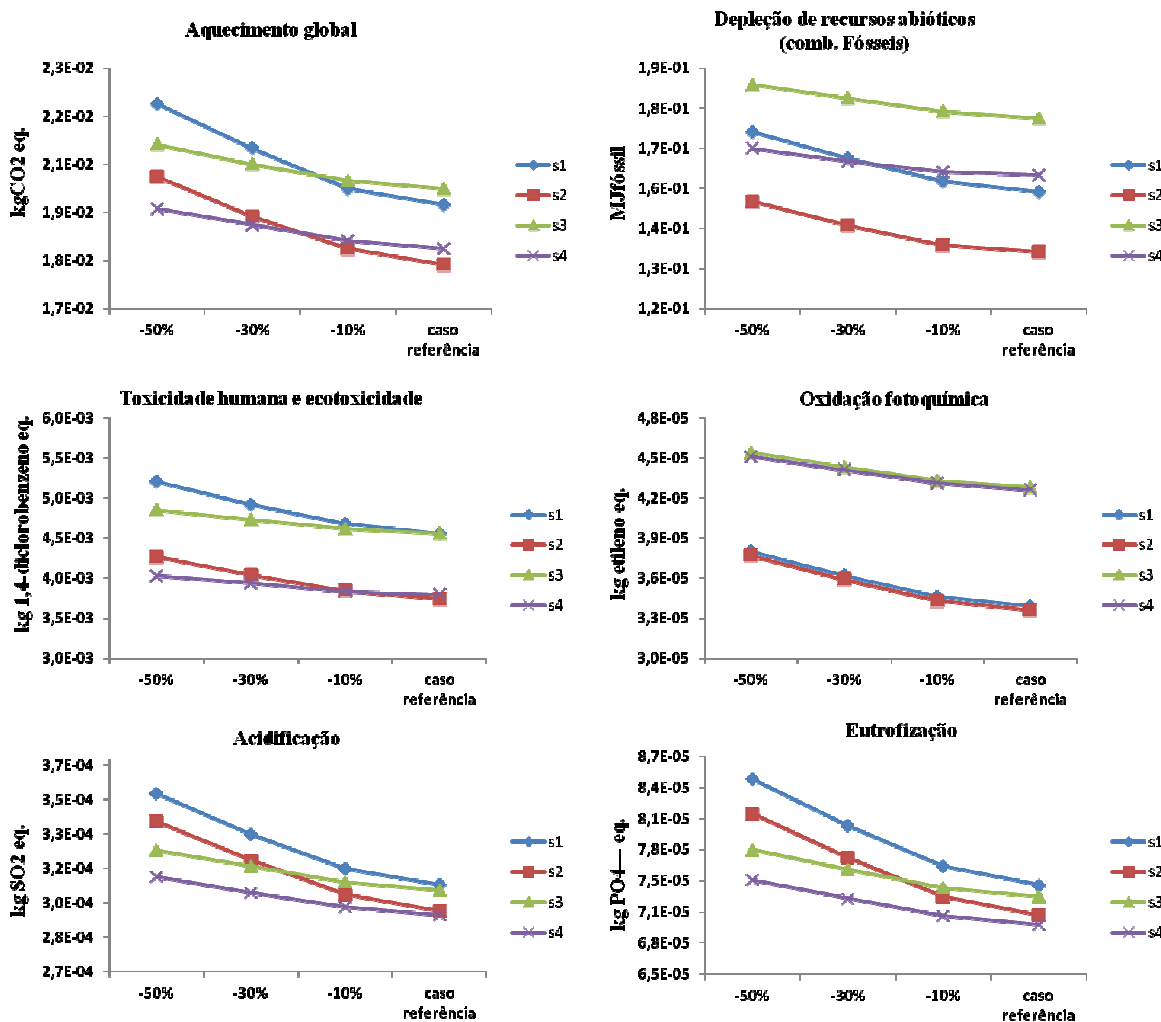


Figura 4.4 Análise de sensibilidade dos resultados quanto à geração de eletricidade excedente

Nota-se que resultados apresentados para o impacto em aquecimento global, toxicidade humana e ecotoxicidade (em água doce e no solo) são sensíveis à quantidade de eletricidade excedente cogerada na usina. Os cenários S3 e S4 passam a ter melhor perfil ambiental se a geração de eletricidade excedente fosse 30% e 50% menores do que o considerado.

Por outro lado, os resultados apresentados para depleção de recursos abióticos (combustíveis fósseis) e oxidação fotoquímica não são sensíveis à quantidade de eletricidade excedente cogerada. Isso porque, no caso de depleção abiótica, há maior demanda por ácido sulfúrico para a produção conjunta de etanol de primeira e segunda geração, e a enzima

necessária para a hidrólise da biomassa possui uma carga ambiental que contribui para o maior impacto em oxidação fotoquímica, conforme exposto anteriormente.

O impacto em oxidação fotoquímica está associado, principalmente, à emissão de etanol durante a etapa de produção do etanol (66% nos cenários S1 e S2 e 59% nos cenários S3 e S4) e à emissão de monóxido de carbono (CO) durante o uso do etanol em veículos (21% nos cenários S1 e S2 e 16% nos cenários S3 e S4).

Comparando os impactos do uso do etanol em cenários prospectivos aos do uso da gasolina (Tabela 4.13), observa-se que o uso do etanol, em todos os cenários, tem menor impacto em duas, depleção abiótica e aquecimento global. Nas demais categorias, a gasolina tem melhor perfil ambiental que o etanol. A Tabela 4.14 apresenta os impactos ambientais mitigados ou potencializados pela substituição de gasolina por etanol.

Tabela 4.14 Mitigação e aumento dos impactos ambientais quando do uso do etanol em substituição à gasolina

Categorias de Impacto	S0	S1	S2	S3	S4	Unidade
Depleção abiótica (comb. fósseis)	-83,7	-87,3	-88,8	-85,5	-86,9	%
Aquecimento global	-67,3	-76,3	-78,1	-75,8	-77,6	%
Toxicidade humana e ecotoxicidade	127,1	51,0	24,0	51,0	25,8	%
Oxidação fotoquímica	34,5	14,5	13,5	44,6	43,9	%
Acidificação	277,1	193,3	181,0	190,5	179,0	%
Eutrofização	712,0	534,2	507,7	523,9	499,1	%.

Cabe ressaltar que os impactos ambientais que seriam potencializados pelo uso do etanol em substituição à gasolina são locais. Nesse sentido, as usinas de etanol nos cenários prospectivos teriam produção menor que uma refinaria produzindo gasolina. A REPLAN, por exemplo, produziu 4,78E+06m³ de gasolina em 2011 (e a gasolina não é o produto mais importante), de acordo com a ANP (2012), enquanto as usinas de etanol nos cenários S3 e S4

possuem capacidade de produção de $4,87\text{E}+05\text{m}^3/\text{ano}$ e, nos cenários S1 e S2 a capacidade de produção é de $2,86\text{E}+05\text{m}^3/\text{ano}$.

As refinarias são grandes polos, com emissões centralizadas, enquanto as usinas de etanol estão dispersas, com capacidades de produção menores e, considerando a produção de uma usina e de uma refinaria, os impactos locais de uma refinaria produzindo gasolina seriam maiores do que de uma usina produzindo etanol. Os impactos em toxicidade humana e ecotoxicidade, acidificação e eutrofização estão majoritariamente relacionados à etapa de produção da cana (no caso do etanol) e, assim, estariam diluídos em muitos hectares de terra, enquanto os mesmos impactos associados à gasolina ficam concentrados nos locais onde as refinarias estão instaladas. O uso de carbofuran e diuron como defensivos agrícolas, por exemplo, é a principal causa dos impactos em toxicidade humana quando da opção etanol, mas acontece durante o cultivo da cana planta, ou seja, uma vez a cada seis anos na área onde ocorre o plantio da cana (que depois passa quatro anos sem receber esses insumos). Os impactos associados ao ciclo de vida da gasolina nessas categorias ocorrem anualmente. Um fator importante a ser observado é que as condições ambientais de cada meio pode influenciar a resposta às cargas ambientais recebidas e a técnica de ACV não abrange esse tipo análise.

Os resultados da análise dos impactos ambientais proporcionados através da substituição da gasolina e eletricidade de uma termoeletrica a gás natural pelos produtos de 1ha de cana-de-açúcar (etanol e eletricidade excedente) são apresentados na Figura 4.5 a seguir. Todos os cenários têm potencial para redução do aquecimento global e redução da depleção abiótica (combustíveis fósseis), mas o cenário S2 apresenta o melhor desempenho para essas duas categorias de impacto, seguido do cenário S4.

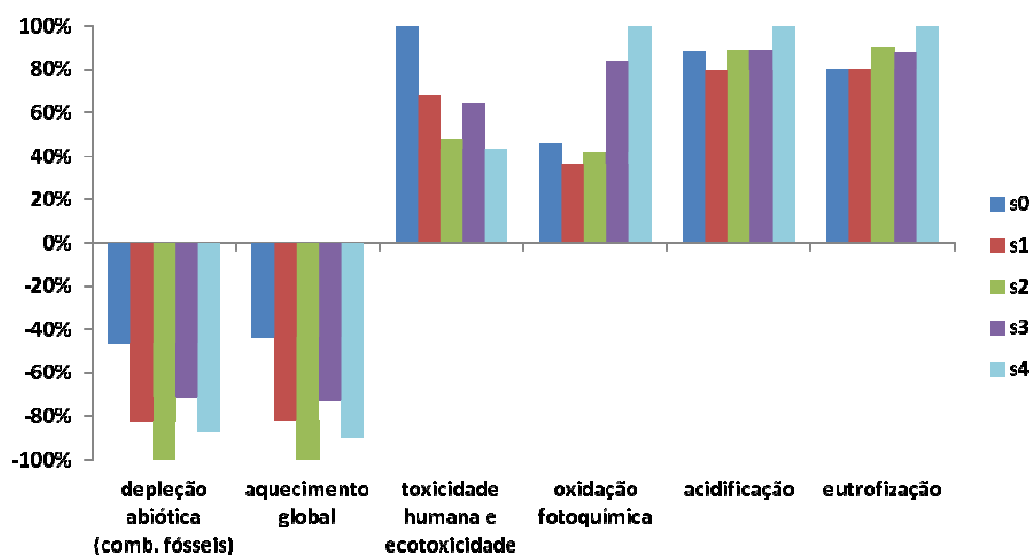


Figura 4.5 Impactos ambientais normalizados devido à produção e uso dos produtos de 1ha de cana em substituição à gasolina e energia elétrica

Para as demais categorias de impacto, não haveria benefício líquido decorrente do uso dos produtos da cana em substituição aos fósseis. O cenário S1 é aquele que implicaria em menores impactos em oxidação fotoquímica, acidificação e eutrofização. Por outro lado, este cenário tem menor potencial de mitigação de depleção abiótica (comb. fósseis) e aquecimento global do que os cenários S2 e S4.

Conforme mencionado anteriormente, os impactos em toxicidade humana e ecotoxicidade, oxidação fotoquímica, acidificação e eutrofização representam impactos em nível local. A ponderação dos impactos locais de acordo com a capacidade de produção da termoeletrônica e de produção de gasolina na refinaria, poderia alterar os resultados dos impactos em nível local, assim como dos resultados expressos por hectare de cana (produção de maior volume de etanol ou de maior quantidade de eletricidade).

A maior produção de eletricidade por termoeletrônicas acontece quando os reservatórios de água estão baixos em períodos em que as chuvas são menos frequentes (maio a julho) justamente o período de safra e maior produção das usinas. O gás natural é a principal matéria-prima em termoeletrônicas no Brasil. Considerando que a eletricidade excedente das usinas de etanol deslocaria eletricidade do mix da rede elétrica brasileira ou, em um caso mais extremo, a

eletricidade produzida em termoelétricas à carvão, uma análise de sensibilidade foi realizada. Os resultados são apresentados na Figura 4.6.

Nota-se que a resposta muda para as categorias de depleção abiótica (comb. fósseis) e aquecimento global. Se for considerado que a eletricidade excedente da usina de etanol desloca o mix de eletricidade da rede brasileira, os cenários S3 e S4 passariam a ser mais favoráveis que os cenários S1 e S2, respectivamente. O fato de os impactos associados ao deslocamento da eletricidade da rede serem menores que os impactos associados ao deslocamento da eletricidade gerada em termoelétrica a gás natural, somado a maior cogeração de eletricidade nos S1 e S2, justifica a mudança dos resultados.

Para as outras categorias de impacto, a resposta não muda com a variação da fonte de energia elétrica. No entanto, a substituição de eletricidade produzida em termoelétricas a carvão ou do mix de eletricidade da rede pode contribuir para a redução dos impactos em toxicidade humana, ecotoxicidade e oxidação fotoquímica. Os impactos em acidificação e eutrofização seriam maiores quando da substituição de eletricidade da rede. Para todas as categorias avaliadas, os impactos seriam menores quando da substituição de eletricidade produzida em termoelétricas a carvão (neste caso, potencializando os benefícios do etanol dos cenários S1 e S2 em comparação aos cenários S3 e S4).

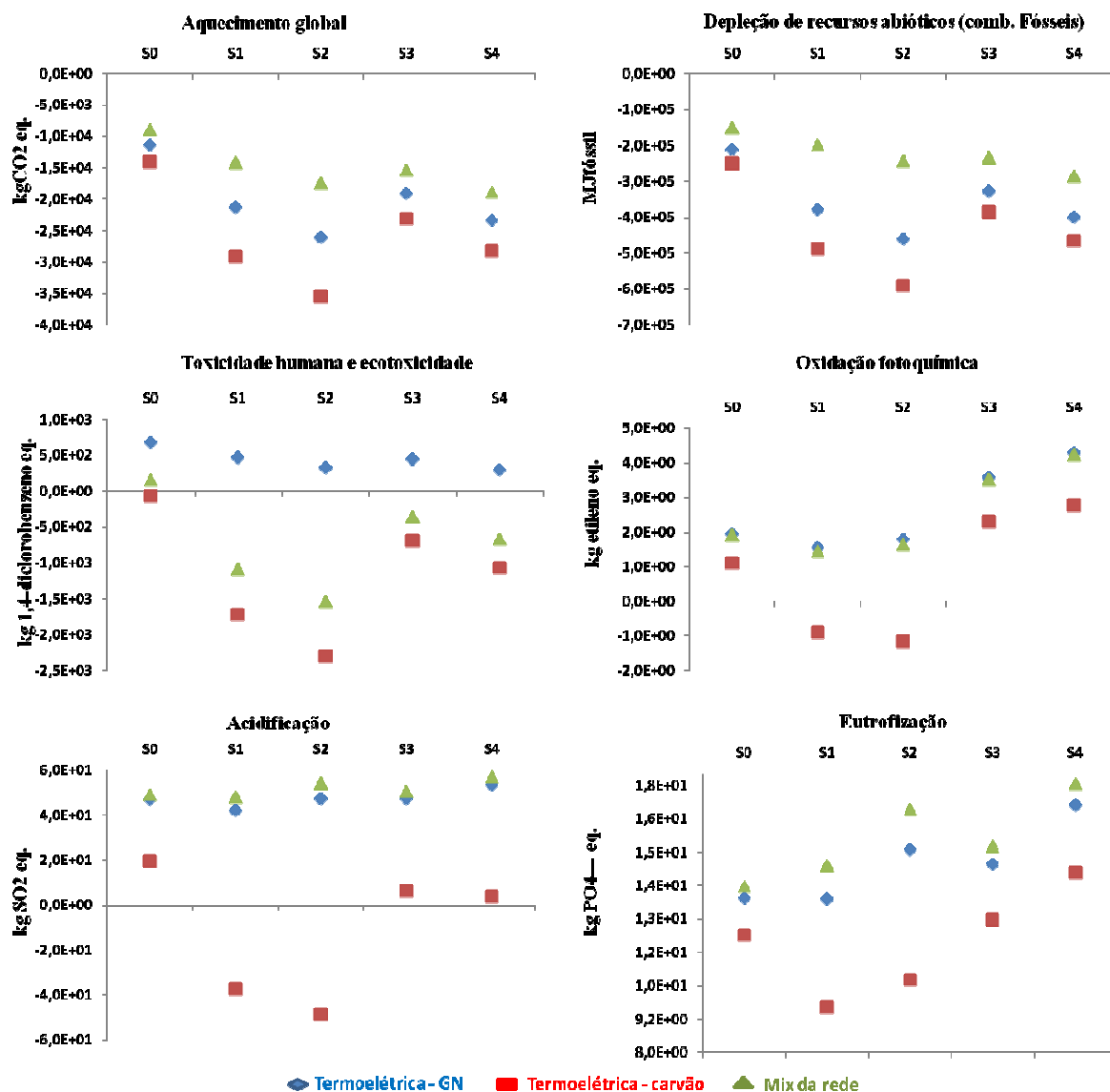


Figura 4.6 Análise de sensibilidade considerando substituição de eletricidade produzida a partir do carvão e do mix de eletricidade da rede

4.4.1 Análise de incerteza

Os resultados da análise de incerteza, apresentados na Figura 4.7, indicam que os resultados obtidos para o caso de referência não são precisos para a maioria das categorias de impacto ambiental avaliadas. A falta de precisão dos resultados obtidos para os impactos em aquecimento

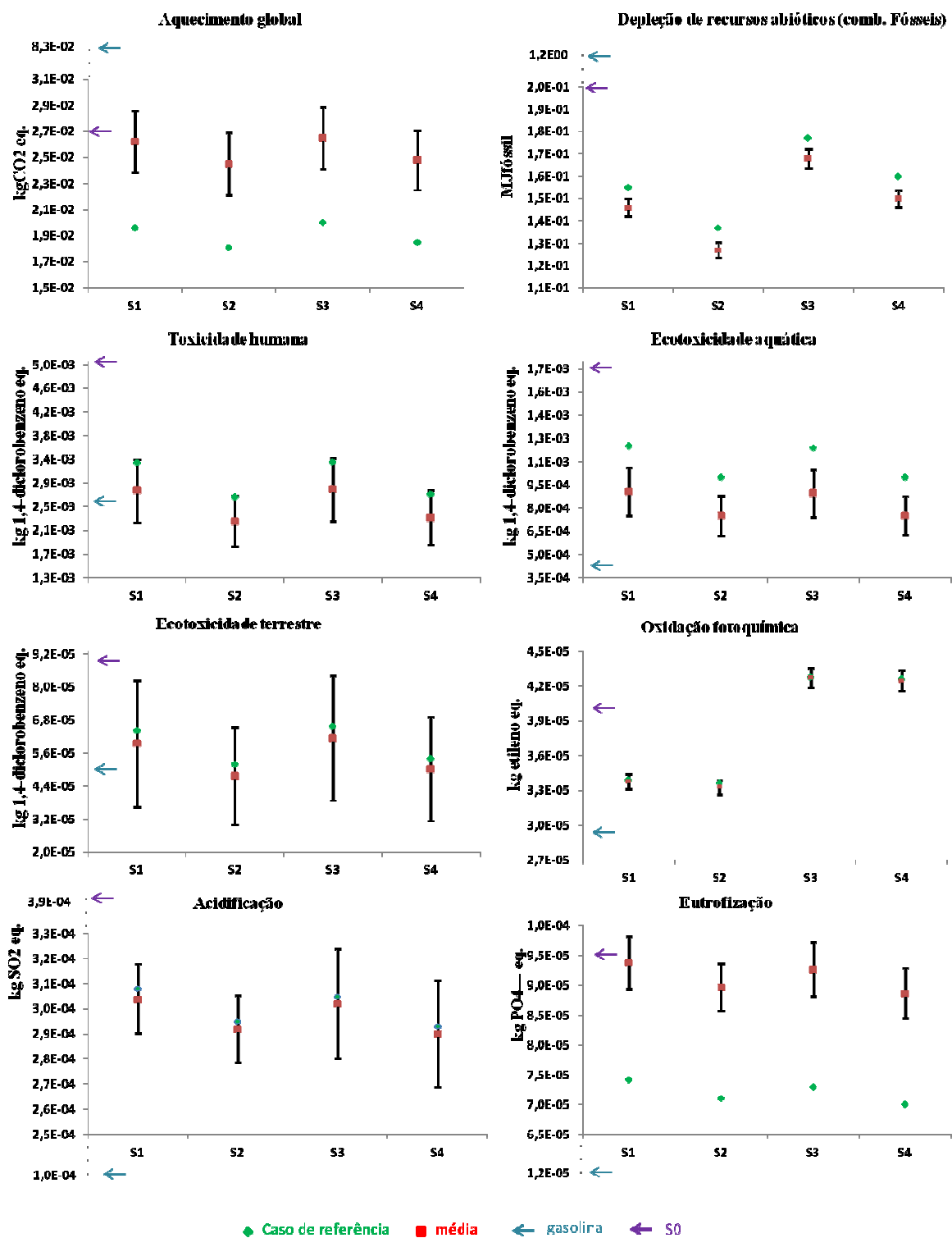
global e eutrofização está relacionada às emissões de óxido nitroso (N_2O) devido à ureia no campo. As emissões de N_2O têm impacto significativo em aquecimento global e para os casos referência o fator de emissão é menor que o fator de emissão médio adotado para a análise de incerteza. Além disso, as emissões de N_2O associadas ao uso de diesel na etapa de transporte de cana também impactam significativamente o aquecimento global e para os casos referência foi adotada menor distância percorrida pelo caminhão do que na análise de incerteza.

O resultado apresentado para o caso referência para depleção abiótica (combustíveis fósseis), toxicidade e ecotoxicidade e acidificação são maiores do que o valor médio da análise de incerteza. Para toxicidade e ecotoxicidade, as médias estão abaixo dos casos referência porque a análise de incerteza considera que o carbofuran deixaria de ser um insumo para a produção da cana. Além disso, haveria redução do uso de diuron. Os resultados para ecotoxicidade terrestre são menos dispersos porque a emissão de carbofuran tem relativamente pequena para essa categoria de impacto (5% em todos os cenários prospectivos) e a aplicação de diuron (cuja emissão de que tem contribuição maior – 15% em todos os cenários) tem pouca variação.

Os resultados para oxidação fotoquímica são os mais precisos da análise. Isso acontece porque as emissões de etanol durante a destilação do etanol são as que mais contribuem para o impacto nessa categoria (conforme apresentado anteriormente) e a análise de incerteza não considera variação dessas emissões nas usinas.

Cabe observar que a análise de incerteza é majoritariamente baseada em variações dos parâmetros associados ao cultivo e transporte da cana. As incertezas no processo produtivo do etanol e eletricidade não foram abordadas.

Considerando as incertezas, todos os cenários prospectivos teriam maior impacto em aquecimento global que o cenário S0 (atual). No entanto, todos os cenários continuariam com potencial de mitigação do impacto em aquecimento global quando comparado à gasolina.



Nota: as barras de erro representam dois desvios padrão (2 sigmas)

Figura 4.7 Análise de incerteza dos impactos ambientais do etanol em cenários prospectivos

5 Análise comparativa de diferentes biomassas para a produção de etanol de segunda geração

5.1 Introdução

Estudos de balanço energético e emissões de GEE do etanol derivado de diferentes matérias-primas e a análise do uso do etanol em substituição à gasolina têm sido extensivamente realizados, conforme apontado por Wang et al. (2012) e Luo et al. (2010). No entanto, comparações com o etanol produzido a partir do bagaço da cana-de-açúcar pela rota bioquímica, especialmente considerando as melhorias previstas para a produção da cana, não têm sido abordadas.

Neste contexto, uma análise comparativa de impactos ambientais potenciais de diferentes biomassas para a produção do etanol de segunda geração contribuiria para a indicação da vantagem relativa de cada biomassa com respeito a diferentes categorias de impacto ambiental. O objetivo deste capítulo foi comparar o perfil ambiental do etanol de segunda geração produzido a partir da conversão bioquímica de quatro opções de biomassa: resíduo de milho, palha de trigo, *switchgrass* (opções de interesse nos Estados Unidos) e resíduos da cana-de-açúcar (bagaço).

5.2 Definição e descrição dos sistemas de produto

Com exceção do *switchgrass*, as biomassas são resíduos de culturas destinadas à produção de alimentos e/ou etanol de primeira geração. O bagaço é resíduo do processamento da cana-de-açúcar nas usinas de primeira geração, podendo ser enviado para as caldeiras, para a geração de energia necessária à usina e produção de eletricidade excedente que é vendida para rede, ou para o processamento bioquímico para a produção do etanol de segunda geração. Os resíduos do milho

e a palha do trigo são mantidos no campo para proteção e melhorias das condições nutricionais do solo.

Para possibilitar a comparação entre as rotas de produção de etanol de segunda geração, a produção de etanol derivado do bagaço da cana-de-açúcar foi avaliada considerando que a usina de segunda geração é independente (não compartilha nenhum processo e/ou instalação com a usina de etanol de primeira geração). O sistema de produto do etanol de bagaço da cana foi definido considerando que parte do bagaço segue para a produção de vapor e eletricidade para suprimento da demanda da usina de primeira geração e para exportação para rede (embora a usina tenha sido modelada para a produção de etanol com coprodução de bagaço, ainda há cogeração de eletricidade excedente devido à produção de vapor necessário à usina) e parte é enviada para a usina de produção de etanol de segunda geração pela rota bioquímica (pré-tratamento com explosão a vapor e hidrólise enzimática).

As duas usinas (uma usina de etanol de primeira geração com maximização da coprodução de material lignocelulósico e uma usina de etanol de segunda geração a partir dos resíduos da cana) ficariam no mesmo local, o que exclui a etapa de transporte do bagaço.

O cenário de produção do etanol de segunda geração no Brasil é um cenário otimista, ou seja, assumiu-se que tecnologias avançadas e as melhores práticas estarão em uso. O sistema de produto está ilustrado na Figura 5.1.

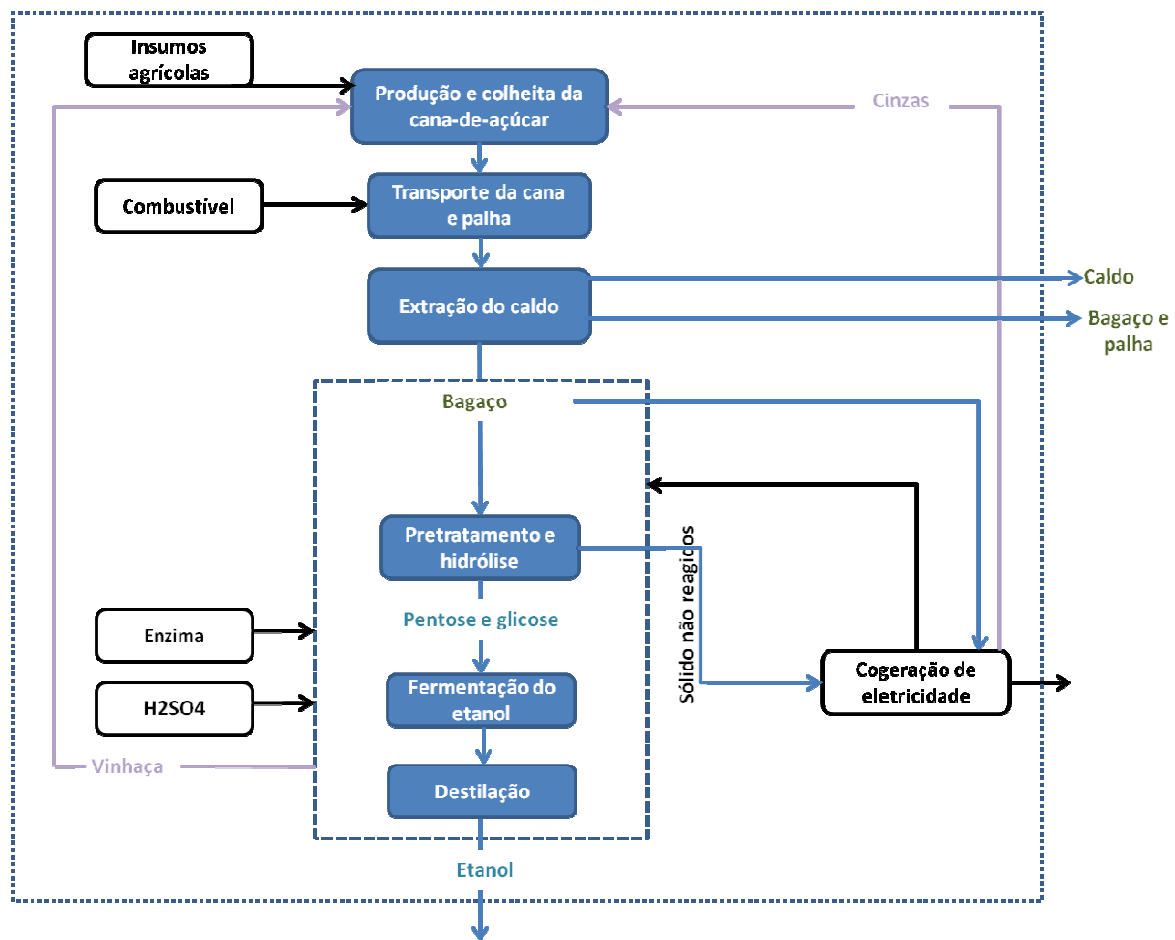


Figura 5.1 Sistema definido para o etanol derivado de bagaço da cana

No caso da palha de trigo e dos resíduos de milho em condições de produção nos Estados Unidos, Hsu et al. (2010) assumiram que 30% seriam retirados do campo para a produção de etanol. Para o caso dos resíduos da cana, este trabalho assume que 50% da palha seriam colhidas e transportadas com a cana para a usina.

Para o caso do etanol derivado do bagaço da cana, foram considerados o uso da ETC e a prática de plantio direto para etapa agrícola e o transporte da cana e palha (juntos) do canavial à usina por caminhão rodotrem. Embora os dados apresentados por Hsu et al. (2010) sejam referentes a um cenário futuro e levam em conta um aprendizado do setor nos Estados Unidos, a etapa agrícola não é baseada somente na prática de cultivo mínimo ou plantio direto, mas sim uma mistura de cultivo intensivo, mínimo e convencional.

A palha de trigo, resíduos do milho e *switchgrass* passam por um processo de secagem e limpeza antes de seguirem para o processamento – operações não existentes para o bagaço e palha da cana de açúcar – e são transportados separadamente para as usinas de etanol (no caso da palha de trigo e dos resíduos de milho). Assim, os sistemas de produto descritos na literatura são formados por duas etapas a mais do que o sistema de produto definido para o etanol de bagaço e palha numa destilaria independente.

A tecnologia de produção do etanol de segunda geração é a mesma para todas as biomassas: explosão a vapor e hidrólise enzimática. Os sólidos não reagidos e parte da biomassa seriam enviados para o sistema de cogeração de eletricidade para suprir a demanda da usina e gerar eletricidade excedente que seria vendida para a rede.

5.3 Metodologia e dados

A metodologia de avaliação do ciclo de vida foi usada para a comparação do etanol produzido a partir dos resíduos de milho, palha de trigo, *switchgrass* e bagaço da cana-de-açúcar. A análise é do campo ao portão da usina, excluindo, portanto, as etapas de distribuição e uso do etanol. A unidade funcional adotada para a comparação dos resultados é 1 kg de etanol anidro.

Oito categorias de impacto ambiental foram analisadas através do método CML (GUINÉE et al., 2002): depleção abiótica (combustíveis fósseis), aquecimento global, toxicidade humana, toxicidade terrestre, toxicidade aquática, oxidação fotoquímica, acidificação e eutrofização. O software para avaliação do ciclo de vida CMLCA (CMLCA, 2012) foi utilizado para desenvolver e conectar os processos. Assim, dados disponíveis na literatura de referência foram replicados no software CMLCA para facilitar a comparação e interpretação dos resultados.

5.3.1 Dados da etapa agrícola e transporte

Os dados da produção e transporte da cana-de-açúcar são os mesmos apresentados no Capítulo 4 para o cultivo de cana com a ETC. Os dados referentes à produção e transporte de resíduos do milho, palha de trigo e *switchgrass* foram obtidos da literatura – HSU et al., 2010¹⁶. Nos casos do etanol derivado de resíduos de milho e do etanol derivado da palha de trigo, os insumos e operações agrícolas necessárias foram alocados entre os alimentos e os resíduos com base no propósito do insumo e/ou operação. Hsu et al. (2010) consideram que a irrigação e o uso de pesticida, por exemplo, são necessárias para garantir a produção dos alimentos e, por isso, são alocados somente a esses. O fertilizante necessário para suprir os nutrientes que seriam fornecidos pelos resíduos, que atualmente são dispostos no solo, foi alocado para as biomassas. A produção de *switchgrass*, no entanto, é voltada somente para fins energéticos – para a produção do etanol de segunda geração, por exemplo – e, por isso nenhum método de alocação foi necessário nesse caso. De acordo com a análise apresentada pelos autores, outros métodos de alocação não afetaram as conclusões gerais do trabalho – que aborda balanço de emissões de GEE e balanço energético.

No caso do etanol derivado do bagaço da cana, a produção do bagaço acontece quando da extração do caldo da cana na usina de primeira geração – uma das primeiras etapas do processo de produção do etanol. Assim, os insumos para a produção dos resíduos da cana, apresentados na Tabela 5.1, foram calculados com base em alocação energética entre o açúcar contido no caldo da cana, o bagaço excedente e bagaço a ser queimado na caldeira de cogeração da usina de primeira geração autônoma. O uso de recursos e as emissões da usina de primeira geração foram considerados necessários somente para a produção do etanol de primeira geração. Desde modo, 47% de todos os insumos e emissões associadas à produção da cana (com uso da ETC e plantio

¹⁶ Apesar de Luo et al. (2010) também apresentarem análise comparativa do etanol de segunda-geração derivado de diferentes biomassas, os dados referentes a etapa agrícola não foram extrapolados para representarem cenários futuros, como feito em Hsu et al. (2010). Considerando que os dados da produção da cana (e, consequentemente, bagaço e palha) são referentes a um cenário futuro, optou-se por utilizar o estudo de Hsu et al. (2010) como referência para coleta de dados necessários para este trabalho.

direto) e ao transporte da cana e palha do canavial à usina foram alocados para ao bagaço da cana enviado para a usina de segunda geração independente (ou seja, sem a produção conjunta com o etanol de primeira geração).

Hsu et al. (2010) consideraram que os resíduos do milho podem ser usados para a produção de ração animal em vez de produção de etanol e, por isso, expandiram o sistema de produção de etanol de resíduos de milho para abranger a produção de ração animal que deixaria de ser produzida. Neste trabalho, no entanto, não foi assumida a expansão do sistema de produção do etanol de milho para incluir a produção de ração animal. A Tabela 5.1 apresenta uma comparação dos principais insumos agrícolas e produtividade das biomassas.

Tabela 5.1 Insumos agrícolas e produtividade das biomassas para produção de etanol

Parâmetros	Unidade	Resíduos do milho ¹	Palha de trigo ¹	<i>Switchgrass</i> ¹	Resíduos da cana
Produtividade da biomassa	Kg/ha	3,29E+03 ^a	9,70E+02 ^a	1,48E+04 ^a	1,43E+04 ^b
Nitrogênio (N)	kg/ha	3,34E+01	7,10E+00	1,30E+02	4,46E+01
Potássio (K ₂ O)	kg/ha	4,94E+01	1,22E+01	1,22E+02	-
Fósforo (P ₂ O ₅)	kg/ha	3,30E+00	7,00E-01	1,04E+01	1,62E+00
Defensivos	kg/ha	-	-	5,00E-01 ^c	4,30E-01 ^d
Calcário	kg/ha	-	-	-	3,92E+02
diesel	kg/ha	2,04E+01	1,45E+01	1,00E+02	2,99E+01

Notas: a) biomassa colhida, base úmida (34% de umidade). b) biomassa na usina, base seca (com base no teor de fibras da cana – 13%). c) pesticidas não especificados. d) 47% glifosato (herbicida); 11% diuron (herbicida), 11% carbofuran (nematicida) e 31% outros defensivos (inseticidas, pesticidas e herbicidas) não especificados.

Fonte: 1) baseado em Hsu et al. (2010).

Os mesmos dados de transporte da cana do canavial à usina considerados na análise do Capítulo 4 foram adotados considerando, no entanto, que 47% estão associados ao transporte do bagaço (ou seja, 22,29 t.km/t de bagaço). Conforme apresentado anteriormente, as outras biomassas não são enviadas do campo diretamente para a usina. Do campo ao local para

preprocessamento (secagem da biomassa), 0,9 tkm está associado ao transporte por tratores e 18,20 tkm está associado ao transporte por caminhões com capacidade maior que 32 toneladas. Do local de preprocessamento à usina de etanol, as biomassas são transportadas por navio, trem e caminhão – 11,3tkm/t por navio, 200tkm/t por trem e 32,2tkm/t por caminhão.

5.3.2 Dados da etapa industrial

Os dados da produção de etanol de cana foram gerados através da simulação em AspenPlus, realizadas por Junqueira (2013), considerando uma usina independente de produção de etanol de segunda geração e as mesmas melhorias tecnológicas propostas para o setor sucroalcooleiro (descritas no seção 4.2 do Capítulo 4). Os parâmetros adotados para a simulação em AspenPlus estão no Anexo A. Como Hsu et al (2010) assumiram rendimentos diferentes dos obtidos por simulação para o caso do etanol de resíduos da cana, optou-se por padronizar o processo industrial para todas as biomassas. Para isso, os mesmos parâmetros para a simulação da produção do etanol de resíduos da cana-de-açúcar em AspenPlus foram adotados para as outras biomassas. Essa abordagem desconsidera a diferença da composição das biomassas (hemicelulose, celulose e lignina). Os dados de insumo, produto e emissões da etapa industrial, obtidos através das simulações, são apresentados na Tabela 5.2 a seguir.

As emissões da queima do material lignocelulósico na caldeira foram calculadas com base nos fatores de emissão (ver Tabela 4.5 do Capítulo anterior) apresentados no modelo GREET (2012), composição do material lignocelulósico (mesma para todas as biomassas) e o PCI (estimado com base na composição do mesmo).

Tabela 5.2 Insumos, produtos e emissões associados à etapa industrial do etanol

Item	Unidade	2G ^a
Produtos		
Etanol hidratado	kg	1,00E+00
Material lignocelulósico(bs)	kg	-
Elettricidade	kWh/kg etanol	2,00E+00
Recursos		
Água	m ³ /kg etanol	4,00E-02
Materiais e combustíveis		
Cana-de-açúcar	kg/kg etanol	-
Material lignocelulósico(bs)	kg(bs)/kg etanol	5,50E+00
CaO	kg/kg etanol	-
H ₂ SO ₄	kg/kg etanol	2,93E-02
Enzima	kg/kg etanol	4,00E-02
Biomassa queimada na caldeira (bs)	kg/kg etanol	3,7E00 ^b
Emissões		
Etanol	kg/kg etanol	1,9E-03
Monóxido de carbono ^c	kg/kg	3,15E-03
Óxidos de nitrogênio ^c	kg/kg	3,13E-03
Material Particulado PM10 ^c	kg/kg	3,55E-03
Material Particulado PM2,5 ^c	kg/kg	1,77E-03
Metano ^c	kg/kg	1,30E-03
Óxido nitroso ^c	kg/kg	1,73E-04

Notas: a) mesmos dados foram assumidos para a conversão das outras biomassas em etanol. b) 25% bagaço e 75% celulignina (PCI da celulignina = 10,6 MJ/kg(bs)). e) emissões associadas à queima da biomassa na caldeira de cogeração de eletricidade, baseado em GREET, 2012.

Considerando que o método de alocação é um dos fatores a serem observados quando do uso da ACV para análises comparativas, as alocações entre produtos e coprodutos da usina de etanol de segunda geração foram padronizadas neste trabalho, ou seja, para todos os processos a alocação em base energética foi adotada.

Após o pré-tratamento (explosão a vapor), a biomassa segue para a hidrólise enzimática. O processo de produção de enzima celulase, empregada em todas as rotas de produção do etanol avaliadas neste trabalho, foi considerado. Conforme apresentado no Capítulo 4, devido à forma como os dados para a produção de enzima está disponível na literatura, um processo de produção de celulase foi criado unindo dados adotados por Hsu et al. (2010) e Humbird et al. (2011). Esse novo processo de produção de celulase é considerado conservador uma vez que, pela falta de informação disponível, emissões podem ter sido duplamente quantificadas. Foi considerado que a fábrica de produção da enzima será anexa à usina de etanol de segunda geração. Assim, a etapa de transporte das enzimas foi desconsiderada.

A base de dados Ecoinvent foi utilizada como referência quando da não disponibilidade de dados. Os inventários do ciclo de vida do etanol derivado de cada biomassa (não considerando os sistemas de produto dos insumos necessários) estão disponíveis no Apêndice F.

5.3.3 Análise de incerteza

A análise de incerteza foi realizada considerando parâmetros com maior contribuição para os impactos ambientais. Para o caso do etanol das outras biomassas, os parâmetros para análise de incerteza foram obtidos de Hsu et al. (2010). Cabe ressaltar, no entanto, que nos casos de distribuição triangular os autores apresentam os valores “mais provável, mínimo e máximo” e o software CMLCA trabalha a distribuição triangular considerando um triângulo isóscele, e os dados de entrada são média e amplitude. Assim, foi necessário ajustar os dados da literatura ao software.

Além disso, a produtividade das biomassas (resíduos de milho e palha de trigo) por ha dependem da produtividade da cultura (milho e trigo/ha) e da taxa de remoção dos resíduos do campo (kg/kg da cultura). Neste caso, os dois parâmetros com suas respectivas variações e

distribuições foram combinados, com o uso do modelo Crystal Ball¹⁷, para ajustar a distribuição para a produtividade das biomassas. Os parâmetros de entrada para a análise de incerteza associada à produção das biomassas são apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 Parâmetros para análise de incerteza do etanol de produção independente

Parâmetro	Distribuição	Unidade	Valores ^a
N fertilizante (res. milho)	Triangular	kgN/kg res. colhido	2,00E-02; 2,00E-02
K fertilizante (<i>switchgrass</i>)	Triangular	kg K/ha plantado	1,01E+02; 9,95E+01
N fertilizante (<i>switchgrass</i>)	Triangular	kgN/ha plantado	2,01E+02; 2,00E+02
Produtividade palha de trigo	Lognormal	kg/ha	1,73E+03; 5,00E-01
Fator de emissão N ₂ O	Triangular	kgN ₂ O/kg N aplicado	2,20E-01; 1,80E-02
Produtividade de res. milho	Lognormal	kg/ha colhido	5,51E+03; 4,00E-01
Produtividade <i>switchgrass</i>	Triangular	kg/ha colhido	1,45E04; 1,05E04
Irrigação (<i>switchgrass</i>)	Triangular	ha/ha	5,00E-01; 5,00E-01
Produtividade do etanol	normal	kgEtOH/kg(bs)	1,80E-01; 5,30E-02

Nota: a) Distribuição lognormal (média; desvio padrão), triangular (média; amplitude).

Fonte: baseado em Hsu et al. (2010)

Para o caso do etanol dos resíduos da cana, foram adotados os mesmos parâmetros, distribuições e variações para a produção e transporte da cana e palha, apresentados na Tabela 4.12 no Capítulo 4.

5.4 Resultados e discussões

A Figura 5.2 ilustra a comparação dos impactos ambientais (normalizados) das diferentes rotas de produção de etanol avaliadas neste trabalho. Os resultados não normalizados estão disponíveis no Apêndice E.

¹⁷ Detalhes sobre o modelo podem ser encontrados em: <http://www.oracle.com/br/products/applications/crystalball/overview/index.html>

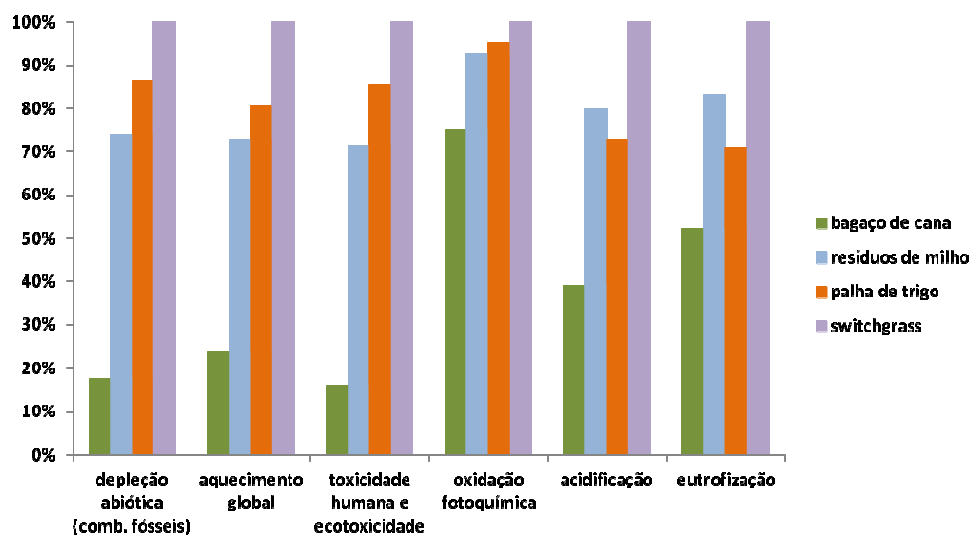


Figura 5.2 Comparação dos impactos ambientais potenciais das diferentes rotas de produção do etanol de segunda geração

Os impactos ambientais do etanol derivado do bagaço da cana são menores que os das outras rotas avaliadas. O fato de as outras biomassas (resíduos de milho, palha de trigo e switchgrass) passarem pela etapa de secagem contribui para o maior impacto ambiental do etanol derivado dessas biomassas. O processo de secagem demanda energia da rede que, nos Estados Unidos (onde os processos ocorreriam), é produzida majoritariamente a partir de fontes fósseis (a base de dados do Ecoinvent considera que eletricidade provida por termoelétricas à carvão representa 47% do total produzido nos EUA).

Uma vez que este trabalho considera o mesmo processo de produção do etanol de segunda geração e os mesmos rendimentos, a diferença entre os resultados está relacionada às etapas agrícola, de transporte da biomassa e de secagem. Nesse sentido, o método adotado para a alocação entre produto e coproduto (resíduos) na etapa agrícola tem influência nos resultados apresentados. O switchgrass tem desvantagem em relação às outras biomassas porque não é um resíduo agrícola e, assim, todas as operações agrícolas são alocadas para o seu cultivo. Além disso, o processo de secagem do switchgrass teria maior demanda por energia.

Para os resíduos de milho e a palha de trigo, no entanto, somente a operação de colheita é alocada entre produto (milho ou trigo) e coproduto (resíduos). O uso da colheitadeira por hectare é o mesmo para os resíduos de milho e para a palha de trigo, no entanto, a produtividade da palha de trigo é menor, o que contribui para que os impactos ambientais do etanol de palha de trigo sejam menores do que do etanol de resíduos de milho em algumas categorias de impacto.

A análise de contribuição indica que as emissões associadas ao uso da colheitadeira (emissões da queima do diesel) representam 4% do impacto do etanol de resíduos de milho em aquecimento global (emissões de CO₂), 4% do impacto em eutrofização (emissões de NO_x) e 3% do impacto em acidificação (emissões de NO_x). No caso do etanol derivado da palha de trigo o uso da colheitadeira representa 13% do impacto em aquecimento global, 16% do impacto em eutrofização e 11% do impacto em acidificação. Nota-se, no entanto, que os impactos do etanol derivado da palha do trigo em acidificação e eutrofização são menores que do etanol derivado dos resíduos de milho. Isso acontece devido à emissão de amônia, que representa 30% do impacto do etanol derivado da palha de trigo em eutrofização e 24% em acidificação, enquanto representa 48% e 41% do impacto do etanol derivado dos resíduos de milho em eutrofização e acidificação, respectivamente.

A emissão de amônia está associada ao uso de fertilizantes nitrogenados, Hsu et al. (2010) não apresentam o fator de emissão de amônia adotado para cada caso, no entanto, sabe-se que a aplicação de amônia fertilizante é maior no caso dos resíduos de milho do que para a palha de trigo. A emissão de amônia, associado ao uso de fertilizantes nitrogenados, é o que mais contribui para os impactos do etanol derivado de bagaço da cana e de switchgrass em acidificação e eutrofização.

O impacto do etanol derivado dos resíduos de milho, palha de trigo e switchgrass em aquecimento global está relacionado majoritariamente à emissão de óxido nitroso quando do uso de fertilizantes nitrogenados (12%, 6% e 10% respectivamente). No caso do etanol derivado do bagaço da cana, essa é uma emissão significativa – representando 11% do impacto em aquecimento global. No entanto, menos significativa que as emissões de dióxido de carbono associadas à queima do gás natural para geração de energia térmica necessária para a produção

das enzimas (18% do impacto em aquecimento global). A mesma emissão ocorre quando da produção do etanol derivado das outras biomassas (uma vez que este trabalho considera o mesmo processo de produção de etanol), porém, a emissão de óxido nitroso (quando do uso de fertilizantes nitrogenados) é mais significativa.

As emissões associadas aos processos de produção dos insumos (como bens de capitais: máquinas, equipamentos e prédios) e as emissões associadas à produção de eletricidade (no caso das outras biomassas) representam a maior parte dos impactos em toxicidade humana e ecotoxicidade (em água doce e terrestre) e contribui para a diferença dos resultados apresentados para o etanol derivado das outras biomassas. No caso do etanol derivado do bagaço da cana, as emissões de diuron e carbofuran (defensivos agrícolas) também têm contribuição significativa.

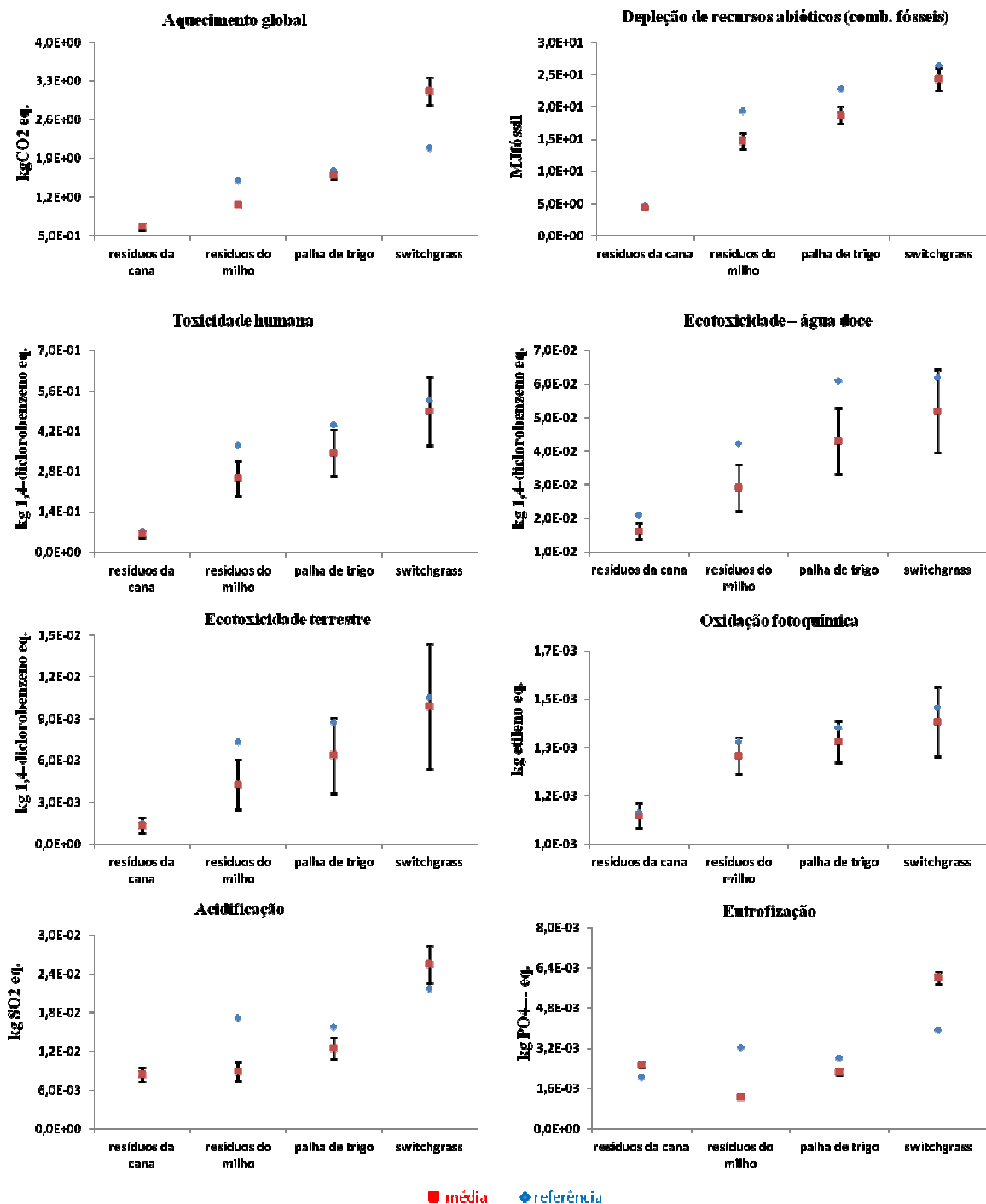
Conforme exposto no capítulo anterior, os impactos em oxidação fotoquímica estão majoritariamente relacionados às emissões de etanol durante a etapa de destilação do etanol. Os processos e emissões que mais contribuem para o impacto em cada categoria avaliada estão disponíveis no Apêndice G.

5.4.1 Análise de incerteza

Conforme apresentado na Figura 5.3, a análise indica que os resultados para o etanol derivado de *switchgrass* são os mais imprecisos comparados ao etanol derivado de resíduos de milho e de palha de trigo, com excessão dos impactos em aquecimento global e eutrofização. A dispersão dos resultados apresentados para os impactos do etanol derivado de *switchgrass* em aquecimento global e eutrofização é devido ao uso de fertilizante nitrogenado – a demanda por fertilizante nitrogenado no caso referência para *switchgrass* é menor que a demanda média adotada para análise de incerteza. Os dados adotados para os casos referências do etanol derivado de resíduo de milho, de palha de trigo e de *switchgrass* não representam cenários otimistas, como no caso do etanol derivado do bagaço da cana-de-açúcar. Nesse sentido, cabe destacar que a

análise de incerteza dos resultados obtidos para o etanol das outras biomassas foi baseada na variação dos parâmetros mais significativos e, no entanto, os resultados obtidos por Hsu et al. (2010) para a análise de incerteza dos impactos em aquecimento global e depleção abiótica (comb. fósseis), em comparação aos casos referências, não foram replicados neste trabalho através do uso do software CMLCA.

Para o etanol derivado do bagaço da cana, as incertezas associadas aos resultados são as mesmas apresentadas no Capítulo 4, com base no desvio padrão percentual. Para acidificação e eutrofização, as incertezas associadas aos resultados não permite saber qual opção de biomassa, entre bagaço de cana, resíduos de milho e palha de trigo, conferiria o menor impacto ambiental no ciclo de vida do etanol. Para aquecimento global e depleção abiótica (comb. fósseis), as incertezas dos resultados não alteram as conclusões quanto à opção com menor potencial de impacto nas categorias avaliadas.



Nota: As barras de erro representam dois desvios padrão (2 sigmas)

Figura 5.3 Análise de incerteza dos impactos ambientais do etanol com produção independente, tecnologia 2G, a partir de diferentes biomassas

6 Conclusões e sugestões para próximos trabalhos

6.1 Conclusões

A hipótese de que as tecnologias em desenvolvimento contribuiriam para o aprimoramento do perfil ambiental do etanol derivado da cana-de-açúcar no Brasil foi aceita através dos resultados obtidos para as categorias de impacto avaliadas neste trabalho. Tendo como referência um cenário que representa boas condições de produção de etanol de cana-de-açúcar atualmente (cenário S0), todos os cenários prospectivos avaliados neste trabalho (alternando o uso da ETC e prática de plantio direto com a produção de etanol de primeira geração e produção conjunta de etanol de primeira e segunda geração) contribuiriam para a redução dos impactos ambientais no ciclo de vida do etanol produzido no Brasil.

A comparação dos impactos ambientais do ciclo de vida etanol derivado da cana-de-açúcar em cenários prospectivos indicou que a inserção da tecnologia para menor compactação do solo durante a colheita (ETC) e com plantio direto da cana de açúcar, em conjunto com a produção de etanol de primeira geração somente (cenário S2) confere ao etanol o melhor perfil ambiental. O uso da ETC e a prática de plantio direto contribuiriam para a redução dos impactos ambientais (em comparação ao cenário S0 e ao cenário em que haveria cultivo mínimo da cana-de-açúcar – cenários S1 e S3) porque maior produtividade agrícola e menor consumo de diesel são esperados nesse caso. Além disso, este trabalho assumiu que não haveria aumento da demanda por defensivos químicos para a produção da cana nos cenários futuros em comparação ao cenário atual.

A inserção da tecnologia de produção do etanol de segunda geração (explosão a vapor e hidrólise enzimática), por outro lado, beneficiaria apenas a redução dos impactos em acidificação e eutrofização. Nessas categorias os impactos são maiores para o etanol de primeira geração (cenários S1 e S2) devido às emissões de NO_x das caldeiras (uma vez que maior volume de palha e bagaço é queimado em comparação com os cenários de produção conjunta de etanol de

primeira e segunda geração). Os resultados são sensíveis à cogeração de eletricidade excedente, pois os cenários S3 e S4 passariam a ser mais favoráveis para as categorias de aquecimento global e toxicidade humana se a eletricidade excedente fosse 30% menor que o esperado. Para acidificação e eutrofização, os resultados ficaram ainda mais favoráveis aos cenários S3 e S4 frente aos cenários S1 e S2.

A análise de contribuição das emissões no ciclo de vida do etanol e dos seus respectivos processos de produção para o impacto nas categorias avaliadas indicou que a redução de defensivos agrícola, como o carbofuran e o diruon, contribuiria para que os impactos ambientais em toxicidade humana e ecotoxicidade (em água doce e terrestre) fossem reduzidos significativamente. A redução da emissão de etanol durante a destilação contribuiria para que os impactos em oxidação fotoquímica fossem menores.

A comparação do perfil ambiental do ciclo de vida etanol de cana-de-açúcar com o perfil ambiental do ciclo de vida da gasolina indicou que, em todos os cenários, o etanol teria menor impacto em aquecimento global e em depleção abiótica (consumo de combustíveis fósseis). Para as outras categorias, no entanto, a gasolina teria menor impacto ambiental. Nesse sentido, esse trabalho chama a atenção para o fato de que as outras categorias (toxicidade humana e ecotoxicidade, oxidação fotoquímica, acidificação e eutrofização) representam impactos locais e, assim, os impactos deveriam ser mensurados de acordo com a capacidade de produção das usinas de etanol e da refinaria de petróleo (produzindo gasolina). Considerando a produção de gasolina em refinarias e a produção do etanol em usinas, observou-se que as emissões anuais no local de uma determinada usina seriam menores do que as emissões anuais de uma refinaria. Obviamente, as condições ambientais dos locais em que as usinas e as refinarias estão instaladas influenciam a resposta do meio à tais impactos e esses são tópicos para outros estudos, uma vez que a técnica de ACV não se aplica à esse tipo de análise.

A análise das incertezas indicou que os casos referência podem ter sido otimistas para o caso do impacto em aquecimento global e eutrofização, porém pessimistas para as outras categorias de impacto. Os resultados obtidos para os cenários são incertos para a maioria das categorias de impacto. No entanto, com exceção das categorias de toxicidade humana e

ecotoxicidade terrestre, a variação dos resultados devido às incertezas não alteraram as conclusões com relação ao cenário S0 e à gasolina.

Os impactos ambientais líquidos dos produtos de um hectare de cana-de-açúcar quando da substituição da eletricidade gerada em uma termoelétrica a gás natural e a gasolina em aquecimento global e depleção abiótica (consumo de combustíveis fósseis) seriam mitigados e nas demais categorias avaliadas os impactos seriam maiores. Conforme mencionado anteriormente, deve-se destacar que os impactos potencializados são impactos locais/regionais e que, assim, a análise dos impactos seria mais representativa se considerasse a produção de cada produto na região em que as usinas/fábricas estão instaladas. O cenário S2 (uso da ETC e plantio direto da cana-de-açúcar com a produção de etanol de primeira geração) é o que teria maior potencial de mitigação das emissões de gases de efeito estufa, seguindo do cenário S4 (uso da ETC e plantio direto da cana-de-açúcar com a produção conjunta de etanol de primeira e segunda geração) e do cenário S1 (cultivo mínimo da cana-de-açúcar e produção de etanol de primeira geração). Análises de sensibilidade considerando variações no montante de eletricidade excedente cogerada na usina e do tipo de eletricidade que é deslocada quando da venda de eletricidade excedente para a rede indicaram que os resultados podem mudar, favorecendo o uso do etanol de produção conjunta (primeira e segunda geração), que passa a ser a opção com maior potencial de mitigação das emissões de gases de efeito estufa.

Considerando a produção do etanol independente de etanol de segunda geração, o perfil ambiental do etanol derivado do bagaço da cana-de-açúcar, quando cultivada com o uso da ETC e plantio direto, é melhor do que o de etanol derivado de biomassas, como resíduos de milho, palha de trigo e switchgrass, cultivados nos Estados Unidos. As maiores incertezas estão associadas ao etanol derivado de *switchgrass*. Para as categorias de impacto em acidificação e eutrofização, as incertezas associadas aos resultados não permitem dizer qual alternativa de etanol tem o melhor perfil ambiental. Para as demais categorias de impacto, as incertezas não alterariam os resultados sobre qual etanol teria o melhor perfil ambiental.

Este estudo fez uso do software CMLCA para relacionar os processos e gerar os resultados. O software CMLCA oferece uma interface simples e tem a vantagem de ser de acesso livre. A

análise de incerteza pelo método Monte Carlo, oferecida pelo software, no entanto, demanda tempo para ser concluída (especialmente porque todas as incertezas dos sistemas *background* são consideradas no cálculo e o software não oferece a opção de excluir da análise as incertezas dos sistemas *background*) e não oferece resultados em percentil.

6.2 Sugestões para próximos trabalhos

No decorrer deste trabalho notou-se que algumas informações contribuiriam para a redução das incertezas associadas aos resultados e outras informações poderiam contribuir para responder às questões associadas aos benefícios ambientais da produção e uso do etanol. Assim, os seguintes estudos são sugeridos.

- Considerar os dados experimentais de emissão de N_2O associada ao uso de fertilizantes nitrogenados e à manutenção da palha no campo (dados atualmente em levantamento).
- Mensurar as emissões de fósforo quando da aplicação de fertilizantes baseados neste nutriente, uma vez que essas emissões contribuem para impacto em eutrofização.
- Considerar as emissões associadas aos impactos diretos e indiretos da mudança do uso do solo quando da expansão de áreas com produção de cana, com base no uso da estrutura de tráfego controlado (ETC) e plantio direto.
- Obter dados da produção de enzima (para hidrólise enzimática).
- Comparar outros cenários tecnológicos para o aproveitamento da biomassa da cana
- Continuar o trabalho de adaptação da base de dados internacionais às condições brasileiras que, neste trabalho, contou apenas com dados de demanda por energia nos processos e importação.

- Obter mais informações sobre o consumo de óleo diesel na etapa de produção de cana-de-açúcar.

- Obter e adotar dados de emissões atmosféricas que representem a queima de bagaço e palha nas caldeiras de cogeração de eletricidade das usinas de etanol.

- Avaliar as incertezas associadas à etapa industrial de produção do etanol.

- Considerar a composição dos resíduos de milho, da palha de trigo e do switchgrass (lignocelulose, lignina e celulose) para simulação da produção do etanol de segunda geração.

- Impactos quanto à demanda por água e impactos em biodiversidade não foram considerados neste trabalho para avaliação do perfil ambiental do etanol nos cenários prospectivos e estudos desses tópicos complementariam a análise realizada.

- Analisar os impactos locais associados ao ciclo de vida do etanol e da gasolina para comparação dos resultados.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO14040**: Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro. 2009

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO14044**: Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Requisitos e orientações. Rio de Janeiro. 2009

ADAMI, M., RUDORFF, B.F.T., FREITAS, R.M., AGUIAR, D.A., SUGAWARA, L.M., MELLO, M.P. Remote Sensing Time Series to Evaluate Direct Land Use Change of Recent Expanded Sugarcane Crop in Brazil. **Sustainability**. 4. 2012.

AMARAL, W.A. N., MARINHO, J.P., TARASANTCHI, R. BEBER. A., GIULIANI, E. Environmental sustainability of sugarcane ethanol in Brazil. *In: Sugarcane Ethanol: Contributions to climate change mitigation and the environment*. Wageningen Academic Publishers. The Netherlands, 2008. pp. 113-138.

ANP. **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**, Rio de Janeiro: ANP, 2010

ANP. **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**, Rio de Janeiro: ANP, 2012

BARE, J.C., HOFSTETTER, P., PENNINGTON, D.W., UDO DE HAES, H. U. Life Cycle Impact Assessment Workshop Summary. Midpoints versus Endpoints: The Sacrifices and Benefits. **Int. J. LCA**. 5(6), 2000.

BNDES. Panorama atual e perspectivas de desenvolvimento do setor de fertilizantes no Brasil. **Informe Setorial: jan/2010**; 16.

BORDONAL, R.O.; FIGUREDIO, E.B.; SCALA, N.JR. Greenhouse gas balance due to the conversion of sugarcane areas from burned to green harvest, considering other conservationist management practices. **Global Change Biology Bioenergy**. 4, 2012

BODDEY, R.M.; SOARES, L.H.B.; ALVES, B.J.R.; URQUIAGA, S.. Bio-ethanol Production in Brazil. Chapter 3 in: **Biofuels, Solar and Wind as Renewable Energy Systems**. 2008

BRINGEZU, S., HELMUT, S., O'BRIEN, M., KAUPPI, L., HOWARTH, R.W., MCNEELY, J. Towards sustainable production and use of resources: Assessing Biofuels. **United Nations Environmental Programme (UNEP)**. 2009

CanaSoft. **Programa de Avaliação Tecnológica – Centro de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (CTBE)**. Versão Ex.v012. Última consulta em 2013.

CAVALETT, O.; JUNQUEIRA, T.L.; DIAS, M.O.S.; JESUS, C.D.F.; MANTELATTO, P.E.; CUNHA, M.P.; FRANCO, H.C.J.; CARDOSO, T.F.; MACIEL FILHO, R.; ROSSEL, C.E.V.; BONOMI, A. Environmental and economic assessment of sugarcane first generation biorefineries in Brazil. **Clean Technology Environmental Policy**. 14, 2011

CAVALETT, O., CHAGAS, M.F., SEABRA, J.E.A., BONOMI, A. Comparative LCA of ethanol versus gasoline in Brazil using different LCIA methods. *The International Journal for Life Cycle Assessment*. 18. 2012.

CETESB (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental). Vinhaça – Critérios e Procedimentos para Aplicação no Solo Agrícola. P4.231. Dez/2006

CHAGAS, M.F. **Atualização do Banco de Dados EcoInvent Para a Utilização no Software SimaPro**. 15ª Jornada de Seminários dos Estagiários – Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol. 2011

CHAGAS, M.F., CVALETT, O., DA SILVA, C.R.U., SEABRA, J.E.A., BONOMI, A. Adaptação de Inventários de Ciclo de Vida da Cadeia Produtiva do Etanol de Cana-de-Açúcar no Brasil. III Congresso Brasileiro em Gestão do Ciclo de Vida de Produtos e Serviços. Novos desafios para um planeta sustentável. 2012

CHAN, W. N. **Quantificação e Redução de Emissões de Gases de Efeito Estufa em uma Refinaria de Petróleo**. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, 2006. Dissertação (Mestrado).

CHERUBINI, F.; BIRD, N. D.; COWIE, A.; JUNGMEIER G.; SCHLAMADINGER, B.; WOESS-GALLASCH, S. Energy- and greenhouse gas-based LCA of biofuel and bioenergy

systems: Key issues, ranges and recommendations, **Resources, Conservation and Recycling**. Vol. 53, pp. 434-447, 2009

CHERUBINI, F. GHG balances of bioenergy systems – Overview of key steps in the production chain and methodological concerns, **Renewable Energy** (2010), doi:10.1016/j.renene.2009.11.035

CMLCA - “Scientific software for LCA, IOA, EIOA, and more”. **Institute of Environmental Sciences – Leiden University**. 2012. Disponível em <http://www.cmlca.eu/CMLCA52beta.zip>. Download em 2012.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Perfil do Setor de Açúcar e Alcool no Brasil. Brasília. 2012

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 436, de 22 de dezembro de 2011. **Ministério do Meio Ambiente/Conselho Nacional de Meio Ambiente**. 2011

CONTRERAS, M. A., ROSA E., PEREZ M., VAN LANGENHOVE, H., DEWULF, J. Comparative Life Cycle Assessment of four alternatives for using by-products of cane sugar production. **Journal of Cleaner Production**, Vol. 17, pp. 772–779, 2009

Copersucar (Cooperativa de Produtores de Cana, Açúcar e Alcool do Estado de São Paulo LTDA). Inventário de Resíduos Sólidos na Agroindústria Sucroalcooleira – Projeto nº 9301623. RT-705-94/95. 1995

CORNELISSEN, S.; DEHUE, B.; WONINK, S. Summary of approaches to account for and monitor indirect impacts of biofuel production. **Ecofys / PECPNL084225**, 2009

CRUTZEN, P.J.; MOSIER, A. R.; SMITH, K. A.; WINIWARTER, W. N₂O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels. **Atmospheric Chemistry and Physics Discussion**, 7; 2007. pp. 11192-11205.

CRUTZEN, P.J.; MOSIER, A. R.; SMITH, K. A.; WINIWARTER, W. N₂O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels. **Atmospheric Chemistry and Physics Discussions**, 8; 2008. pp. 389-395.

CTBE – Brazilian Bioethanol Science and Technology Laboratory. Disponível em: www.ctbe.org.br Acesso em Dez. 2013

CURRAN, M. A. Studying the Effect on System Preference by Varying Coproduct Allocation in Creating Life-Cycle Inventory. **Environmetal Science Technology**. 41; 2007.

D'AGOSTO M. A. **Análise da eficiência da cadeia energética para as principais fontes de energia utilizadas em veículos rodoviários no Brasil**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2004. Tese (Doutorado).

DA SILVA, C., KO, L., SEABRA, J.E.A. Use of national data for energy and GHG emissions balance for sugarcane ethanol produced in Brazil. **19th European Biomass Conference and Exhibition**. 2011.

DERWENT, R. G.; JENKIN, M. E.; SAUNDERS, S. M.; PILLING, M. J. Photochemical ozone creation potentials for organic compounds in Northwest Europe calculated with a Master Chemical Mechanism. **Atmospheric Environment**. 32 (14/15), 1998

DIAS, M.O.S., MODESTO, M., ENSINAS, A.V., NEBRA, A.S., MACIEL, FILHO R., ROSSELL CEV. Improving bioethanol production from sugarcane: evaluation of distillation, thermal integration and cogeneration systems. **Energy**. 36, 2011.

DIAS, M.O.S.; JUNQUEIRA, T.L.; CAVALETT, O.; CUNHA, M. P.; JESUS, C.D.F.; ROSSELL, C.E.V.; FILHO, R.M.; BONOMI, A. Integrated versus stand-alone second generation ethanol production from sugarcane bagasse and trash. **Bioresource Technology**. 103, 2012

DIAS, V.P., FERNANDES, E. Fertilizantes: Uma visão global sintética. **BNDES Setorial**. Rio de Janeiro: set/2006; n.24: 97-138.

DO CARMO, B. J., FILOSO, S., ZOTELLI, L.C., DE SOUSA, E.N., PITOMBO, L.M., DUARTE-NETO, P.J., VARGAS, V.P., ANDRADE, C.A., GAVA, G.J.C., ROSSETTO, R., CANTARELLA, H., NETO, A.E., MARTINELLI, L.A. Infield greenhouse gas emissions from sugarcane soils in Braziil: effects from synthetic and organic fertilizer application and crop trash accumulation. **Global Change Biology**. 2012

DOHY, M. POITRAT, E. Energy and GhG balances of biofuels and conventional fuels - Convergences and divergences of main studies. **ADEME / Ecobilan**, 18p, july 2006.

DREYER L, HAUSCHILD M, SCHIERBECK J. A Framework for Social Life Cycle Impact Assessment. **Int J LCA** 11 (2) 2006

ECOINVENT, Swiss Centre for Life Cycle Inventories. **Erdgas** In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz. Final report No. 6-V. Ecoinvent data v2.0. Swiss Centre for Life Cycle Inventories: Dübendorf, 2007a.

ECOINVENT, Swiss Centre for Life Cycle Inventories. **Erdöl** In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz. Final report No. 6-IV. Ecoinvent data v2.0. Swiss Centre for Life Cycle Inventories: Dübendorf, 2007b.

ECOINVENT, Swiss Centre for Life Cycle Inventories. **Life Cycle Inventories of Chemicals**. Final report No. 8. Ecoinvent data v2.0. Swiss Centre for Life Cycle Inventories: Dübendorf, 2007c.

EKVALL, T.; WEIDEMA, B.P. System Boundaries and Input Data in Consequential Life Cycle Inventory Analysis. **International Journal of Life Cycle Assessment**. 3; 2004

EPA – US. Environmental Protection Agency. Disponível em: www.epa.gov/pesticides/reregistration/carbofuran/carbofuran_noic.htm . Acesso em abril/2013.

EU RED – European Renewable Energy Directive. 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**. 5.6.2009

FARGIONE, J., HILL, J., TILMAN, D., POLASKY, S., HAWTHORNE, P. Land clearing and biofuel carbon dept. **Science Express**. 7/2/2008. pp 1238-1240.

FRANCO, H. C. Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol. Programa Agrícola. Comunicação pessoal. 2013

GALDOS, M.V., CERRI, C.C., CERRI, C.E.P. Soil carbon stocks under burned and unburned sugarcane in Brazil. **Geoderma**. 153, 2009

GALDOS, M.V., CERRI, C.C., LAL, R., BERNOUX, M., FEIGL B., CERRI, C.E.P. Net greenhouse gas fluxes in Brazilian ethanol production systems. **Global Change Biology Bioenergy**. 2, 2010

GBEP (Global Bioenergy Partnership). Disponível em: <http://www.globalbioenergy.org/> Acesso em: 05/11/2009.

GNANSOUNOU, E., DAURIAT, A., PANICHELLI, L. VILLEGAS, J. D. Estimating Energy and Greenhouse gas balance of biofuels. **Lausanne (REF.437.100)**, 28p, fev. 2008a.

GNANSOUNOU, E., DAURIAT, A., PANICHELLI, L., VILLEGAS, J. D. Accounting for indirect land-use changes in GHG balances of biofuels. **Lausanne (REF.437.101)**, 22p, mar. 2008b.

GNANSOUNOU, E., DAURIAT, A., PANICHELLI, L. VILLEGAS, J. D. Life cycle assessment of biofuels: Energy and greenhouse gas balances. **Bioresource Technology**, Vol. 100, pp. 4919–4930, 2009

GREET (The Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation Model). **Argonne National Laboratory. U.S. Department of Energy**. Versão 1.8c (2007).

GUINÉE, J.B.; GORRÉE, M.; HEIJUNGS, R.; HUPPES, G.; KLEIJN, R.; KONING, A.; OERS, L.; SLEESWIJK, A. W.; SUH, S.; HAES, H.A.U.; BRUIJN, H.; DUIN, R.; HUIJBREGTS, M.A.J.; LINDEIJER, E.; VEN, B.L.; WEIDEMA, B.P. Life cycle assessment – An operational guide to the ISO standards. **Kluwer Academic Publishers**. ISBN: 1-4020-0228-9, 2002

HEIJUNGS, R.; FRISCHKNECHT, R. Representing Statistical Distributions for Uncertain Parameters in LCA – relationships between mathematical forms, their representation in EcoSpold and their representation in CMLCA. **International Journal of Life Cycle Assessment**. 10 (4), 2005

HEIJUNGS, R.; GUINÉE, J.; HUPPES, G.; LANKREIJER, R. M.; UDO DE HAES, H. A.; SLEESWIJK, A. Environmental life cycle assessment of products. Guide and background. Leiden, Netherlands: Centre of Environmental Science Leiden University. 1992

HUIJBREGTS, M. A. J.; THISSEN, U.; GUINÉE, J. B.; JAGER, T.; KALF, D.; MEENT, D.; RAGAS, A. M. J.; SLEESWIJK, A. W.; REIJNDERS, L. Priority assessment of toxic substances in life cycle assessment. Part I: Calculation of toxicity potentials for 181 substances with the nested multi-media fate, exposure and effects model USES-LCA. **Chemosphere**. 41, 2000a

HUIJBREGTS, M. A.; SCHÖPP, W.; VERKUIJLEN, E.; HEIJUNGS, R.; REIJNDERS, L. Spatially Explicit Characterization of Acidifying and Eutrophying Air Pollution in Life-Cycle Assessment. *Jornal of Industrial Ecology*. 4 (3), 2000b

HUMBIRD, D.; DAVIS, R.; TAO, L.; KINCHIN, C.; HSU, D.; ADEN, A. SCHOEN, P.; LUKAS, J.; OLTHOF, B.; WORLEY, M.; SEXTON, D.; DUDGEON, D. Process Design and Economics for Biochemical Conversion of Lignocellulosic Biomass to Ethanol – dilute-acid pretreatment and enzymatic hydrolysis of corn stover. Technical Report NREL/TP-5100-47764. **National Renewable Energy Laboratory**. 2011

HSU, D.D.; INMAN, D.; HEATH, G.A.; WOLFRUM, E.J.; MANN, M.K.; ADEN, A. Life Cycle Environmental Impacts of Selected U.S. Ethanol Production and Use Pathways in 2022. **Environmental Science Technology**. 44, 2010

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories**. Vol. 4. 2006

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/SPM2feb07.pdf>

JENKIN, M. E.; HAYMAN, G. D. Photochemical ozone creation potentials for oxygenated volatile organic compounds: sensitivity to variations in kinetic and mechanistic parameters. **Atmospheric Environment**. 33, 1999

JUNQUEIRA, T.L. Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol. Programa de Avaliação Tecnológica. Comunicação pessoal. 2013

KHATIWADA, D., SEABRA, J. SILVEIRA, S., WALTER, A. Accounting greenhouse gas emissions in the life cycle of Brazilian sugarcane bioethanol: Methodological references in European and American regulations. **Energy Policy**. Vol. 47, pp 384 – 397, 2012

KLØVERPRIS J, WENZEL H, BANSE M, MILÀ I CANALS L, REENBERG A: Conference and Workshop on Modelling Global Land Use Implications in the Environmental Assessment of Biofuels. **Int. J. LCA**, Vol.13, No. 3, pp. 178–183, 2008

KLOEPFFER, W. Life cycle sustainability assessment of products. **The International Journal of Life Cycle Assessment**. V.13, 2. 2008

KO, L.M. **Consumo de energia e emissões de GEE na cadeia produtiva de combustíveis fósseis e de fertilizantes no Brasil**. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. 2010. Trabalho (Graduação).

KULAY L. A. **Uso da Análise do Ciclo de Vida para a Comparação do Desempenho Ambiental das Rotas Úmida e Térmica de Produção de Fertilizantes Fosfatados**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química, 2004. Tese (Doutorado).

LANDIS, A. E., THEIS, T. L. Comparison of Life Cycle Impact Assessment Tools in the Case of Biofuels. **IEEE International Symposium on Electronics and the Environment**. 2008

LANGER, T. Is the use of Brazilian bio-ethanol ecologically advantageous for the Swiss society? – Simplified Life Cycle Assessment study of the substitution of 5% of Swiss gasoline by Brazilian bio-ethanol. **Instituto Ekos Brasil**. Brasil. 2006

LARSON, E. D. A Review of Life-Cycle Analysis Studies on Liquid Biofuel Systems for the Transport Sector. **USA: Princeton Environmental Institute**, 2006

LEAL, M.R.L.V., WALTER, A.S., SEABRA, J.E.A. Sugarcane as an energy source. **Biomass Conversion and Biorefinery**. 3, 2013

LISKA, A.J., CASSMAN, K.G. Towards Standardization of Life-Cycle Metrics for Biofuels: Greenhouse Gas Emissions Mitigation and Net Energy Yield. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*. 2, 187-203, 2008.

LUO, L., E. van der VOET, HUPPES, G. Life cycle assessment and life cycle costing of bioethanol from sugarcane in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 13, 2009

LUO, L. VOET, E.; HUPPES, G. Energy and Environmental Performance of Bioethanol from Different Lignocelluloses. **International Journal of Chemical Engineering**. 13, 2010.

MACEDO, I.C. Sugar cane's energy – twelve studies on Brazilian sugar cane agribusiness and its sustainability. São Paulo: Berlendis & Vertecchia: UNICA, 2005 (Organizadora).

MACEDO IC, SEABRA JEA, SILVA JEAR. Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil. **The Biomassa e Bioenergy** (2008), doi: 10.1016/j.biombioe.2007.12.006.

MACEDO, IC, SEABRA JEA. Mitigação of GHG emissions using sugarcane bioethanol. *In Sugarcane Ethanol: Contributions to climate change mitigation and the environment*. Wageningen Academic Publishers. The Netherlands, 2008. pp. 95-111.

MACLEAN, H.L., SPATARI, S. The contribution of enzymes and process chemicals to the life cycle of ethanol. **Environmental Research Letters**. Vol. 4, 10pp, 2009

MDIC. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Alice Web. Importações de uréia, nitrato de amônio, superfosfato simples e superfosfato triplo. 2010. Available in: <HTTP://aliceweb.desenvolvimento.gov.br>. Acesso em 2011.

MUTEL C, HELLWEG S. Regionalized Life Cycle Assessment: Computational Methodology and Application to Inventory Databases, *Environmental Science and Technology*, 43 (15) 2009.

NYKO, D., GARCIA, J.L.F., MILANEZ, A.Y., DUNHAM, F.B. A corrida tecnológica pelos biocombustíveis de segunda geração: uma perspectiva comparada. *Biocombustíveis*. BNDES Setorial 32, 2011.

OECD/IEA. Technology Roadmap Biofuels for Transport. International Energy Agency, 2011

OERS, L.; KONING, A.; GUINÉE, J. B.; HUPPES, G. Abiotic resource depletion in LCA – improving characterization factors for abiotic resource depletion as recommended in the new Dutch LCA Handbook. **Road and Hydraulic Engineering Institute**. 2002

OMETTO, A.R., HAUSCHILD, M.Z., ROMA, W.N.L. Lifecycle assessment of fuel ethanol from sugarcane in Brazil. **International Journal of Life Cycle Assessment**. Vol. 14, pp 236 – 247, 2009

RENOUF, M.A., WEGENER, M.K., PAGAN, R.J. Life cycle assessment of Australian sugarcane production with a focus on sugarcane growing. **Int. J. Life Cycle Assessment**. (15), 2010.

RIBEIRO P. H. **Contribuição ao banco de dados brasileiro para apoio a avaliação do ciclo de vida: fertilizantes nitrogenados**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química, 2009. Tese (Doutorado).

São Paulo (2002). Lei Estadual nº 11.241/2002: Dispõe sobre a eliminação gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar e dá providências correlatas. Disponível em: HTTP://www.sigam.ambiente.sp.gov.br/sigam2/Repositorio/24/Documentos/Lei%20Estadual_11241_2002.pdf

SEABRA, J. **Avaliação técnico-econômica de opções para o aproveitamento integral da biomassa de cana no Brasil**. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. 2008. Tese (Doutorado).

SEABRA, J.E.A; TAO, L.; CHUM, H.L.; MACEDO, I.C. A techno-economic evaluation of the effects of centralized cellulosic ethanol and co-products refinery options with sugarcane mill clustering. **Biomass and Bioenergy**. Vol. 34, pp. 1065 – 1078. 2010.

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 & Biorefining**. Vol. 5, pp. 519-532. 2011.

SEABRA, J.E.A.; MACEDO, I.C. Comparative analysis for power generation and ethanol production from sugarcane residual biomass in Brazil. **Energy Police**. Vol.39, pp. 421-428, 2011

SILVEIRA, J.C.G., MELO, L.M.S.A., MACHADO, A.C., NOGUEIRA, D.M., DA CONCEIÇÃO, A.G., MARTINS, L.F.B., CAMMAROTA, C.M., DE CARVALHO, L.A., CAMPORESE, E.F.S. Method for producing energy-rich gases from lignocellulosic material streams. **Organização Mundial da Propriedade Intelectual – Pedido Internacional Publicado Sob Tratado de Cooperação em Matéria de Patentes (PCT)**. WO 2012/003556 A1

SPATARI, S., ZHANG, Y., MACLEAN, H.L. Life cycle assessment of switchgrass and corn stover derived ethanol fueled automobiles. *Environmental and Science Technology*. Vol. 39, pp. 9750 – 9758, 2005

SPATARI, S., MACLEAN, H.L. Characterizing model uncertainties in the life cycle of lignocelluloses based ethanol fuels. *Environmental and Science Technology*. Vol. 44, pp. 8773 – 8780, 2010

SPATARI, S., BAGLEY, D.M., MACLEAN, H.L. Life cycle evaluation of emerging lignocellulosic ethanol conversion technologies. *Bioresource Technology*. Vol. 101, pp. 654 – 667, 2010

United States Environmental Protection Agency (EPA) (February, 2010). Renewable Fuel Standard Program (RFS2) **Regulatory Impact Analysis**. EPA-420-R-10-006.

VIKMAN, Per-Åke; GUSTAVSSON, L., KLANG, A. Evaluating Greenhouse Gas Balances and mitigation cost of bioenergy systems – A review of methodologies. **Biomass-based Climate Change Mitigation through Renewable Energy (BIOMITRE) Work-package 1**. 2004

WALTER, A.; DOLZAN, P.; QUILODRÁN, O.; de OLIVEIRA, J. G.; da SILVA, C.; PIACENTE, F.; SEGERSTEDT, A. (2010) Sustainability assessment of bio-ethanol production in Brazil considering land use change, GHG emissions and socio-economic aspects. **Energy Policy**. Vol.39 (10), pp. 5703-5716, 2011

WANG, M.; HAN, J.; DUNN, J.B.; CAI, H.; ELGOWAINY, A. Well-to-wheels energy use and greenhouse gas emissions of ethanol from corn, sugarcane and cellulosic biomass for US use. **Environmental Research Letters**. 7; 2012

WEIDEMA, Bo. Avoiding Co-Product Allocation in Life-Cycle Assessment. **Journal of Industrial Ecology**. Vol. 4, N° 3. pp.11-33, 2001

WEIDEMA, B. P. The Integration of Economic and Social Aspects in Life Cycle Impact Assessment. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, 11. Special Issue 1 (2006).

ANEXO A – Parâmetros usados para simulação da produção de etanol no AspenPlus

Tabela A. 1 Parâmetros para simulação da etapa industrial em AspenPlus

Parâmetros	Unidade	S1 e S2	S3 e S4
Cana processada	t/h	750,0	1000,0
Operação da usina	dias/ano		167
Conteúdo de fibras na cana	%		13,0
Açúcares redutores totais (ART)	%		16,0
Produção de palha no campo	kg/t cana		140
Umidade do bagaço	%		50
Umidade da palha	%		15
Eficiência de extração de açúcar	%		97,0
Eficiência de fermentação	%		90,0
Eficiência de caldeiras 65 bar (PCI)	%		87,0
Eficiência de turbinas (pressão alta/intermediária/condensação)	%		72/81/70
PCI do bagaço (50%umidade)	MJ/kg		7,5
PCI da palha (15%umidade)	MJ/kg		14,9
Demanda de energia elétrica	kWh/t cana	22,04	26,32
Vapor-processo/peneira molecular	bar		2,5/6,0
Pré-tratamento			
Temperatura	°C	-	150
Tempo de residência	Minutos	-	10
Adição de ácido acético	% m/m	-	0,5
Conversão de xilana em xilose	%	-	65
Conversão de xilana em oligômeros de xilose	%	-	5
Degradação de xilana em furfural	%	-	10
Conversão de celulose em glicose	%	-	5

Conversão de celulose em oligômeros de glicose	%	-	2
Degradação de celulose em HMF	%	-	1,5
Conversão do grupo acetil em ácido acético	%	-	80
Solubilização de lignina	%	-	15
Hidrólise enzimática			
temperatura	°C	-	50
Pressão	bar	-	1
Tempo de residência	horas	-	48
Teor de sólidos	%	-	15
Carga enzimática	FPU/g	-	10
	celulose		
Conversão de celulose em glicose	%	-	70
PCI (bs) – celulose		-	15,8
- hemicelulose	MJ/kg	-	16,3
- lignina		-	25,5
Fermentação de pentoses (conversão para etanol)	%	-	80,0
Conversão de celulose em oligômeros de glicose	%	-	0,5
Conversão de xilana em xilose	%	-	35
Conversão de xilana em oligômeros de xilose	%	-	0
Conversão do grupo acetil em ácido acético	%	-	35

Fonte: Junqueira (2013)

APÊNDICE A – Método CML para AICV e software CMLCA para ACV

A.1 Método CML para Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida

Diferentes métodos para avaliação de impacto do ciclo de vida podem ser encontrados, tanto para avaliação em *midpoint* quanto *endpoint*. Os métodos são baseados em estudos que avaliam o potencial impacto de emissões líquidas, sólidas e gasosas no ambiente e em saúde humana (ou toxicidade humana). O impacto dessas emissões é estimado com base em modelos (calibrados através da inserção de dados) que simulam o comportamento de certas substâncias no ambiente como, por exemplo CMC (Mecanismo Químico Mestre – sigla em inglês), para avaliação do potencial de criação de ozônio fotoquímico, RAINS, para avaliação do potencial de acidificação e eutrofização, USES, para avaliação do potencial de toxicidade e ecotoxicidade (JENKIN & HAYMAN (1999); DERWENT al. (1998); HUIJBREGTS et al. (2000a), HUIJBREGTS et al. (2000b)). O potencial de causar impacto (fator de caracterização) em determinada categoria é normalizado tendo como referência uma determinada substância, assim, o impactos de todas as substâncias classificadas à uma determinada categoria (a contribuição para o impacto em determinada categoria), são medidos quanto ao impacto equivalente da substância tida como referência.

O que diferencia os métodos de avaliação de impacto do ciclo de vida são os modelos adotados para avaliar os impactos das diferentes substâncias, os pressupostos e os dados usados para calibração do modelo e a unidade em os impactos equivalentes são medidos.

O método CML para avaliação do impacto do ciclo de vida avalia os impactos em nível midpoint. Desenvolvido em 2002 por um grupo de cientistas coordenado por Guinée, o método relaciona (de acordo com a classificação e caracterização) os aspectos ambientais (emissões e uso de recursos naturais) a treze categorias de impacto: depleção abiótica (elementos, as reservas

finais), depleção abiótica (combustíveis fósseis), depleção abiótica (elementos, reservas base), depleção abiótica (elementos, reservas econômicas), aquecimento global, depleção da camada de ozônio, toxicidade humana, ecotoxicidade em água doce, ecotoxicidade em águas marinhas, ecotoxicidade terrestre, oxidação fotoquímica, acidificação e eutrofização.

Guinée (2002) disponibiliza a lista das substâncias abordadas e classificadas para cada uma das categorias de impacto. Embora criado em 2002, o método é atualizado conforme atualização das publicações adotadas como referência. A última versão (v3.9 (2010)), conta com última publicação do IPCC quanto aos fatores de caracterização dos gases de efeito estufa considerando o horizonte temporal de 100 anos – IPCC (2007). A Tabela A.1 apresenta algumas características das categorias de impacto que compõem o método CML.

Tabela A.1 Características do método CML para avaliação do impacto do ciclo de vida

Categorias	Descrição	Atributo espacial		Referência
		Site-genérico	Site-dependente	
Depleção abiótica (combustíveis fósseis)	Baseado no conteúdo de exergia	X		Oers et al. 2002
Depleção abiótica (reservas finais)	Fatores de caracterização são em função da extração anual do recurso e a reserva do recurso.			
Depleção abiótica (reservas base)	As reservas finais são elementos ou configurações químicas disponíveis. Reservas base são recursos que atendem a um critério físico e químico mínimo especificado para prática de mineração. As reservas econômicas são parte das reservas base que podem ser economicamente extraídas.			
Depleção abiótica (reservas econômicas)				
Aquecimento Global	Os fatores de caracterização estão relacionados ao potencial de alguns gases alterarem a capacidade de absorção dos raios infravermelhos – que mantêm a temperatura atmosférica.	X		IPCC (2007)
Depleção da camada de ozônio	Os fatores de caracterização estão relacionados ao potencial que alguns gases possuem para a destruição de ozônio (causando buraco na camada de ozônio e, conseqüentemente, perda da capacidade de absorção dos raios ultravioletas (UV)).	X		WMO (2003)
Toxicidade humana Ecotoxicidade -água	Os potenciais toxicológicos de substâncias emitidas no ambiente são calculados com base em índice de caracterização de riscos, ou seja, a relação entre resultados de avaliação da exposição a		X	Huijbregts et al. (2000a)

doce	determinadas substâncias e a avaliação dos efeitos de tal exposição.		
Ecotoxicidade – águas marinhas			
Ecotoxicidade – terrestre			
Oxidação Fotoquímica	Os fatores de caracterização estão relacionados ao potencial de reação fotoquímica (ou seja, reação química sob a influência da radiação solar) e propensão de gases para a produção de ozônio durante tal reação.	X	Jenkin & Hayman, (1999); Derwent et al. (1998)
Acidificação	Os fatores de caracterização são baseados na emissão potencial íons de hidrogênio. De acordo com UBA (1996) <i>apud</i> Huijbregts et al. (1999), toxicidade, aumento à suscetibilidade a fatores de estresse e mudança nas relações competitivas entre espécies estão associados à acidificação.	X	Huijbregts et al. (2000b)
Eutrofização	Eutrofização é resultado do enriquecimento de nutriente no solo e água. A emissão de nutrientes (antropogênico) no ambiente interfere o balanço de nutrientes que, na água pode acarretar o crescimento de algas com consequente turbidez e redução de oxigênio dissolvido e, no solo, altera a tolerância dos ecossistemas as doenças, por exemplo. O fator de caracterização é baseado em efeitos nutritivos de substâncias.	X	Heijungs et al. 1992

A.2 Software CMLCA para avaliação do ciclo de vida

O software CMLCA é um software científico de acesso livre desenvolvido por Reinout Heijungs (Faculdade de Ciências, Instituto de Ciências Ambientais (CML), departamento de Ecologia Industrial da Universidade de Leiden/Holanda). Na sua versão atual (v5.2; 2012), o software pode ser usado para avaliação do ciclo de vida, análises insumo-produto (IO), análises híbridas (combinando ACV e IO), análise de eco-eficiência e custo do ciclo de vida. O software está disponível para *download* no site: <http://www.cmlca.eu/>. Cabe ressaltar, no entanto, que o software não possui uma base de dados – que deve ser adquirida à parte e instalada.

Para a análise de incerteza o software oferece quatro tipos de distribuição (uniforme, triangular, normal e lognormal) e os dados de entrada não são os mesmos adotados em outros softwares dedicados à análise de incerteza, como o CrystalBall por exemplo. Nesse sentido, maiores informações sobre os dados de entrada para análise de incerteza no software CMLCA são apresentadas por Heijungs e Frischknecht (2005).

Conforme Figura A.1, o software permite que a avaliação seja realizada seguindo as etapas da ACV, conforme estabelecido pela norma ABNTISO14040 (2009).

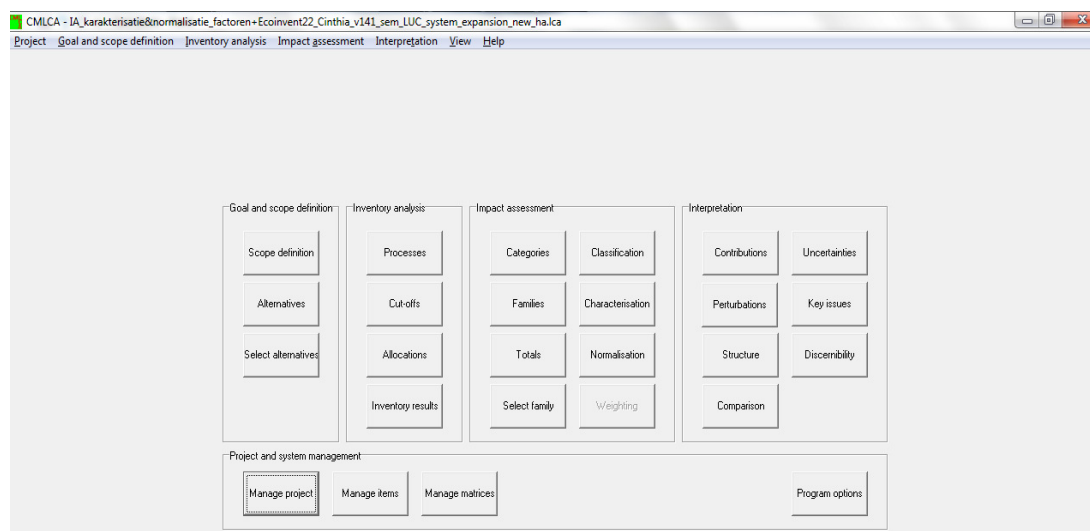


Figura A.1 Interface do software CMLCA

APÊNDICE B – Comparação do consumo de diesel durante as operações agrícolas – dados adotados neste trabalho e dados de literatura

Tabela B.1 – Comparação dos dados de consumo de diesel nas operações agrícolas de produção da cana com os dados de literatura

Parametros	Unidade	Cana Planta	Cana Planta (Macedo et al. 2004)	Cana Soca	Cana soca (Macedo et al. 2004)
Dessecação da soqueira antiga	L	0,38	1,60	0,00	0,00
Eliminador de soqueira	L	13,21	11,09	0,00	0,00
Calagem	L	5,88	3,73	5,88	0,00
Gessagem	L	5,88	-	5,88	-
Construção de carregadores	L	11,17	-	0,00	-
Manutenção de estradas	L	0,56	-	0,56	-
Subsolagem	L	23,25	26,00	0,00	0,00
Gradagem niveladora	L	3,85	9,38	0,00	0,00
Aplicação da torta de filtro	L	9,40	9,60	0,00	0,00
Plantio mecanizado	L	15,02	-	0,00	0,00
Operação quebra lombo	L	10,02	6,50	0,00	0,00
Aplicação de herbicida	L	0,38	1,60	0,38	1,60
Adubação da soqueira (triplice	L	0,00	0,00	12,84	7,08

operação)

Colheita mecanizada	L	83,09	81,60	83.09	81,60
Transbordo	L	41,77	23,68	41,77	23,68

APÊNDICE C – Inventários do Ciclo de Vida do etanol derivado da cana-de-açúcar em diferentes cenários

Tabela C.1 Inventários do Ciclo de Vida do etanol derivado da cana-de-açúcar em diferentes cenários

	Unidade	S0	S1	S2	S3	S4
produto						
operação do carro com etanol						
hidratado	MJ		1	1	1	1
Insumos						
ureia, como N fertilizante	kg	4,55E-04	3,41E-04	3,34E-04	3,21E-04	3,14E-04
TSP, como P2O5 fertilizante	kg	2,01E-04	3,24E-05	1,26E-05	3,05E-05	1,19E-05
K2O	kg	3,34E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
calcário dolomítico	kg	2,68E-03	3,51E-03	2,93E-03	3,30E-03	2,75E-03
gesso	kg	1,34E-03	2,11E-03	1,76E-03	1,98E-03	1,65E-03
vinhaça	m3	7,02E-04	8,30E-05	8,43E-05	9,95E-05	1,01E-04
torta de filtro	kg	7,69E-03	1,98E-03	1,65E-03	1,86E-03	1,55E-03
cinzas	kg		1,26E-03	1,05E-03	1,19E-03	9,92E-04
cinzas	kg		1,05E-03	8,78E-04	9,91E-04	8,26E-04
palha no campo	t	9,90E-05	2,70E-05	2,70E-05	2,54E-05	2,55E-05
raízes da cana	t	5,02E-05	2,32E-05	2,32E-05	2,18E-05	2,18E-05
óleo diesel	kg	9,23E-04	4,70E-04	2,23E-04	4,42E-04	2,10E-04
colhedora	kg	2,62E-05	1,52E-05	4,57E-06	1,43E-05	4,30E-06
trator	kg	1,65E-05	2,61E-05	1,30E-05	2,46E-05	1,22E-05
maquinas agrícolas	kg	1,55E-05	4,21E-05	1,90E-05	3,97E-05	1,78E-05
glifosato	kg	1,74E-06	1,69E-06	1,41E-06	1,59E-06	1,32E-06
diuron	kg	6,69E-07	4,21E-07	3,51E-07	3,97E-07	3,31E-07
carbofuran	kg	8,03E-07	4,21E-07	3,51E-07	3,97E-07	3,31E-07
inseticidas	kg	2,68E-07	1,69E-07	1,41E-07	1,59E-07	1,32E-07
herbicidas	kg	1,81E-06	9,27E-07	7,73E-07	8,72E-07	7,27E-07
pesticidas não especificados	kg	6,69E-07	8,43E-08	7,03E-08	7,93E-08	6,61E-08
transporte dos insumos,						
caminhão 16-32t	t.km	2,72E-03	2,61E-03	2,24E-03	2,45E-03	2,11E-03
óleo diesel para aplicação da						
vinhaça	kg	1,52E-04	2,11E-05	1,83E-05	2,54E-05	2,58E-05
transporte da cana, caminhão						
>32t	t.km	1,40E-02	2,36E-02	2,36E-02	2,22E-02	2,22E-02

transporte, caminhão 7,5-16t	t.km	4,01E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
CaO	kg	4,50E-04	2,34E-04	2,34E-04	2,17E-04	2,17E-04
H2SO4	kg	2,89E-04	1,73E-04	1,73E-04	3,85E-04	3,85E-04
enzima	kg	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,50E-04	3,50E-04
aço (equipamentos)	kg	2,61E-05	5,85E-05	5,85E-05	3,50E-05	3,50E-05
edificações	m2	1,02E-07	6,15E-08	6,15E-08	5,59E-08	5,59E-08
biomassa queimada na caldeira(bs)	kg	6,96E-02	7,61E-02	7,61E-02	5,94E-02	5,94E-02
distribuição do etanol, caminhão >32t	t.km	2,74E-02	2,19E-02	2,19E-02	2,19E-02	2,19E-02
emissões para o ar						
CO2 - aplicação de calcário dolomítico	kg	1,28E-03	1,69E-03	1,41E-03	1,59E-03	1,32E-03
N2O - aplicação de ureia	kg	9,10E-06	6,83E-06	6,67E-06	6,42E-06	6,28E-06
NH3 - aplicação de ureia	kg	1,64E-04	1,23E-04	1,20E-04	1,15E-04	1,13E-04
CO2 - aplicação de ureia	kg	7,14E-04	5,36E-04	5,24E-04	5,04E-04	4,93E-04
N2O - aplicação de vinhaça	kg	1,97E-05	2,32E-06	2,36E-06	2,19E-06	2,22E-06
N2O - aplicação de torta de filtro	kg	1,85E-06	4,75E-07	3,96E-07	4,47E-07	3,73E-07
N2O - palha no campo	kg	9,50E-06	2,59E-06	2,60E-06	2,44E-06	2,44E-06
N2O - raízes	kg	5,79E-06	2,68E-06	2,68E-06	2,52E-06	2,52E-06
N2O - cinzas de fuligem	kg	0,00E+00	1,95E-10	1,62E-10	1,83E-10	1,53E-10
N2O - cinzas da caldeira	kg	0,00E+00	2,03E-12	1,69E-12	1,91E-12	1,59E-12
Acetaldeído	kg	2,95E-11	3,17E-11	3,15E-11	3,07E-11	3,05E-11
Amônia	kg	3,93E-08	3,11E-08	2,59E-08	2,99E-08	2,49E-08
Benzeno	kg	6,74E-09	3,43E-09	1,63E-09	3,23E-09	1,54E-09
Benzo(a)pyrene[air_low population density]	kg	2,77E-11	1,41E-11	6,70E-12	1,33E-11	6,31E-12
Cádmio	kg	2,35E-11	1,98E-11	1,71E-11	1,90E-11	1,65E-11
Dióxido de carbono, fóssil	kg	6,68E-03	5,50E-03	4,68E-03	5,28E-03	4,51E-03
Monóxido de carbono, fóssil	kg	1,16E-05	3,59E-04	3,57E-04	3,33E-04	3,31E-04
Crômio	kg	2,02E-10	1,87E-10	1,72E-10	1,80E-10	1,66E-10
Crômio VI	kg	1,20E-13	1,27E-13	1,26E-13	1,23E-13	1,22E-13
Cobre	kg	1,04E-08	1,01E-08	9,55E-09	9,75E-09	9,23E-09
Óxido nitroso	kg	2,36E-07	7,69E-06	7,66E-06	6,26E-06	6,23E-06
Etano, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a	kg	9,54E-09	9,96E-09	9,81E-09	9,63E-09	9,49E-09
Formaldeído	kg	5,45E-11	5,84E-11	5,80E-11	5,66E-11	5,61E-11
calor, resíduo	kg	5,45E-02	5,78E-02	5,72E-02	5,59E-02	5,53E-02
Chumbo	kg	4,37E-10	4,57E-10	4,50E-10	4,42E-10	4,35E-10
Mercúrio	kg	2,40E-14	2,55E-14	2,52E-14	2,46E-14	2,43E-14
Metano, fóssil	kg	4,29E-07	4,41E-05	4,40E-05	3,34E-05	3,34E-05
Níquel	kg	2,17E-10	1,93E-10	1,74E-10	1,86E-10	1,68E-10

Óxidos de nitrogênio	kg	7,24E-05	1,62E-04	1,51E-04	1,33E-04	1,23E-04
COVNM, compostos orgânicos voláteis não-metano	kg	6,52E-07	6,97E-07	6,91E-07	6,75E-07	6,69E-07
PAH, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos	kg	4,16E-12	4,35E-12	4,29E-12	4,20E-12	4,15E-12
Particulados, > 10 um	kg	2,36E-07	1,01E-04	1,01E-04	7,17E-05	7,17E-05
Particulados, > 2,5 um, e < 10um	kg	2,59E-07	2,71E-07	2,67E-07	2,62E-07	2,58E-07
Particulados, < 2,5 um	kg	7,60E-07	5,11E-05	5,11E-05	3,65E-05	3,65E-05
Selenio	kg	2,12E-11	1,74E-11	1,48E-11	1,67E-11	1,43E-11
Dióxido de enxofre	kg	1,05E-06	6,02E-07	3,51E-07	5,70E-07	3,34E-07
Tolueno	kg	6,49E-14	6,95E-14	6,90E-14	6,73E-14	6,68E-14
Xileno	kg	5,72E-12	6,13E-12	6,08E-12	5,93E-12	5,89E-12
Zinco	kg	4,65E-09	4,39E-09	4,09E-09	4,23E-09	3,95E-09
hidrocarbonetos aromáticos	kg	2,77E-06	1,41E-06	6,70E-07	1,33E-06	6,31E-07
Etanol	kg	7,78E-05	5,56E-05	5,56E-05	6,29E-05	6,29E-05
Emissões para a água						
glifosato	kg	2,61E-08	2,53E-08	2,11E-08	2,38E-08	1,98E-08
diuron	kg	1,00E-08	6,32E-09	5,27E-09	5,95E-09	4,96E-09
carbofuran	kg	1,20E-08	6,32E-09	5,27E-09	5,95E-09	4,96E-09
N lixiviação - aplicação de ureia	kg	1,00E-04	7,51E-05	7,34E-05	7,06E-05	6,91E-05
Cádmio, íon	kg	2,49E-10	9,02E-12	8,91E-12	8,72E-12	8,62E-12
Cromo, íon	kg	1,19E-09	4,28E-11	4,22E-11	4,14E-11	4,09E-11
Cobre, íon	kg	1,68E-08	6,03E-10	5,95E-10	5,83E-10	5,76E-10
Chumbo	kg	1,03E-08	3,71E-10	3,66E-10	3,58E-10	3,54E-10
Níquel, íon	kg	3,23E-09	1,16E-10	1,15E-10	1,12E-10	1,11E-10
Zinco, íon	kg	7,05E-07	2,54E-08	2,51E-08	2,46E-08	2,43E-08
Emissões para o solo						
glifosato	kg	1,71E-06	1,66E-06	1,38E-06	1,56E-06	1,30E-06
diuron	kg	6,59E-07	4,15E-07	3,46E-07	3,91E-07	3,26E-07
carbofuran	kg	7,91E-07	4,15E-07	3,46E-07	3,91E-07	3,26E-07
Cádmio	kg	8,41E-12	9,02E-12	8,91E-12	8,72E-12	8,62E-12
Cromo	kg	3,99E-11	4,28E-11	4,22E-11	4,14E-11	4,09E-11
Cobre	kg	5,62E-10	6,03E-10	5,95E-10	5,83E-10	5,76E-10
Chumbo	kg	3,46E-10	3,71E-10	3,66E-10	3,58E-10	3,54E-10
Níquel	kg	1,08E-10	1,16E-10	1,15E-10	1,12E-10	1,11E-10
Zinco	kg	2,37E-08	2,54E-08	2,51E-08	2,46E-08	2,43E-08

APÊNDICE D – Análise da contribuição dos processos e emissões para os impactos do etanol em cenários prospectivos

Tabela D.1 Análise de contribuição para o impacto em eutrofização – cenário S0

Processos	Emissões	(kg PO4--- eq.)	Contrib.(%)
operation, lorry >32t, EURO3[BR, 2012]	Nitrogen oxides[air_unspecified]	3,87E-06	4
Urea application, as N fertilizer[BR, 2020-2035]	Ammonia[air_low population density]	5,79E-05	61
Urea application, as N fertilizer[BR, 2020-2035]	Dinitrogen monoxide[air_low population density]	2,58E-06	3
operation, farm machinery, diesel[BR, 2010]	Nitrogen oxides[air_low population density]	5,08E-06	5
sugarcane production S0[BR, 2012]	Dinitrogen monoxide[air_low population density]	4,15E-06	4
Hydrated ethanol, S0[BR, 2012]	Dinitrogen monoxide[air_high population density]	1,12E-06	1
Hydrated ethanol, S0[BR, 2012]	Nitrogen oxides[air_high population density]	9,78E-06	10
car operation, with hydrated ethanol, 1G S0[BR, 2012]	Nitrogen oxides[air_high population density]	2,29E-06	2
Vinasse transport and application[1G]_sem concentração[BR]	Dinitrogen monoxide[air_low population density]	1,31E-06	1
Total	Total	8,81E-05	93

Tabela D.2 Análise de contribuição para o impacto em acidificação – cenário S0

Processos	Emissões	(kg SO2 eq.)	Contrib.(%)
secondary sulphur, at refinery[RER, 1980-2000]	Sulfur dioxide[air_high population density]	6,89E-06	2
Sulphuric acid, liquid, at plant[BR, 2009]	Sulfur dioxide[air_high population density]	6,07E-06	2
operation, lorry >32t, EURO3[BR, 2012]	Nitrogen oxides[air_unspecified]	1,49E-05	4
Urea application, as N fertilizer[BR, 2020-2035]	Ammonia[air_low population density]	0,000265	67
operation, farm machinery, diesel[BR, 2010]	Nitrogen oxides[air_low population density]	1,95E-05	5
Hydrated ethanol, S0[BR, 2012]	Nitrogen oxides[air_high population density]	3,76E-05	10
car operation, with hydrated ethanol, 1G S0[BR, 2012]	Nitrogen oxides[air_high population density]	8,80E-06	2
Total	Total	0,000359	91

Tabela D.3 Análise de contribuição para o impacto em oxidação fotoquímica – cenário S0

Processos	Emissões	(kg etileno eq.)	Contrib.(%)
Hydrated ethanol, S0[BR, 2012]	Carbon monoxide, biogenic[air_high population density]	2,04E-06	5
Hydrated ethanol, S0[BR, 2012]	Ethanol[air_high population density]	2,77E-05	69
car operation, with hydrated ethanol, 1G S0[BR, 2012]	Carbon monoxide, fossil[air_high population density]	7,02E-06	18
Total	Total	3,67E-05	92

Tabela D.4 Análise de contribuição para o impacto em ecotoxicidade terrestre – cenário S0

Processos	Emissões	(kg 1,4-diclorobenzeno eq.)	Contrib.(%)
slurry spreading, by vacuum tanker[CH, 1991-2002]	Zinc[soil_agricultural]	9,64E-07	1
ammonia, steam reforming, liquid, at plant[RER, 2000-12]	Vanadium[air_high population density]	5,69E-06	6
cast iron, at plant[RER, 2001-2002]	Mercury[air_unspecified]	1,26E-06	1
copper, primary, at refinery[RLA, 1994-2003]	Arsenic[air_low population density]	1,39E-06	2
ferrochromium, high-carbon, 68% Cr, at plant[GLO, 1994-2003]	Chromium[air_low population density]	3,62E-05	39
steel, electric, un- and low-alloyed, at plant[RER, 2001]	Mercury[air_unspecified]	4,98E-06	5
heavy fuel oil, burned in refinery furnace[RER, 1980-2000]	Vanadium[air_high population density]	1,82E-06	2
disposal, drilling waste, 71.5% water, to landfarming[CH, 2000-01-2000-12]	Chromium[soil_industrial]	1,08E-06	1
ammonia, partial oxidation, liquid, at plant[BR]	Vanadium[air_high population density]	3,63E-06	4
sugarcane production S0[BR, 2012]	Carbofuran[soil_agricultural]	6,02E-06	7
sugarcane production S0[BR, 2012]	Diuron[soil_agricultural]	1,51E-05	16
Total	Total	7,82E-05	85

Tabela D.5 Análise de contribuição para o impacto em ecotoxicidade em água doce – cenário S0

Processos	Emissões	(kg 1,4-diclorobenzeno eq.)	Contrib. (%)
electricity, nuclear, at power plant pressure water reactor[FR, 1995-1999]	Cobalt-60[water_river]	4,73E-05	3
electricity, nuclear, at power plant pressure water reactor[CH, 1995-2002]	Cobalt-60[water_river]	0,000206	12
electricity, nuclear, at power plant pressure water reactor[UCTE, 1995-1999]	Cobalt-60[water_river]	2,81E-05	2
electricity, nuclear, at power plant boiling water reactor[CH, 1995-2002]	Cobalt-60[water_river]	0,00036	21
sugarcane production S0[BR, 2012]	Carbofuran[soil_agricultural]	0,000469	27
sugarcane production S0[BR, 2012]	Diuron[soil_agricultural]	0,000231	13
sugarcane production S0[BR, 2012]	diuron [fresh_water]	9,42E-05	5
sugarcane production S0[BR, 2012]	glyphosate [fresh_water]	3,65E-05	2
sugarcane production S0[BR, 2012]	carbofuran[water_unspecified, 1999]	0,000158	9
Total	Total	0,00163	94

Tabela D.6 Análise de contribuição para o impacto em toxicidade em saúde humana – cenário S0

Processos	Emissões	(kg 1,4-diclorobenzeno eq.)	Contrib. (%)
ammonia, steam reforming, liquid, at plant[RER, 2000-12]	Nickel[air_high population density]	7,49E-05	1
ammonia, steam reforming, liquid, at plant[RER, 2000-12]	Vanadium[air_high population density]	5,34E-05	1
copper, primary, at refinery[RLA, 1994-2003]	Arsenic[air_low population density]	0,000301	6
copper, primary, at refinery[RLA, 1994-2003]	Nickel[air_low population density]	5,92E-05	1
ferrochromium, high-carbon, 68% Cr, at plant[GLO, 1994-2003]	Chromium VI[air_low population density]	0,00102	20
heavy fuel oil, burned in refinery furnace[RER, 1980-2000]	Nickel[air_high population density]	5,06E-05	1
Single superphosphate, as P2O5, at regional storehouse[BR, 2009]	Hydrogen fluoride[air_high population density]	5,70E-05	1
sugarcane production S0[BR, 2012]	Carbofuran[soil_agricultural]	0,00114	23
sugarcane production S0[BR, 2012]	Diuron[soil_agricultural]	0,000848	17
Hydrated ethanol, S0[BR, 2012]	Nitrogen oxides[air_high population density]	9,03E-05	2
Total	Total	0,0037	74

Tabela D.7 Análise de contribuição para o impacto em aquecimento global – cenário S0

Process	Elementary flow	kg CO2 eq.	Contrib.(%)
slurry spreading, by vacuum tanker[CH, 1991-2002]	Carbon dioxide, fossil[air_low population density]	0,000473	2
ammonia, steam reforming, liquid, at plant[RER, 2000-12]	Carbon dioxide, fossil[air_high population density]	0,000592	2
natural gas, burned in industrial furnace >100kW[RER, 2000]	Carbon dioxide, fossil[air_high population density]	0,000379	1
natural gas, sweet, burned in production flare[GLO, 1999-01-2000-12]	Carbon dioxide, fossil[air_low population density]	0,00034	1
natural gas, vented[GLO, 2000]	Methane, fossil[air_low population density]	0,000468	2
operation, lorry >32t, EURO3[BR, 2012]	Carbon dioxide, fossil[air_unspecified]	0,00341	13
operation, lorry 16-32t, EURO3[BR, 2012]	Carbon dioxide, fossil[air_unspecified]	0,000554	2
Dolomite application for soil correction [BR, 2020-2035]	Carbon dioxide, fossil[air_low population density]	0,000962	4
Urea application, as N fertilizer[BR, 2020-2035]	Carbon dioxide, fossil[air_low population density]	0,000714	3
Urea application, as N fertilizer[BR, 2020-2035]	Dinitrogen monoxide[air_low population density]	0,00285	11
Filtercake application - ETC[BR, 2020-2035]	Dinitrogen monoxide[air_low population density]	0,000551	2
operation, farm machinery, diesel[BR, 2010]	Carbon dioxide, fossil[air_low population density]	0,00287	11
sugarcane production S0[BR, 2012]	Dinitrogen monoxide[air_low population density]	0,00458	17
Hydrated ethanol, S0[BR, 2012]	Dinitrogen monoxide[air_high population density]	0,00124	5
Hydrated ethanol, S0[BR, 2012]	Methane, biogenic[air_high population density]	0,000779	3
car operation, with hydrated ethanol, 1G S0[BR, 2012]	Dinitrogen monoxide[air_high population density]	0,000775	3
Vinasse transport and application[1G]_sem concentração[BR]	Dinitrogen monoxide[air_low population density]	0,00145	5
Total	Total	0,023	85

Tabela D.8 Análise de contribuição para o impacto em eutrofização – cenário S1

Processos	Emissões	(kg PO4--- eq.)	Contrib. (%)
operation, lorry >32t, EURO3[BR, 2012]	Nitrogen oxides[air_unspecified]	4,24E-06	6
Urea application, as N fertilizer[BR, 2020-2035]	Ammonia[air_low population density]	4,36E-05	59
Urea application, as N fertilizer[BR, 2020-2035]	Dinitrogen monoxide[air_low population density]	1,94E-06	3
operation, farm machinery, diesel[BR, 2010]	Nitrogen oxides[air_low population density]	2,66E-06	4
car operation, with hydrated ethanol, 1G sem ETC RC[BR, 2020-2035]	Nitrogen oxides[air_high population density]	2,29E-06	3
hydrated ethanol, 1G, from sugarcane_SEM_ETC[BR]	Dinitrogen monoxide[air_high population density]	1,33E-06	2
Copy of hydrated ethanol, 1G, from sugarcane_SEM_ETC[BR]	Nitrogen oxides[air_high population density]	1,15E-05	16
Total	Total	6,76E-05	91

Tabela D.9 Análise de contribuição para o impacto em acidificação – cenário S1

Processos	Emissões	(kg SO2 eq.)	Contrib. (%)
operation, lorry >32t, EURO3[BR, 2012]	Nitrogen oxides[air_unspecified]	1,63E-05	5
Urea application, as N fertilizer[BR, 2020-2035]	Ammonia[air_low population density]	0,000199	65
operation, farm machinery, diesel[BR, 2010]	Nitrogen oxides[air_low population density]	1,02E-05	3
car operation, with hydrated ethanol, 1G sem ETC RC[BR, 2020-2035]	Nitrogen oxides[air_high population density]	8,80E-06	3
hydrated ethanol, 1G, from sugarcane_SEM_ETC[BR]	Nitrogen oxides[air_high population density]	4,44E-05	14
Total	Total	0,000279	91

Tabela D.10 Análise de contribuição para o impacto em oxidação fotoquímica – cenário S1

Processos	Emissões	(kg etileno eq.)	Contrib.(%)
car operation, with hydrated ethanol, 1G sem ETC RC[BR, 2020-2035]	Carbon monoxide, fossil[air_high population density]	7,02E-06	21
hydrated ethanol, 1G, from sugarcane_SEM_ETC[BR]	Carbon monoxide, biogenic[air_high population density]	2,41E-06	7
hydrated ethanol, 1G, from sugarcane_SEM_ETC[BR]	Ethanol[air_high population density]	2,22E-05	66
Total	Total	3,16E-05	93

Tabela D.11 Análise de contribuição para o impacto em ecotoxicidade terrestre – cenário S1

Processos	Emissões	(kg 1,4-diclorobenzeno eq.)	Contrib.(%)
ammonia, steam reforming, liquid, at plant[RER, 2000-12]	Vanadium[air_high population density]	4,28E-06	7
cast iron, at plant[RER, 2001-2002]	Mercury[air_unspecified]	1,24E-06	2
copper, primary, at refinery[RLA, 1994-2003]	Arsenic[air_low population density]	8,78E-07	1
ferrochromium, high-carbon, 68% Cr, at plant[GLO, 1994-2003]	Chromium[air_low population density]	2,57E-05	40
ferrochromium, high-carbon, 68% Cr, at plant[GLO, 1994-2003]	Chromium VI[air_low population density]	6,42E-07	1
steel, electric, un- and low-alloyed, at plant[RER, 2001]	Mercury[air_unspecified]	4,91E-06	8
heavy fuel oil, burned in refinery furnace[RER, 1980-2000]	Vanadium[air_high population density]	1,34E-06	2
disposal, drilling waste, 71.5% water, to landfarming[CH, 2000-01-2000-12]	Chromium[soil_industrial]	8,35E-07	1
ammonia, partial oxidation, liquid, at plant[BR]	Vanadium[air_high population density]	2,74E-06	4
aplicação de herbicida, cana planta[BR, 2020-2035]	Carbofuran[soil_agricultural]	3,13E-06	5
aplicação de herbicida, cana planta[BR, 2020-2035]	Diuron[soil_agricultural]	9,46E-06	15
Total	Total	5,51E-05	86

Tabela D.12 Análise de contribuição para o impacto em ecotoxicidade em água doce – cenário S1

Processos	Emissões	(kg 1,4-diclorobenzeno eq.)	Contrib.(%)
electricity, nuclear, at power plant pressure water reactor[FR, 1995-1999]	Cobalt-60[water_river]	4,08E-05	3
discharge, produced water, onshore[GLO, 1980-2000]	Barium[water_river]	1,23E-05	1
electricity, nuclear, at power plant pressure water reactor[CH, 1995-2002]	Cobalt-60[water_river]	0,00018	15
electricity, nuclear, at power plant pressure water reactor[UCTE, 1995-1999]	Cobalt-60[water_river]	2,32E-05	2
electricity, nuclear, at power plant boiling water reactor[CH, 1995-2002]	Cobalt-60[water_river]	0,000315	26
dessecação da soqueira antiga_RC[BR, 2020-2035]	glyphosate [fresh_water]	3,56E-05	3
aplicação de herbicida, cana planta[BR, 2020-2035]	Carbofuran[soil_agricultural]	0,000244	20
aplicação de herbicida, cana planta[BR, 2020-2035]	Diuron[soil_agricultural]	0,000144	12
aplicação de herbicida, cana planta[BR, 2020-2035]	diuron [fresh_water]	5,97E-05	5
aplicação de herbicida, cana planta[BR, 2020-2035]	carbofuran[water_unspecified, 1999]	8,37E-05	7
Total	Total	0,00114	95

Tabela D.13 Análise de contribuição para o impacto em toxicidade em saúde humana – cenário S1

Processos	Emissões	(kg 1,4-diclorobenzeno eq.)	Contrib. (%)
ammonia, steam reforming, liquid, at plant[RER, 2000-12]	Nickel[air_high population density]	5,63E-05	2
ammonia, steam reforming, liquid, at plant[RER, 2000-12]	Vanadium[air_high population density]	4,01E-05	1
copper, primary, at refinery[RLA, 1994-2003]	Arsenic[air_low population density]	0,00019	6
copper, primary, at refinery[RLA, 1994-2003]	Nickel[air_low population density]	3,74E-05	1
ferrochromium, high-carbon, 68% Cr, at plant[GLO, 1994-2003]	Chromium VI[air_low population density]	0,000725	22
heavy fuel oil, burned in refinery furnace[RER, 1980-2000]	Nickel[air_high population density]	3,73E-05	1
discharge, produced water, onshore[GLO, 1980-2000]	Barium[water_river]	3,41E-05	1
ammonia, partial oxidation, liquid, at plant[BR]	Nickel[air_high population density]	3,61E-05	1
operation, lorry >32t, EURO3[BR, 2012]	Copper[air_unspecified]	3,64E-05	1
operation, lorry >32t, EURO3[BR, 2012]	Nitrogen oxides[air_unspecified]	3,91E-05	1
aplicação de herbicida, cana planta[BR, 2020-2035]	Carbofuran[soil_agricultural]	0,000594	18
aplicação de herbicida, cana planta[BR, 2020-2035]	Diuron[soil_agricultural]	0,00053	16
hydrated ethanol, 1G, from sugarcane_SEM_ETC[BR]	Nitrogen oxides[air_high population density]	0,000106	3
Total	Total	0,00246	75

Tabela D.14 Análise de contribuição para o impacto em aquecimento global – cenário S1

Processos	Emissões	(kg CO2 eq.)	Contrib.(%)
ammonia, steam reforming, liquid, at plant[RER, 2000-12]	Carbon dioxide, fossil[air_high population density]	0,000445	2
diesel, burned in building machine[GLO, 1996-2001]	Carbon dioxide, fossil[air_unspecified]	0,000202	1
pig iron, at plant[GLO, 1999-2002]	Carbon dioxide, fossil[air_unspecified]	0,000216	1
natural gas, burned in industrial furnace >100kW[RER, 2000]	Carbon dioxide, fossil[air_high population density]	0,000287	1
natural gas, sweet, burned in production flare[GLO, 1999-01-2000-12]	Carbon dioxide, fossil[air_low population density]	0,000268	1
natural gas, vented[GLO, 2000]	Methane, fossil[air_low population density]	0,000363	2
operation, lorry 16-32t, EURO3[RER, 2005]	Carbon dioxide, fossil[air_unspecified]	0,00027	1
operation, lorry >32t, EURO3[BR, 2012]	Carbon dioxide, fossil[air_unspecified]	0,00373	19
Dolomite application for soil correction [BR, 2020-2035]	Carbon dioxide, fossil[air_low population density]	0,00127	6
Urea application, as N fertilizer[BR, 2020-2035]	Carbon dioxide, fossil[air_low population density]	0,000538	3
Urea application, as N fertilizer[BR, 2020-2035]	Dinitrogen monoxide[air_low population density]	0,00214	11
Vinasse transport and application[1G][BR, 2020-2035]	Dinitrogen monoxide[air_low population density]	0,000689	4
trash left in the field[BR, 2020-2035]	Dinitrogen monoxide[air_low population density]	0,000779	4
sugarcane roots in the field[BR, 2020-2035]	Dinitrogen monoxide[air_low population density]	0,000802	4
operation, farm machinery, diesel[BR, 2010]	Carbon dioxide, fossil[air_low population density]	0,0015	8
car operation, with hydrated ethanol, 1G sem ETC RC[BR, 2020-2035]	Dinitrogen monoxide[air_high population density]	0,000775	4
hydrated ethanol, 1G, from sugarcane_SEM_ETC[BR]	Dinitrogen monoxide[air_high population density]	0,00147	7
hydrated ethanol, 1G, from sugarcane_SEM_ETC[BR]	Methane, biogenic[air_high population density]	0,000922	5
Total	Total	0,0167	85

Tabela D.15 Análise de contribuição para o impacto em eutrofização – cenário S2

Processos	Emissões	(kg PO4--- eq.)	Contrib.(%)
operation, lorry >32t, EURO3[BR, 2012]	Nitrogen oxides[air_unspecified]	4,23E-06	6
Urea application, as N fertilizer[BR, 2020-2035]	Ammonia[air_low population density]	4,27E-05	60
Urea application, as N fertilizer[BR, 2020-2035]	Dinitrogen monoxide[air_low population density]	1,90E-06	3
sugarcane roots in the field[BR, 2020-2035]	Dinitrogen monoxide[air_low population density]	7,27E-07	1
operation, farm machinery, diesel[BR, 2010]	Nitrogen oxides[air_low population density]	1,35E-06	2
car operation, with hydrated ethanol, 1G ETC RC[BR, 2020-2035]	Nitrogen oxides[air_high population density]	2,29E-06	3
hydrated ethanol, 1G, from sugarcane_ETC[BR]	Dinitrogen monoxide[air_high population density]	1,33E-06	2
hydrated ethanol, 1G, from sugarcane_ETC[BR]	Nitrogen oxides[air_high population density]	1,15E-05	16
Total	Total	6,61E-05	93

Tabela D.16 Análise de contribuição para o impacto em acidificação – cenário S2

Processos	Emissões	(kg SO2 eq.)	Contrib.(%)
operation, lorry >32t, EURO3[BR, 2012]	Nitrogen oxides[air_unspecified]	1,63E-05	6
Urea application, as N fertilizer[BR, 2020-2035]	Ammonia[air_low population density]	0,000195	66
operation, farm machinery, diesel[BR, 2010]	Nitrogen oxides[air_low population density]	5,21E-06	2
car operation, with hydrated ethanol, 1G ETC RC[BR, 2020-2035]	Nitrogen oxides[air_high population density]	8,80E-06	3
hydrated ethanol, 1G, from sugarcane_ETC[BR]	Nitrogen oxides[air_high population density]	4,44E-05	15
Total	Total	0,00027	91

Tabela D.17 Análise de contribuição para o impacto em oxidação fotoquímica – cenário S2

Processos	Emissões	(kg etileno eq.)	Contrib.(%)
car operation, with hydrated ethanol, 1G ETC RC[BR, 2020-2035]	Carbon monoxide, fossil[air_high population density]	7,02E-06	21
hydrated ethanol, 1G, from sugarcane_ETC[BR]	Carbon monoxide, biogenic[air_high population density]	2,41E-06	7
hydrated ethanol, 1G, from sugarcane_ETC[BR]	Ethanol[air_high population density]	2,22E-05	66
Total	Total	3,16E-05	94

Tabela D.18 Análise de contribuição para o impacto em toxicidade terrestre – cenário S2

Processos	Emissões	(kg 1,4-diclorobenzeno eq.)	Contrib.(%)
ammonia, steam reforming, liquid, at plant[RER, 2000-12]	Vanadium[air_high population density]	4,19E-06	8
cast iron, at plant[RER, 2001-2002]	Mercury[air_unspecified]	1,22E-06	2
copper, primary, at refinery[RLA, 1994-2003]	Arsenic[air_low population density]	6,86E-07	1
ferrochromium, high-carbon, 68% Cr, at plant[GLO, 1994-2003]	Chromium[air_low population density]	1,78E-05	34
steel, electric, un- and low-alloyed, at plant[RER, 2001]	Mercury[air_unspecified]	4,72E-06	9
natural gas, sweet, burned in production flare[GLO, 1999-01-2000-12]	Mercury[air_low population density]	5,46E-07	1
heavy fuel oil, burned in refinery furnace[RER, 1980-2000]	Vanadium[air_high population density]	1,16E-06	2
disposal, drilling waste, 71.5% water, to landfarming[CH, 2000-01-2000-12]	Chromium[soil_industrial]	7,50E-07	1
ammonia, partial oxidation, liquid, at plant[BR]	Vanadium[air_high population density]	2,68E-06	5
aplicação de herbicida, cana planta[BR, 2020-2035]	Carbofuran[soil_agricultural]	2,61E-06	5
aplicação de herbicida, cana planta[BR, 2020-2035]	Diuron[soil_agricultural]	7,90E-06	15
Total	Total	4,43E-05	85

Tabela D.19 Análise de contribuição para o impacto em ecotoxicidade em água doce – cenário S2

Processos	Emissões	(kg 1,4-diclorobenzeno eq.)	Contrib.(%)
ammonia, steam reforming, liquid, at plant[RER, 2000-12]	Vanadium[air_high population density]	1,09E-05	1
electricity, nuclear, at power plant pressure water reactor[FR, 1995-1999]	Cobalt-60[water_river]	3,55E-05	4
discharge, produced water, onshore[GLO, 1980-2000]	Barium[water_river]	1,10E-05	1
electricity, nuclear, at power plant pressure water reactor[CH, 1995-2002]	Cobalt-60[water_river]	0,000149	15
electricity, nuclear, at power plant pressure water reactor[UCTE, 1995-1999]	Cobalt-60[water_river]	2,05E-05	2
electricity, nuclear, at power plant boiling water reactor[CH, 1995-2002]	Cobalt-60[water_river]	0,00026	26
dessecação da soqueira antiga_RC[BR, 2020-2035]	Glyphosate [fresh_water]	2,97E-05	3
aplicação de herbicida, cana planta[BR, 2020-2035]	Carbofuran[soil_agricultural]	0,000204	20
aplicação de herbicida, cana planta[BR, 2020-2035]	Diuron[soil_agricultural]	0,00012	12
aplicação de herbicida, cana planta[BR, 2020-2035]	Diuron [fresh_water]	4,99E-05	5
aplicação de herbicida, cana planta[BR, 2020-2035]	carbofuran[water_unspecified, 1999]	6,99E-05	7
Total	Total	0,00096	96

Tabela D.20 Análise de contribuição para o impacto em toxicidade em saúde humana – cenário S2

Processos	Emissões	(kg 1,4-diclorobenzeno eq.)	Contrib.(%)
ammonia, steam reforming, liquid, at plant[RER, 2000-12]	Nickel[air_high population density]	5,51E-05	2
ammonia, steam reforming, liquid, at plant[RER, 2000-12]	Vanadium[air_high population density]	3,93E-05	1
copper, primary, at refinery[RLA, 1994-2003]	Arsenic[air_low population density]	0,000148	6
copper, primary, at refinery[RLA, 1994-2003]	Nickel[air_low population density]	2,92E-05	1
ferrochromium, high-carbon, 68% Cr, at plant[GLO, 1994-2003]	Chromium VI[air_low population density]	0,000503	19
heavy fuel oil, burned in refinery furnace[RER, 1980-2000]	Nickel[air_high population density]	3,22E-05	1
discharge, produced water, onshore[GLO, 1980-2000]	Barium[water_river]	3,03E-05	1
ammonia, partial oxidation, liquid, at plant[BR]	Nickel[air_high population density]	3,54E-05	1
operation, lorry >32t, EURO3[BR, 2012]	Copper[air_unspecified]	3,63E-05	1
operation, lorry >32t, EURO3[BR, 2012]	Nitrogen oxides[air_unspecified]	3,90E-05	1
aplicação de herbicida, cana planta[BR, 2020-2035]	Carbofuran[soil_agricultural]	0,000496	18
aplicação de herbicida, cana planta[BR, 2020-2035]	Diuron[soil_agricultural]	0,000442	16
hydrated ethanol, 1G, from sugarcane_ETC[BR]	Nitrogen oxides[air_high population density]	0,000106	4
Total	Total	0,00199	74

Tabela D.21 Análise de contribuição para o impacto em aquecimento global – cenário S2

Processos	Emissões	(kg CO2 eq.)	Contrib.(%)
ammonia, steam reforming, liquid, at plant[RER, 2000-12]	Carbon dioxide, fossil[air_high population density]	0,000436	2
diesel, burned in building machine[GLO, 1996-2001]	Carbon dioxide, fossil[air_unspecified]	0,000197	1
natural gas, burned in industrial furnace >100kW[RER, 2000]	Carbon dioxide, fossil[air_high population density]	0,000257	1
natural gas, sweet, burned in production flare[GLO, 1999-01-2000-12]	Carbon dioxide, fossil[air_low population density]	0,000236	1
natural gas, vented[GLO, 2000]	Methane, fossil[air_low population density]	0,000316	2
operation, lorry 16-32t, EURO3[RER, 2005]	Carbon dioxide, fossil[air_unspecified]	0,000221	1
operation, lorry >32t, EURO3[BR, 2012]	Carbon dioxide, fossil[air_unspecified]	0,00373	21
Dolomite application for soil correction [BR, 2020-2035]	Carbon dioxide, fossil[air_low population density]	0,00106	6
Urea application, as N fertilizer[BR, 2020-2035]	Carbon dioxide, fossil[air_low population density]	0,000527	3
Urea application, as N fertilizer[BR, 2020-2035]	Dinitrogen monoxide[air_low population density]	0,0021	12
Vinasse transport and application[1G][BR, 2020-2035]	Dinitrogen monoxide[air_low population density]	0,000689	4
trash left in the field[BR, 2020-2035]	Dinitrogen monoxide[air_low population density]	0,000779	4
sugarcane roots in the field[BR, 2020-2035]	Dinitrogen monoxide[air_low population density]	0,000802	4
operation, farm machinery, diesel[BR, 2010]	Carbon dioxide, fossil[air_low population density]	0,000765	4
car operation, with hydrated ethanol, 1G ETC RC[BR, 2020-2035]	Dinitrogen monoxide[air_high population density]	0,000775	4
hydrated ethanol, 1G, from sugarcane_ETC[BR]	Dinitrogen monoxide[air_high population density]	0,00147	8
hydrated ethanol, 1G, from sugarcane_ETC[BR]	Methane, biogenic[air_high population density]	0,000922	5
Total	Total	0,0153	85

Tabela D.22 Análise de contribuição para o impacto em eutrofização – cenário S3

Processos	Emissões	(kg PO4--- eq.)	Contrib.(%)
operation, lorry >32t, EURO3[BR, 2012]	Nitrogen oxides[air_unspecified]	4,19E-06	6
Urea aplication, as N fertilizer[BR, 2020-2035]	Ammonia[air_low population density]	4,27E-05	58
Urea aplication, as N fertilizer[BR, 2020-2035]	Dinitrogen monoxide[air_low population density]	1,90E-06	3
operation, farm machinery, diesel[BR, 2010]	Nitrogen oxides[air_low population density]	2,60E-06	4
car operation, with hydrated ethanol, 1G2G sem ETC RC[BR, 2020-2035]	Nitrogen oxides[air_high population density]	2,29E-06	3
cellulase enzyme production [1g2gsemETC][BR, 2020-2035]	phosphate[soil_agricultural]	3,27E-06	4
hydrated ethanol, 1G2G, from sugarcane_SEM_ETC[BR]	Dinitrogen monoxide[air_high population density]	9,40E-07	1
hydrated ethanol, 1G2G, from sugarcane_SEM_ETC[BR]	Nitrogen oxides[air_high population density]	8,18E-06	11
Total	Total	6,60E-05	90

Tabela D.23 Análise de contribuição para o impacto em acidificação – cenário S3

Processos	Emissões	(kg SO2 eq.)	Contrib.(%)
secondary sulphur, at refinery[RER, 1980-2000]	Sulfur dioxide[air_high population density]	4,79E-06	2
Sulphuric acid, liquid, at plant[BR, 2009]	Sulfur dioxide[air_high population density]	3,99E-06	1
operation, lorry >32t, EURO3[BR, 2012]	Nitrogen oxides[air_unspecified]	1,61E-05	5
Urea aplication, as N fertilizer[BR, 2020-2035]	Ammonia[air_low population density]	0,000195	64
operation, farm machinery, diesel[BR, 2010]	Nitrogen oxides[air_low population density]	1,00E-05	3
car operation, with hydrated ethanol, 1G2G sem ETC RC[BR, 2020-2035]	Nitrogen oxides[air_high population density]	8,80E-06	3
cellulase enzyme production [1g2gsemETC][BR, 2020-2035]	Sulfur dioxide[air_high population density]	6,39E-06	2
hydrated ethanol, 1G2G, from sugarcane_SEM_ETC[BR]	Nitrogen oxides[air_high population density]	3,15E-05	10
Total	Total	0,000277	91

Tabela D.24 Análise de contribuição para o impacto em oxidação fotoquímica – cenário S3

Processos	Emissões	(kg etileno eq.)	Contrib.(%)
car operation, with hydrated ethanol, 1G2G sem ETC RC[BR, 2020-2035]	Carbon monoxide, fossil[air_high population density]	7,02E-06	16
sugarcane processing, at mill[1G2GsemETC][BR, 2020-2035]	Ethanol[air_high population density]	5,53E-06	13
cellulase enzyme production [1g2gsemETC][BR, 2020-2035]	Ethene[air_high population density]	7,00E-07	2
hydrated ethanol, 1G2G, from sugarcane_SEM_ETC[BR]	Carbon monoxide, biogenic[air_high population density]	1,71E-06	4
hydrated ethanol, 1G2G, from sugarcane_SEM_ETC[BR]	Ethanol[air_high population density]	2,51E-05	59
Total	Total	4,01E-05	94

Tabela D.25 Análise de contribuição para o impacto em ecotoxicidade terrestre – cenário S3

Processos	Emissões	(kg 1,4-diclorobenzeno eq.)	Contrib.(%)
ammonia, steam reforming, liquid, at plant[RER, 2000-12]	Vanadium[air_high population density]	4,77E-06	7
cast iron, at plant[RER, 2001-2002]	Mercury[air_unspecified]	1,24E-06	2
copper, primary, at refinery[RLA, 1994-2003]	Arsenic[air_low population density]	9,22E-07	1
ferrochromium, high-carbon, 68% Cr, at plant[GLO, 1994-2003]	Chromium[air_low population density]	2,59E-05	39
steel, electric, un- and low-alloyed, at plant[RER, 2001]	Mercury[air_unspecified]	4,89E-06	7
heavy fuel oil, burned in refinery furnace[RER, 1980-2000]	Vanadium[air_high population density]	1,38E-06	2
disposal, drilling waste, 71.5% water, to landfarming[CH, 2000-01-2000-12]	Chromium[soil_industrial]	9,45E-07	1
ammonia, partial oxidation, liquid, at plant[BR]	Vanadium[air_high population density]	2,68E-06	4
aplicação de herbicida, cana planta[BR, 2020-2035]	Carbofuran[soil_agricultural]	3,06E-06	5
aplicação de herbicida, cana planta[BR, 2020-2035]	Diuron[soil_agricultural]	9,25E-06	14
Total	Total	5,50E-05	84

Tabela D.26 Análise de contribuição para o impacto em toxicidade em água doce – cenário S3

Processos	Emissões	(kg 1,4-diclorobenzeno eq.)	Contrib.(%)
ammonia, steam reforming, liquid, at plant[RER, 2000-12]	Vanadium[air_high population density]	1,24E-05	1
electricity, nuclear, at power plant pressure water reactor[FR, 1995-1999]	Cobalt-60[water_river]	4,09E-05	3
discharge, produced water, onshore[GLO, 1980-2000]	Barium[water_river]	1,25E-05	1
electricity, nuclear, at power plant pressure water reactor[CH, 1995-2002]	Cobalt-60[water_river]	0,000179	15
electricity, nuclear, at power plant pressure water reactor[UCTE, 1995-1999]	Cobalt-60[water_river]	2,34E-05	2
electricity, nuclear, at power plant boiling water reactor[CH, 1995-2002]	Cobalt-60[water_river]	0,000314	26
dessecação da soqueira antiga_RC[BR, 2020-2035]	glyphosate [fresh_water]	3,48E-05	3
aplicação de herbicida, cana planta[BR, 2020-2035]	Carbofuran[soil_agricultural]	0,000239	20
aplicação de herbicida, cana planta[BR, 2020-2035]	Diuron[soil_agricultural]	0,000141	12
aplicação de herbicida, cana planta[BR, 2020-2035]	diuron [fresh_water]	5,84E-05	5
aplicação de herbicida, cana planta[BR, 2020-2035]	carbofuran[water_unspecified, 1999]	8,18E-05	7
Total	Total	0,00114	96

Tabela D.27 Análise de contribuição para o impacto em toxicidade em saúde humana – cenário S3

Processos	Emissões	(kg 1,4-diclorobenzeno eq.)	Contrib.(%)
ammonia, steam reforming, liquid, at plant[RER, 2000-12]	Nickel[air_high population density]	6,28E-05	2
ammonia, steam reforming, liquid, at plant[RER, 2000-12]	Vanadium[air_high population density]	4,48E-05	1
copper, primary, at refinery[RLA, 1994-2003]	Arsenic[air_low population density]	0,000199	6
copper, primary, at refinery[RLA, 1994-2003]	Nickel[air_low population density]	3,92E-05	1
ferrochromium, high-carbon, 68% Cr, at plant[GLO, 1994-2003]	Chromium VI[air_low population density]	0,000731	22
heavy fuel oil, burned in refinery furnace[RER, 1980-2000]	Nickel[air_high population density]	3,82E-05	1
discharge, produced water, onshore[GLO, 1980-2000]	Barium[water_river]	3,47E-05	1
ammonia, partial oxidation, liquid, at plant[BR]	Nickel[air_high population density]	3,53E-05	1
operation, lorry >32t, EURO3[BR, 2012]	Copper[air_unspecified]	3,60E-05	1
operation, lorry >32t, EURO3[BR, 2012]	Nitrogen oxides[air_unspecified]	3,87E-05	1
aplicação de herbicida, cana planta[BR, 2020-2035]	Carbofuran[soil_agricultural]	0,000581	18
aplicação de herbicida, cana planta[BR, 2020-2035]	Diuron[soil_agricultural]	0,000518	16
hydrated ethanol, 1G2G, from sugarcane_SEM_ETC[BR]	Nitrogen oxides[air_high population density]	7,55E-05	2
Total	Total	0,00243	74

Tabela D.28 Análise de contribuição para o impacto em aquecimento global – cenário S3

Processos	Emissões	(kg CO2 eq.)	Contrib.(%)
ammonia, steam reforming, liquid, at plant[RER, 2000-12]	Carbon dioxide, fossil[air_high population density]	0,000496	2
diesel, burned in building machine[GLO, 1996-2001]	Carbon dioxide, fossil[air_unspecified]	0,000203	1
pig iron, at plant[GLO, 1999-2002]	Carbon dioxide, fossil[air_unspecified]	0,000214	1
natural gas, burned in industrial furnace >100kW[RER, 2000]	Carbon dioxide, fossil[air_high population density]	0,0003	2
natural gas, burned in gas turbine[DE, 1990-2000]	Carbon dioxide, fossil[air_high population density]	0,001	5
natural gas, sweet, burned in production flare[GLO, 1999-01-2000-12]	Carbon dioxide, fossil[air_low population density]	0,000268	1
natural gas, vented[GLO, 2000]	Methane, fossil[air_low population density]	0,000361	2
operation, lorry 16-32t, EURO3[RER, 2005]	Carbon dioxide, fossil[air_unspecified]	0,000283	1
operation, lorry >32t, EURO3[BR, 2012]	Carbon dioxide, fossil[air_unspecified]	0,00369	18
Dolomite application for soil correction [BR, 2020-2035]	Carbon dioxide, fossil[air_low population density]	0,00124	6
Urea application, as N fertilizer[BR, 2020-2035]	Carbon dioxide, fossil[air_low population density]	0,000526	3
Urea application, as N fertilizer[BR, 2020-2035]	Dinitrogen monoxide[air_low population density]	0,0021	11
trash left in the field[BR, 2020-2035]	Dinitrogen monoxide[air_low population density]	0,000762	4
sugarcane roots in the field[BR, 2020-2035]	Dinitrogen monoxide[air_low population density]	0,000784	4
operation, farm machinery, diesel[BR, 2010]	Carbon dioxide, fossil[air_low population density]	0,00147	7
car operation, with hydrated ethanol, 1G2G sem ETC RC[BR, 2020-2035]	Dinitrogen monoxide[air_high population density]	0,000775	4
Vinasse transport and application[1G2G][BR, 2020-2035]	Dinitrogen monoxide[air_low population density]	0,000675	3
hydrated ethanol, 1G2G, from sugarcane_SEM_ETC[BR]	Dinitrogen monoxide[air_high population density]	0,00104	5
hydrated ethanol, 1G2G, from sugarcane_SEM_ETC[BR]	Methane, biogenic[air_high population density]	0,000653	3
Total	Total	0,0168	84

Tabela D.29 Análise de contribuição para o impacto em eutrofização – cenário S4

Processos	Emissões	(kg PO4--- eq.)	Contrib.(%)
operation, lorry >32t, EURO3[BR, 2012]	Nitrogen oxides[air_unspecified]	4,18E-06	6
Urea application, as N fertilizer[BR, 2020-2035]	Ammonia[air_low population density]	4,18E-05	60
Urea application, as N fertilizer[BR, 2020-2035]	Dinitrogen monoxide[air_low population density]	1,86E-06	3
sugarcane roots in the field[BR, 2020-2035]	Dinitrogen monoxide[air_low population density]	7,11E-07	1
operation, farm machinery, diesel[BR, 2010]	Nitrogen oxides[air_low population density]	1,38E-06	2
car operation, with hydrated ethanol, 1G2G ETC RC[BR]	Dinitrogen monoxide[air_high population density]	7,02E-07	1
car operation, with hydrated ethanol, 1G2G ETC RC[BR]	Nitrogen oxides[air_high population density]	2,29E-06	3
cellulase enzyme production [1g2gsemETC][BR, 2020-2035]	phosphate[soil_agricultural]	3,27E-06	5
hydrated ethanol, 1G2G, from sugarcane_ETC[BR]	Dinitrogen monoxide[air_high population density]	9,40E-07	1
hydrated ethanol, 1G2G, from sugarcane_ETC[BR]	Nitrogen oxides[air_high population density]	8,18E-06	12
Total	Total	6,53E-05	93

Tabela D.30 Análise de contribuição para o impacto em acidificação – cenário S4

Processos	Emissões	(kg SO2 eq.)	Contrib.(%)
secondary sulphur, at refinery[RER, 1980-2000]	Sulfur dioxide[air_high population density]	4,43E-06	2
Sulphuric acid, liquid, at plant[BR, 2009]	Sulfur dioxide[air_high population density]	3,82E-06	1
operation, lorry >32t, EURO3[BR, 2012]	Nitrogen oxides[air_unspecified]	1,61E-05	5
Urea application, as N fertilizer[BR, 2020-2035]	Ammonia[air_low population density]	0,000191	65
operation, farm machinery, diesel[BR, 2010]	Nitrogen oxides[air_low population density]	5,30E-06	2
car operation, with hydrated ethanol, 1G2G ETC RC[BR]	Nitrogen oxides[air_high population density]	8,80E-06	3
cellulase enzyme production [1g2gsemETC][BR, 2020-2035]	Sulfur dioxide[air_high population density]	6,39E-06	2
hydrated ethanol, 1G2G, from sugarcane_ETC[BR]	Nitrogen oxides[air_high population density]	3,15E-05	11
Total	Total	0,000267	91

Tabela D.31 Análise de contribuição para o impacto em oxidação fotoquímica – cenário S4

Processos	Emissões	(kg etileno eq.)	Contrib.(%)
car operation, with hydrated ethanol, 1G2G ETC RC[BR]	Carbon monoxide, fossil[air_high population density]	7,02E-06	16
sugarcane processing, at mill[1G2GsemETC][BR, 2020-2035]	Ethanol[air_high population density]	5,53E-06	13
cellulase enzyme production [1g2gsemETC][BR, 2020-2035]	Ethene[air_high population density]	7,00E-07	2
hydrated ethanol, 1G2G, from sugarcane_ETC[BR]	Carbon monoxide, biogenic[air_high population density]	1,71E-06	4
hydrated ethanol, 1G2G, from sugarcane_ETC[BR]	Ethanol[air_high population density]	2,51E-05	59
Total	Total	4,01E-05	94

Tabela D.32 Análise de contribuição para o impacto em ecotoxicidade terrestre – cenário S4

Processos	Emissões	(kg 1,4-diclorobenzeno eq.)	Contrib.(%)
ammonia, steam reforming, liquid, at plant[RER, 2000-12]	Vanadium[air_high population density]	4,69E-06	9
cast iron, at plant[RER, 2001-2002]	Mercury[air_unspecified]	1,22E-06	2
copper, primary, at refinery[RLA, 1994-2003]	Arsenic[air_low population density]	7,41E-07	1
ferrochromium, high-carbon, 68% Cr, at plant[GLO, 1994-2003]	Chromium[air_low population density]	1,85E-05	34
steel, electric, un- and low-alloyed, at plant[RER, 2001]	Mercury[air_unspecified]	4,69E-06	9
natural gas, sweet, burned in production flare[GLO, 1999-01-2000-12]	Mercury[air_low population density]	5,49E-07	1
heavy fuel oil, burned in refinery furnace[RER, 1980-2000]	Vanadium[air_high population density]	1,20E-06	2
disposal, drilling waste, 71.5% water, to landfarming[CH, 2000-01-2000-12]	Chromium[soil_industrial]	8,60E-07	2
ammonia, partial oxidation, liquid, at plant[BR]	Vanadium[air_high population density]	2,62E-06	5
aplicação de herbicida, cana planta[BR, 2020-2035]	Carbofuran[soil_agricultural]	2,58E-06	5
aplicação de herbicida, cana planta[BR, 2020-2035]	Diuron[soil_agricultural]	7,79E-06	14
Total	Total	4,54E-05	84

Tabela D.33 Análise de contribuição para o impacto em ecotoxicidade em água doce – cenário S4

Processos	Emissões	(kg 1,4-dichlorobenzene eq.)	Contrib.(%)
ammonia, steam reforming, liquid, at plant[RER, 2000-12]	Vanadium[air_high population density]	1,22E-05	1
electricity, nuclear, at power plant pressure water reactor[FR, 1995-1999]	Cobalt-60[water_river]	3,59E-05	4
discharge, produced water, onshore[GLO, 1980-2000]	Barium[water_river]	1,12E-05	1
electricity, nuclear, at power plant pressure water reactor[CH, 1995-2002]	Cobalt-60[water_river]	0,000149	15
electricity, nuclear, at power plant pressure water reactor[UCTE, 1995-1999]	Cobalt-60[water_river]	2,08E-05	2
electricity, nuclear, at power plant boiling water reactor[CH, 1995-2002]	Cobalt-60[water_river]	0,000261	26
dessecação da soqueira antiga_RC[BR, 2020-2035]	glyphosate [fresh_water]	2,93E-05	3
aplicação de herbicida, cana planta[BR, 2020-2035]	Carbofuran[soil_agricultural]	0,000201	20
aplicação de herbicida, cana planta[BR, 2020-2035]	Diuron[soil_agricultural]	0,000119	12
aplicação de herbicida, cana planta[BR, 2020-2035]	diuron [fresh_water]	4,92E-05	5
aplicação de herbicida, cana planta[BR, 2020-2035]	carbofuran[water_unspecified, 1999]	6,89E-05	7
Total	Total	0,000958	96

Tabela D.34 Análise de contribuição para o impacto em toxicidade em saúde humana – cenário S4

Process	Elementary flow	(kg 1,4-diclorobenzeno eq.)	Contrib.(%)
ammonia, steam reforming, liquid, at plant[RER, 2000-12]	Nickel[air_high population density]	6,16E-05	2
ammonia, steam reforming, liquid, at plant[RER, 2000-12]	Vanadium[air_high population density]	4,40E-05	2
copper, primary, at refinery[RLA, 1994-2003]	Arsenic[air_low population density]	0,00016	6
copper, primary, at refinery[RLA, 1994-2003]	Nickel[air_low population density]	3,15E-05	1
ferrochromium, high-carbon, 68% Cr, at plant[GLO, 1994-2003]	Chromium VI[air_low population density]	0,000522	19
heavy fuel oil, burned in refinery furnace[RER, 1980-2000]	Nickel[air_high population density]	3,34E-05	1
discharge, produced water, onshore[GLO, 1980-2000]	Barium[water_river]	3,11E-05	1
ammonia, partial oxidation, liquid, at plant[BR]	Nickel[air_high population density]	3,46E-05	1
operation, lorry >32t, EURO3[BR, 2012]	Copper[air_unspecified]	3,59E-05	1
operation, lorry >32t, EURO3[BR, 2012]	Nitrogen oxides[air_unspecified]	3,86E-05	1
aplicação de herbicida, cana planta[BR, 2020-2035]	Carbofuran[soil_agricultural]	0,000489	18
aplicação de herbicida, cana planta[BR, 2020-2035]	Diuron[soil_agricultural]	0,000436	16
hydrated ethanol, 1G2G, from sugarcane_ETC[BR]	Nitrogen oxides[air_high population density]	7,55E-05	3
Total	Total	0,00199	73

Tabela D.35 Análise de contribuição para o impacto em aquecimento global – cenário S4

Processos	Emissões	(kg CO2 eq.)	Contrib.(%)
ammonia, steam reforming, liquid, at plant[RER, 2000-12]	Carbon dioxide, fossil[air_high population density]	0,000488	3
diesel, burned in building machine[GLO, 1996-2001]	Carbon dioxide, fossil[air_unspecified]	0,000197	1
natural gas, burned in industrial furnace >100kW[RER, 2000]	Carbon dioxide, fossil[air_high population density]	0,000271	1
natural gas, burned in gas turbine[DE, 1990-2000]	Carbon dioxide, fossil[air_high population density]	0,001	5
natural gas, sweet, burned in production flare[GLO, 1999-01-2000-12]	Carbon dioxide, fossil[air_low population density]	0,000238	1
natural gas, vented[GLO, 2000]	Methane, fossil[air_low population density]	0,000317	2
operation, lorry 16-32t, EURO3[RER, 2005]	Carbon dioxide, fossil[air_unspecified]	0,000236	1
operation, lorry >32t, EURO3[BR, 2012]	Carbon dioxide, fossil[air_unspecified]	0,00368	20
Dolomite application for soil correction [BR, 2020-2035]	Carbon dioxide, fossil[air_low population density]	0,00105	6
Urea application, as N fertilizer[BR, 2020-2035]	Carbon dioxide, fossil[air_low population density]	0,000516	3
Urea application, as N fertilizer[BR, 2020-2035]	Dinitrogen monoxide[air_low population density]	0,00206	11
trash left in the field[BR, 2020-2035]	Dinitrogen monoxide[air_low population density]	0,000762	4
sugarcane roots in the field[BR, 2020-2035]	Dinitrogen monoxide[air_low population density]	0,000784	4
operation, farm machinery, diesel[BR, 2010]	Carbon dioxide, fossil[air_low population density]	0,000778	4
car operation, with hydrated ethanol, 1G2G ETC RC[BR]	Dinitrogen monoxide[air_high population density]	0,000775	4
Vinasse transport and application[1G2G][BR, 2020-2035]	Dinitrogen monoxide[air_low population density]	0,000675	4
hydrated ethanol, 1G2G, from sugarcane_ETC[BR]	Dinitrogen monoxide[air_high population density]	0,00104	6
hydrated ethanol, 1G2G, from sugarcane_ETC[BR]	Methane, biogenic[air_high population density]	0,000653	4
Total	Total	0,0155	84

APÊNDICE E – Impactos Ambientais do Etanol de Segunda Geração derivado de diferentes biomassas

Tabela E.1 Impactos ambientais do etanol 2G derivado de diferentes biomassas

Categorias	bagaco de cana	resíduos de milho	palha de trigo	switchgrass
depleção abiótica (comb. fósseis)	4,6E+00	2,0E+01	2,3E+01	2,6E+01
aquecimento global	4,9E-01	1,5E+00	1,7E+00	2,1E+00
toxicidade humana e ecotoxicidade	9,6E-02	4,3E-01	5,1E-01	6,0E-01
oxidação fotoquímica	1,1E-03	1,4E-03	1,4E-03	1,5E-03
acidificação	8,5E-03	1,7E-02	1,6E-02	2,2E-02
eutrofização	2,0E-03	3,3E-03	2,8E-03	3,9E-03

APÊNDICE F – Inventários do Ciclo de Vida do etanol derivado de diferentes biomassas

Tabela F.1 Inventários do Ciclo de Vida do etanol derivado de diferentes biomassas

Produto	Unidade	Bagaço	Resíduos de milho	Palha de trigo	<i>Switchgrass</i>
etanol anidro	kg	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00
Insumos					
plantio direto, cultivador rotativo	ha	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,33E-06
plantio direto, laminação	ha	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,33E-06
Irrigação	ha	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,33E-05
amoníaco	kg	0,00E+00	1,26E-03	5,47E-04	0,00E+00
ureia, como N fertilizante	kg	6,99E-05	3,73E-04	4,47E-04	8,64E-04
nitrato de amoníaco	kg	0,00E+00	3,73E-04	4,47E-04	8,64E-04
TSP, como P ₂ O ₅ fertilizante	kg	2,65E-06	1,95E-04	1,36E-04	1,39E-04
nitrato de potássio	kg	0,00E+00	2,96E-03	2,48E-03	1,63E-03
adubação por emissora	ha	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,67E-05
calcário dolomítico	kg	6,13E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
gesso	kg	3,68E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
vinhaça	m ³	2,24E-05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
torta de filtro	kg	3,46E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
cinzas	kg	2,21E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
cinzas	kg	1,84E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
palha no campo	t	5,66E-06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
raízes da cana	t	4,85E-06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
óleo diesel	kg	4,68E-05			
colhedora	kg	9,56E-07	2,61E-05	9,11E-05	0,00E+00
trator	kg	2,72E-06	1,78E-01	1,78E-01	1,78E-01
maquinas agrícolas	kg	3,97E-06	3,14E-01	3,20E-01	3,20E-01
glifosato	kg	2,94E-07	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
diuron	kg	7,35E-08	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
carbofuran	kg	7,35E-08	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
inseticidas	kg	2,94E-08	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
herbicidas	kg	1,62E-07	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
pesticidas não especificados	kg	1,47E-08	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
2,4-D, pesticida	kg	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	6,66E-06
transporte dos insumos,	tkm	4,69E-04	2,13E-04	2,87E-04	1,26E-04

caminhão 16-32t					
plantio	ha	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,33E-05
aplicação de produção para proteção da planta	ha	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,33E-05
mowing	ha	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,72E-02
enfardamento	ha	0,00E+00	1,99E-05	1,53E-01	1,72E-02
secagem	m ³	0,00E+00	2,31E-08	2,31E-08	1,89E-08
correia transportadora	m	0,00E+00	1,37E-05	1,37E-05	1,37E-05
carregamento de forragem	m ³	0,00E+00	5,48E-01	5,48E-01	4,48E-01
secagem	t	0,00E+00	4,26E-03	5,96E-03	8,88E-03
carregamento de fardos	unidade	0,00E+00	2,82E-01	2,82E-01	2,82E-01
óleo diesel para aplicação da vinhaça	kg	5,74E-06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
transporte da cana, caminhão >32t	tkm	4,93E-03	9,54E+00	9,54E+00	9,60E+00
eletricidade média voltagem	MJ	0,00E+00	1,23E+02	1,22E+02	1,26E+02
transporte, trem	tkm	0,00E+00	3,94E+01	3,94E+01	3,94E+01
transporte, navio	tkm	0,00E+00	2,23E+00	2,23E+00	2,23E+00
CaO	kg	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
H2SO4	kg	9,17E-04	9,17E-04	9,17E-04	9,17E-04
enzima	kg	1,25E-03	1,25E-03	1,25E-03	1,25E-03
aço (equipamentos)	kg	1,76E-03	1,76E-03	1,76E-03	1,76E-03
edificações	m ²	2,00E-06	2,00E-06	2,00E-06	2,00E-06
biomassa queimada na caldeira(bs)	kg	1,16E-01	1,16E-01	1,16E-01	1,16E-01
emissões para o ar					
Dióxido de carbono	kg	1,03E-03	2,33E+00	2,69E+00	2,57E+00
Óxido de nitrogênio	kg	1,76E-04	2,56E-04	2,70E-04	2,66E-04
NH3	kg	2,51E-05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Acetaldeído	kg	3,56E-12	1,53E-11	1,53E-11	1,54E-11
Amônia	kg	3,57E-09	1,54E-05	1,77E-05	1,69E-05
Benzeno	kg	3,83E-10	4,33E-05	4,41E-05	4,38E-05
Benzo(a)pyrene[air_low population density]	kg	1,58E-12	2,66E-09	6,07E-09	4,95E-09
Cádmio	kg	2,25E-12	7,86E-09	8,99E-09	8,64E-09
Monóxido de carbono, fóssil	kg	3,15E-03	1,03E-02	1,09E-02	1,07E-02
Crômio	kg	2,15E-11	5,58E-08	6,15E-08	5,98E-08
Crômio VI	kg	1,45E-14	2,10E-11	2,10E-11	2,11E-11
Cobre	kg	1,16E-09	2,60E-06	2,80E-06	2,74E-06
Óxido nitroso	kg	2,14E-08	8,34E-05	9,70E-05	9,27E-05
Etano, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC- 134a	kg	1,15E-09	1,87E-06	1,87E-06	1,88E-06
Formaldeído	kg	6,55E-12	2,81E-11	2,81E-11	2,83E-11

calor, resíduo	MJ	6,61E-03	3,36E+01	3,88E+01	3,72E+01
Chumbo	kg	5,29E-11	8,62E-08	8,63E-08	8,67E-08
Mercúrio	kg	2,91E-15	1,41E-11	1,41E-11	1,41E-11
Metano, fóssil	kg	1,30E-03	1,37E-03	1,38E-03	1,38E-03
Níquel	kg	2,21E-11	6,52E-08	7,31E-08	7,07E-08
Óxidos de nitrogênio	kg	3,14E-03	3,32E-02	3,79E-02	3,62E-02
COVNM, compostos orgânicos voláteis não-metano	kg	7,80E-08	2,38E-03	2,64E-03	2,56E-03
PAH, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos	kg	1,74E-10	2,92E-07	6,65E-07	5,45E-07
Particulados, > 10 um	kg	3,55E-03	4,24E-03	4,24E-03	4,24E-03
Particulados, > 2,5 um, e < 10um	kg	1,77E-03	2,12E-03	2,12E-03	2,12E-03
Particulados, < 2,5 um	kg	9,18E-08	1,01E-03	1,55E-03	1,38E-03
Selenio	kg	1,98E-12	7,42E-09	8,55E-09	8,19E-09
Dióxido de enxofre	kg	6,75E-08	3,76E-04	4,90E-04	4,53E-04
Tolueno	kg	7,80E-15	1,70E-05	1,70E-05	1,70E-05
Xileno	kg	6,87E-13	1,70E-05	1,70E-05	1,70E-05
Zinco	kg	5,04E-10	1,24E-06	1,24E-06	1,31E-06
Emissões para a água					
glifosato	kg	4,41E-09	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
diuron	kg	1,10E-09	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
carbofuran	kg	1,10E-09	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
N lixiviação - aplicação de ureia	kg	1,54E-05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Cádmio, íon	kg	1,04E-12	1,72E-09	1,72E-09	1,73E-09
Cromo, íon	kg	4,91E-12	8,17E-09	8,17E-09	8,22E-09
Cobre, íon	kg	6,92E-11	1,15E-07	1,15E-07	1,16E-07
Chumbo	kg	4,25E-11	7,08E-08	7,08E-08	7,12E-08
Níquel, íon	kg	1,34E-11	2,22E-08	2,22E-08	2,23E-08
Zinco, íon	kg	2,92E-09	4,86E-06	4,86E-06	4,89E-06
Emissões para o solo					
glifosato	kg	2,90E-07	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
diuron	kg	7,24E-08	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
carbofuran	kg	7,24E-08	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Cádmio	kg	1,04E-12	8,17E-09	1,40E-08	1,23E-08
Cromo	kg	4,91E-12	8,17E-09	8,17E-09	3,12E-09
Cobre	kg	6,92E-11	1,15E-07	1,15E-07	4,40E-08
Chumbo	kg	4,25E-11	9,96E-08	1,26E-07	1,19E-07
Níquel	kg	1,34E-11	2,22E-08	2,22E-08	2,23E-08
Zinco	kg	2,92E-09	1,81E-05	3,33E-05	2,90E-05

APÊNDICE G – Análise da contribuição dos processos e emissões para os impactos do etanol em cenários prospectivos

Tabela G.1 Análise de contribuição para o impacto em eutrofização – etanol derivado de *switchgrass*

Processos	Emissões	(kg PO4--- eq.)	Contrib.(%)
nitric acid, 50% in H2O, at plant[RER, 1990-01-2001-12]	Ammonia[air_high population density]	4,84E-05	1
nitric acid, 50% in H2O, at plant[RER, 1990-01-2001-12]	Dinitrogen monoxide[air_high population density]	0,000125	3
phosphoric acid, fertiliser grade, 70% in H2O, at plant[MA, 1986-01-2001-12]	Phosphate[water_ocean]	0,000148	4
operation, freight train, diesel[RER, 1998-2003]	Nitrogen oxides[air_unspecified]	9,69E-05	2
hard coal, burned in power plant[RFC, 1998-2004]	Nitrogen oxides[air_low population density]	5,05E-05	1
hard coal, burned in power plant[SERC, 1998-2004]	Nitrogen oxides[air_low population density]	4,15E-05	1
Switchgrass fertilizer 2022[US, 2022]	Ammonia[air_low population density]	0,00194	49
Switchgrass fertilizer 2022[US, 2022]	Dinitrogen monoxide[air_unspecified]	0,000198	5
cellulase enzyme production [1g2g2ETC][BR, 2020-2035]	phosphate[soil_agricultural]	0,000291	7
hydrated ethanol 2G, from switchgrass [US]	Nitrogen oxides[air_high population density]	0,000316	8
Total	Total	0,00334	85

Tabela G.2 Análise de contribuição para o impacto em acidificação – etanol derivado de *switchgrass*

Processos	Emissões	(kg SO2 eq.)	Contrib.(%)
nitric acid, 50% in H2O, at plant[RER, 1990-01-2001-12]	Ammonia[air_high population density]	0,000221	1
secondary sulphur, at refinery[RER, 1980-2000]	Sulfur dioxide[air_high population density]	0,000315	1
natural gas, sour, burned in production flare[GLO, 1999-01-2000-12]	Sulfur dioxide[air_low population density]	0,000225	1
operation, freight train, diesel[RER, 1998-2003]	Nitrogen oxides[air_unspecified]	0,000373	2
natural gas, at production[RNA, 2000-2005]	Sulfur dioxide[air_unspecified]	0,00141	6
hard coal, burned in power plant[RFC, 1998-2004]	Sulfur dioxide[air_low population density]	0,00172	8
hard coal, burned in power plant[SERC, 1998-2004]	Sulfur dioxide[air_low population density]	0,00128	6
Sulphuric acid, liquid, at plant[BR, 2009]	Sulfur dioxide[air_high population density]	0,000222	1
Switchgrass fertilizer 2022[US, 2022]	Ammonia[air_low population density]	0,00885	41
cellulase enzyme production [1g2g2ETC][BR, 2020-2035]	Sulfur dioxide[air_high population density]	0,000567	3
hydrated ethanol 2G, from switchgrass [US]	Nitrogen oxides[air_high population density]	0,00121	6
Total	Total	0,0168	78

Tabela G.3 Análise de contribuição para o impacto em oxidação fotoquímica – etanol derivado de *switchgrass*

Processos	Emissões	(kg etilene eq.)	Contrib.(%)
sinter, iron, at plant[GLO, 1999-2002]	Carbon monoxide, fossil[air_unspecified]	2,37E-05	2
natural gas, at production[RNA, 2000-2005]	Sulfur dioxide[air_unspecified]	5,62E-05	4
hard coal, burned in power plant[RFC, 1998-2004]	Sulfur dioxide[air_low population density]	6,89E-05	5
hard coal, burned in power plant[SERC, 1998-2004]	Sulfur dioxide[air_low population density]	5,12E-05	3
cellulase enzyme production [1g2g2ETC][BR, 2020-2035]	Ethene[air_high population density]	6,22E-05	4
cellulase enzyme production [1g2g2ETC][BR, 2020-2035]	Sulfur dioxide[air_high population density]	2,27E-05	2
sugarcane processing, at mill[1G2GETC][BR, 2020-2035]	Ethanol[air_high population density]	0,000302	20
hydrated ethanol 2G, from switchgrass[US]	Carbon monoxide, biogenic[air_high population density]	6,60E-05	4
hydrated ethanol 2G, from switchgrass[US]	Ethanol[air_high population density]	0,000588	40
Total	Total	0,00124	84

Tabela G.4 Análise de contribuição para o impacto em ecotoxicidade terrestre – etanol derivado de *switchgrass*

Processos	Emissões	(kg 1,4-diclorobenzeno eq.)	Contrib.(%)
ammonia, partial oxidation, liquid, at plant[RER, 2000-12]	Vanadium[air_high population density]	0,000192	2
ammonia, steam reforming, liquid, at plant[RER, 2000-12]	Vanadium[air_high population density]	0,000263	3
cast iron, at plant[RER, 2001-2002]	Mercury[air_unspecified]	0,000142	1
copper, primary, at refinery[RLA, 1994-2003]	Arsenic[air_low population density]	0,000149	1
ferrochromium, high-carbon, 68% Cr, at plant[GLO, 1994-2003]	Chromium[air_low population density]	0,00629	60
ferrochromium, high-carbon, 68% Cr, at plant[GLO, 1994-2003]	Chromium VI[air_low population density]	0,000157	2
steel, electric, un- and low-alloyed, at plant[RER, 2001]	Mercury[air_unspecified]	0,000293	3
disposal, drilling waste, 71.5% water, to landfarming[CH, 2000-01-2000-12]	Chromium[soil_industrial]	0,000109	1
heavy fuel oil, burned in power plant[IT, 1985-2000]	Vanadium[air_high population density]	0,000197	2
hard coal, burned in power plant[RFC, 1998-2004]	Mercury[air_low population density]	0,000189	2
hard coal, burned in power plant[SERC, 1998-2004]	Mercury[air_low population density]	0,000126	1
Ammonia, steam reforming, liquid, at plant/with US electricity[US]	Vanadium[air_high population density]	0,000625	6
Total	Total	0,00873	83

Tabela G.5 Análise de contribuição para o impacto em ecotoxicidade em água doce – etanol derivado de *switchgrass*

Processos	Emissões	(kg 1,4-diclorobenzeno eq.)	Contrib.(%)
ammonia, steam reforming, liquid, at plant[RER, 2000-12]	Vanadium[air_high population density]	0,000685	1
electricity, nuclear, at power plant pressure water reactor[FR, 1995-1999]	Cobalt-60[water_river]	0,00432	7
discharge, produced water, onshore[GLO, 1980-2000]	Barium[water_river]	0,000958	2
electricity, nuclear, at power plant pressure water reactor[CH, 1995-2002]	Cobalt-60[water_river]	0,0159	26
electricity, nuclear, at power plant pressure water reactor[UCTE, 1995-1999]	Cobalt-60[water_river]	0,00238	4
electricity, nuclear, at power plant boiling water reactor[CH, 1995-2002]	Cobalt-60[water_river]	0,0278	45
Ammonia, steam reforming, liquid, at plant/with US electricity[US]	Vanadium[air_high population density]	0,00163	3
Total	Total	0,0537	87

Tabela G.6 Análise de contribuição para o impacto em toxicidade em saúde humana – etanol derivado de *switchgrass*

Processos	Emissões	(kg 1,4-diclorobenzeno eq.)	Contrib.(%)
copper, primary, at refinery[RLA, 1994-2003]	Arsenic[air_low population density]	0,0321	6
copper, primary, at refinery[RLA, 1994-2003]	Nickel[air_low population density]	0,00632	1
ferrochromium, high-carbon, 68% Cr, at plant[GLO, 1994-2003]	Chromium VI[air_low population density]	0,178	34
natural gas, at consumer[RNA, 2000-2005]	Benzene[air_unspecified]	0,00875	2
hard coal, burned in power plant[RFC, 1998-2004]	Arsenic[air_low population density]	0,00657	1
hard coal, burned in power plant[RFC, 1998-2004]	Chromium VI[air_low population density]	0,0125	2
hard coal, burned in power plant[RFC, 1998-2004]	Hydrogen fluoride[air_low population density]	0,0197	4
hard coal, burned in power plant[SERC, 1998-2004]	Arsenic[air_low population density]	0,00617	1
hard coal, burned in power plant[SERC, 1998-2004]	Chromium VI[air_low population density]	0,0118	2
hard coal, burned in power plant[SERC, 1998-2004]	Hydrogen fluoride[air_low population density]	0,0185	4
hard coal, burned in power plant[WECC, 1998-2004]	Hydrogen fluoride[air_low population density]	0,00678	1
disposal, uranium tailings, non-radioactive emissions[GLO, 1980-01-2007-12]	Arsenic[air_low population density, long-term]	0,0132	3
disposal, uranium tailings, non-radioactive emissions[GLO, 1980-01-2007-12]	Chromium VI[air_low population density, long-term]	0,0159	3
Ammonia, steam reforming, liquid, at plant/with US electricity[US]	Nickel[air_high population density]	0,00822	2
Ammonia, steam reforming, liquid, at plant/with US electricity[US]	Vanadium[air_high population density]	0,00586	1
Total	Total	0,35	66

Tabela G.7 Análise de contribuição para o impacto em aquecimento global – etanol derivado de *switchgrass*

Processos	Emissões	(kg CO2 eq.)	Contrib.(%)
ammonia, steam reforming, liquid, at plant[RER, 2000-12]	Carbon dioxide, fossil[air_high population density]	0,0273	1
nitric acid, 50% in H2O, at plant[RER, 1990-01-2001-12]	Dinitrogen monoxide[air_high population density]	0,138	7
hard coal, at mine[RNA, 1990-2002]	Methane, fossil[air_low population density]	0,0212	1
lignite, burned in power plant[DE, 1993-2000]	Carbon dioxide, fossil[air_low population density]	0,029	1
pig iron, at plant[GLO, 1999-2002]	Carbon dioxide, fossil[air_unspecified]	0,0277	1
natural gas, burned in industrial furnace >100kW[RER, 2000]	Carbon dioxide, fossil[air_high population density]	0,0376	2
natural gas, burned in gas turbine[DE, 1990-2000]	Carbon dioxide, fossil[air_high population density]	0,0892	4
light fuel oil, burned in industrial furnace 1MW, non-modulating[CH, 1991-2000]	Carbon dioxide, fossil[air_high population density]	0,05	2
polyethylene, HDPE, granulate, at plant[RER, 1999-2001]	Carbon dioxide, fossil[air_high population density]	0,0269	1
operation, freight train, diesel[RER, 1998-2003]	Carbon dioxide, fossil[air_unspecified]	0,0427	2
heavy fuel oil, burned in power plant[IT, 1985-2000]	Carbon dioxide, fossil[air_high population density]	0,0231	1
natural gas, burned in power plant[US, 2004]	Carbon dioxide, fossil[air_unspecified]	0,118	6
hard coal, burned in power plant[MRO, 1998-2004]	Carbon dioxide, fossil[air_low population density]	0,0521	2
hard coal, burned in power plant[RFC, 1998-2004]	Carbon dioxide, fossil[air_low population density]	0,221	11
hard coal, burned in power plant[SERC, 1998-2004]	Carbon dioxide, fossil[air_low population density]	0,207	10
hard coal, burned in power plant[SPP, 1998-2004]	Carbon dioxide, fossil[air_low population density]	0,0476	2
hard coal, burned in power plant[WECC, 1998-2004]	Carbon dioxide, fossil[air_low population density]	0,0761	4
Ammonia, steam reforming, liquid, at plant/with US electricity[US]	Carbon dioxide, fossil[air_high population density]	0,065	3
Switchgrass fertilizer 2022[US, 2022]	Dinitrogen monoxide[air_unspecified]	0,218	10
hydrated ethanol 2G, from switchgrass[US]	Dinitrogen monoxide[air_high population density]	0,04	2
hydrated ethanol 2G, from switchgrass[US]	Methane, biogenic[air_high population density]	0,0252	1
Total	Total	1,58	76

Tabela G.8 Análise de contribuição para o impacto em eutrofização – etanol derivado de palha de trigo

Processos	Emissões	(kg PO4--- eq.)	Contrib.(%)
combine harvesting[CH, 1991-2002]	Nitrogen oxides[air_low population density]	0,000453	16
phosphoric acid, fertiliser grade, 70% in H2O, at plant[MA, 1986-01-2001-12]	Phosphate[water_ocean]	0,000114	4
operation, freight train, diesel[RER, 1998-2003]	Nitrogen oxides[air_unspecified]	9,03E-05	3
hard coal, burned in power plant[RFC, 1998-2004]	Nitrogen oxides[air_low population density]	3,56E-05	1
hard coal, burned in power plant[SERC, 1998-2004]	Nitrogen oxides[air_low population density]	2,94E-05	1
Wheat straw fertilizer 2022 [US, 2022]	Ammonia[air_low population density]	0,000836	30
Wheat straw fertilizer 2022 [US, 2022]	Dinitrogen monoxide[air_unspecified]	8,54E-05	3
cellulase enzyme production [1g2g2ETC][BR, 2020-2035]	phosphate[soil_agricultural]	0,000291	10
hydrated ethanol 2G, from wheatstraw[US, 2022]	Dinitrogen monoxide[air_high population density]	3,62E-05	1
hydrated ethanol 2G, from wheatstraw[US, 2022]	Nitrogen oxides[air_high population density]	0,000316	11
Total	Total	0,00238	86

Tabela G.9 Análise de contribuição para o impacto em acidificação – etanol derivado de palha de trigo

Processos	Emissões	(kg SO2 eq.)	Contrib.(%)
combine harvesting[CH, 1991-2002]	Nitrogen oxides[air_low population density]	0,00174	11
secondary sulphur, at refinery[RER, 1980-2000]	Sulfur dioxide[air_high population density]	0,000301	2
sour gas, burned in gas turbine, production[NO, 1991-01-2000-12]	Sulfur dioxide[air_low population density]	0,000176	1
natural gas, sour, burned in production flare[GLO, 1999-01-2000-12]	Sulfur dioxide[air_low population density]	0,000284	2
operation, freight train, diesel[RER, 1998-2003]	Nitrogen oxides[air_unspecified]	0,000347	2
natural gas, at production[RNA, 2000-2005]	Sulfur dioxide[air_unspecified]	0,000993	6
hard coal, burned in power plant[RFC, 1998-2004]	Sulfur dioxide[air_low population density]	0,00122	8
hard coal, burned in power plant[SERC, 1998-2004]	Sulfur dioxide[air_low population density]	0,000904	6
Sulphuric acid, liquid, at plant[BR, 2009]	Sulfur dioxide[air_high population density]	0,000222	1
Wheat straw fertilizer 2022 [US, 2022]	Ammonia[air_low population density]	0,00382	24
cellulase enzyme production [1g2g2ETC][BR, 2020-2035]	Sulfur dioxide[air_high population density]	0,000567	4
hydrated ethanol 2G, from wheatstraw[US, 2022]	Nitrogen oxides[air_high population density]	0,00121	8
Total	Total	0,0122	77

Tabela G.10 Análise de contribuição para o impacto em oxidação fotoquímica – etanol derivado de palha de trigo

Processos	Emissões	(kg etileno eq.)	Contrib.(%)
combine harvesting[CH, 1991-2002]	Carbon monoxide, fossil[air_low population density]	1,77E-05	1
sinter, iron, at plant[GLO, 1999-2002]	Carbon monoxide, fossil[air_unspecified]	2,17E-05	2
natural gas, at production[RNA, 2000-2005]	Sulfur dioxide[air_unspecified]	3,97E-05	3
hard coal, burned in power plant[RFC, 1998-2004]	Sulfur dioxide[air_low population density]	4,87E-05	3
hard coal, burned in power plant[SERC, 1998-2004]	Sulfur dioxide[air_low population density]	3,61E-05	3
cellulase enzyme production [1g2g2ETC][BR, 2020-2035]	Ethene[air_high population density]	6,22E-05	4
cellulase enzyme production [1g2g2ETC][BR, 2020-2035]	Sulfur dioxide[air_high population density]	2,27E-05	2
sugarcane processing, at mill[1G2GETC][BR, 2020-2035]	Ethanol[air_high population density]	0,000302	21
hydrated ethanol 2G, from wheatstraw[US, 2022]	Carbon monoxide, biogenic[air_high population density]	6,60E-05	5
hydrated ethanol 2G, from wheatstraw[US, 2022]	Ethanol[air_high population density]	0,000588	42
Total	Total	0,0012	85

Tabela G.11 Análise de contribuição para o impacto em ecotoxicidade terrestre – etanol derivado de palha de trigo

Processos	Emissões	(kg 1,4-diclorobenzeno eq.)	Contrib.(%)
combine harvesting[CH, 1991-2002]	Zinc[soil_agricultural]	0,00012	1
ammonia, steam reforming, liquid, at plant[RER, 2000-12]	Vanadium[air_high population density]	0,000107	1
copper, primary, at refinery[RLA, 1994-2003]	Arsenic[air_low population density]	0,000173	2
ferrochromium, high-carbon, 68% Cr, at plant[GLO, 1994-2003]	Chromium[air_low population density]	0,00524	60
ferrochromium, high-carbon, 68% Cr, at plant[GLO, 1994-2003]	Chromium VI[air_low population density]	0,000131	2
steel, electric, un- and low-alloyed, at plant[RER, 2001]	Mercury[air_unspecified]	0,000274	3
disposal, drilling waste, 71.5% water, to landfarming[CH, 2000-01-2000-12]	Chromium[soil_industrial]	0,000136	2
heavy fuel oil, burned in power plant[IT, 1985-2000]	Vanadium[air_high population density]	0,000144	2
hard coal, burned in power plant[RFC, 1998-2004]	Mercury[air_low population density]	0,000133	2
hard coal, burned in power plant[SERC, 1998-2004]	Mercury[air_low population density]	8,88E-05	1
Ammonia, partial oxidation, liquid, at plant/with US electricity[US]	Vanadium[air_high population density]	0,000113	1
Ammonia, steam reforming, liquid, at plant/with US electricity[US]	Vanadium[air_high population density]	0,000451	5
Total	Total	0,00711	82

Tabela G.12 Análise de contribuição para o impacto em ecotoxicidade em água doce – etanol derivado de palha de trigo

Processos	Emissões	(kg 1,4-diclorobenzeno eq.)	Contrib.(%)
electricity, nuclear, at power plant pressure water reactor[FR, 1995-1999]	Cobalt-60[water_river]	0,00392	6
discharge, produced water, onshore[GLO, 1980-2000]	Barium[water_river]	0,00133	2
electricity, nuclear, at power plant pressure water reactor[CH, 1995-2002]	Cobalt-60[water_river]	0,0164	27
electricity, nuclear, at power plant pressure water reactor[UCTE, 1995-1999]	Cobalt-60[water_river]	0,0023	4
electricity, nuclear, at power plant boiling water reactor[CH, 1995-2002]	Cobalt-60[water_river]	0,0286	47
Ammonia, steam reforming, liquid, at plant/with US electricity[US]	Vanadium[air_high population density]	0,00117	2
Total	Total	0,0537	88

Tabela G.13 Análise de contribuição para o impacto em toxicidade em saúde humana – etanol derivado de palha de trigo

Processos	Emissões	(kg 1,4-diclorobenzeno eq.)	Contrib.(%)
copper, primary, at refinery[RLA, 1994-2003]	Arsenic[air_low population density]	0,0374	8
copper, primary, at refinery[RLA, 1994-2003]	Cadmium[air_low population density]	0,00545	1
copper, primary, at refinery[RLA, 1994-2003]	Nickel[air_low population density]	0,00736	2
ferrochromium, high-carbon, 68% Cr, at plant[GLO, 1994-2003]	Chromium VI[air_low population density]	0,148	33
copper, primary, at refinery[ID, 1994-2003]	Arsenic[air_low population density]	0,0054	1
natural gas, at consumer[RNA, 2000-2005]	Benzene[air_unspecified]	0,00618	1
hard coal, burned in power plant[RFC, 1998-2004]	Arsenic[air_low population density]	0,00464	1
hard coal, burned in power plant[RFC, 1998-2004]	Chromium VI[air_low population density]	0,00884	2
hard coal, burned in power plant[RFC, 1998-2004]	Hydrogen fluoride[air_low population density]	0,0139	3
hard coal, burned in power plant[SERC, 1998-2004]	Chromium VI[air_low population density]	0,0083	2
hard coal, burned in power plant[SERC, 1998-2004]	Hydrogen fluoride[air_low population density]	0,0131	3
hard coal, burned in power plant[WECC, 1998-2004]	Hydrogen fluoride[air_low population density]	0,00479	1
disposal, uranium tailings, non-radioactive emissions[GLO, 1980-01-2007-12]	Arsenic[air_low population density, long-term]	0,00994	2
disposal, uranium tailings, non-radioactive emissions[GLO, 1980-01-2007-12]	Chromium VI[air_low population density, long-term]	0,0119	3
Ammonia, steam reforming, liquid, at plant/with US electricity[US]	Nickel[air_high population density]	0,00593	1
Total	Total	0,291	66

Tabela G.14 Análise de contribuição para o impacto em aquecimento global – etanol derivado de palha de trigo

Processos	Emissões	(kg CO2 eq.)	Contrib.(%)
combine harvesting[CH, 1991-2002]	carbon dioxide, fossil[air_low population density]	0,211	13
nitric acid, 50% in H2O, at plant[RER, 1990-01-2001-12]	Dinitrogen monoxide[air_high population density]	0,0293	2
lignite, burned in power plant[DE, 1993-2000]	Carbon dioxide, fossil[air_low population density]	0,0221	1
pig iron, at plant[GLO, 1999-2002]	Carbon dioxide, fossil[air_unspecified]	0,0253	2
natural gas, burned in industrial furnace >100kW[RER, 2000]	Carbon dioxide, fossil[air_high population density]	0,034	2
natural gas, burned in gas turbine[DE, 1990-2000]	Carbon dioxide, fossil[air_high population density]	0,0892	5
light fuel oil, burned in industrial furnace 1MW, non-modulating[CH, 1991-2000]	Carbon dioxide, fossil[air_high population density]	0,034	2
operation, freight train, diesel[RER, 1998-2003]	Carbon dioxide, fossil[air_unspecified]	0,0398	2
heavy fuel oil, burned in power plant[IT, 1985-2000]	Carbon dioxide, fossil[air_high population density]	0,0169	1
operation, lorry >32t, EURO5[RER, 2005]	Carbon dioxide, fossil[air_unspecified]	0,0185	1
natural gas, burned in power plant[US, 2004]	Carbon dioxide, fossil[air_unspecified]	0,0831	5
hard coal, burned in power plant[MRO, 1998-2004]	Carbon dioxide, fossil[air_low population density]	0,0368	2
hard coal, burned in power plant[RFC, 1998-2004]	Carbon dioxide, fossil[air_low population density]	0,156	9
hard coal, burned in power plant[SERC, 1998-2004]	Carbon dioxide, fossil[air_low population density]	0,147	9
hard coal, burned in power plant[SPP, 1998-2004]	Carbon dioxide, fossil[air_low population density]	0,0336	2
hard coal, burned in power plant[WECC, 1998-2004]	Carbon dioxide, fossil[air_low population density]	0,0538	3
Ammonia, steam reforming, liquid, at plant/with US electricity[US]	Carbon dioxide, fossil[air_high population density]	0,0469	3
Wheat straw fertilizer 2022 [US, 2022]	Dinitrogen monoxide[air_unspecified]	0,0942	6
hydrated ethanol 2G, from wheatstraw[US, 2022]	Dinitrogen monoxide[air_high population density]	0,04	2
hydrated ethanol 2G, from wheatstraw[US, 2022]	Methane, biogenic[air_high population density]	0,0252	2
Total	Total	1,24	74

Tabela G.15 Análise de contribuição para o impacto em eutrofização – etanol derivado de resíduos do milho

Processos	Emissões	(kg PO4--- eq.)	Contrib.(%)
combine harvesting[CH, 1991-2002]	Nitrogen oxides[air_low population density]	0,000129	4
phosphoric acid, fertiliser grade, 70% in H2O, at plant[MA, 1986-01-2001-12]	Phosphate[water_ocean]	0,000163	5
operation, freight train, diesel[RER, 1998-2003]	Nitrogen oxides[air_unspecified]	9,00E-05	3
hard coal, burned in power plant[RFC, 1998-2004]	Nitrogen oxides[air_low population density]	3,49E-05	1
corn stover fertilizer[US, 2022]	Ammonia[air_high population density]	0,00155	48
corn stover fertilizer[US, 2022]	Dinitrogen monoxide[air_unspecified]	0,000167	5
cellulase enzyme production [1g2g2ETC][BR, 2020-2035]	phosphate[soil_agricultural]	0,000291	9
hydrated ethanol 2G, from cornstover[US, 2022]	Dinitrogen monoxide[air_high population density]	3,62E-05	1
hydrated ethanol 2G, from cornstover[US, 2022]	Nitrogen oxides[air_high population density]	0,000316	10
Total	Total	0,00287	88

Tabela G.16 Análise de contribuição para o impacto em acidificação – etanol derivado de resíduos do milho

Processos	Emissões	(kg SO2 eq.)	Contrib.(%)
combine harvesting[CH, 1991-2002]	[E485] Nitrogen oxides[air_low population density]	0,000497	3
secondary sulphur, at refinery[RER, 1980-2000]	[E255] Sulfur dioxide[air_high population density]	0,000319	2
sour gas, burned in gas turbine, production[NO, 1991-01-2000-12]	[E547] Sulfur dioxide[air_low population density]	0,000176	1
natural gas, sour, burned in production flare[GLO, 1999-01-2000-12]	[E547] Sulfur dioxide[air_low population density]	0,000183	1
operation, freight train, diesel[RER, 1998-2003]	[E1361] Nitrogen oxides[air_unspecified]	0,000346	2
natural gas, at production[RNA, 2000-2005]	[E1423] Sulfur dioxide[air_unspecified]	0,000973	6
hard coal, burned in power plant[RFC, 1998-2004]	[E547] Sulfur dioxide[air_low population density]	0,00119	7
hard coal, burned in power plant[SERC, 1998-2004]	[E547] Sulfur dioxide[air_low population density]	0,000886	5
Sulphuric acid, liquid, at plant[BR, 2009]	[E255] Sulfur dioxide[air_high population density]	0,000222	1
corn stover fertilizer[US, 2022]	[E21] Ammonia[air_high population density]	0,00709	41
cellulase enzyme production [1g2g2ETC][BR, 2020-2035]	[E255] Sulfur dioxide[air_high population density]	0,000567	3
hydrated ethanol 2G, from cornstover[BR, 2022]	[E193] Nitrogen oxides[air_high population density]	0,00121	7
Total	Total	0,0141	82

Tabela G.17 Análise de contribuição para o impacto em oxidação fotoquímica – etanol derivado de resíduos do milho

Processos	Emissões	(kg etileno eq.)	Contrib.(%)
sinter, iron, at plant[GLO, 1999-2002]	Carbon monoxide, fossil[air_unspecified]	1,51E-05	1
natural gas, at production[RNA, 2000-2005]	Sulfur dioxide[air_unspecified]	3,89E-05	3
hard coal, burned in power plant[RFC, 1998-2004]	Sulfur dioxide[air_low population density]	4,77E-05	3
hard coal, burned in power plant[SERC, 1998-2004]	Sulfur dioxide[air_low population density]	3,54E-05	3
cellulase enzyme production [1g2g2ETC][BR, 2020-2035]	Ethene[air_high population density]	6,22E-05	5
cellulase enzyme production [1g2g2ETC][BR, 2020-2035]	Sulfur dioxide[air_high population density]	2,27E-05	2
sugarcane processing, at mill[1G2GETC][BR, 2020-2035]	Ethanol[air_high population density]	0,000302	22
hydrated ethanol 2G, from cornstover[US, 2022]	Carbon monoxide, biogenic[air_high population density]	6,60E-05	5
hydrated ethanol 2G, from cornstover[US, 2022]	Ethanol[air_high population density]	0,000588	43

Tabela G.18 Análise de contribuição para o impacto em ecotoxicidade terrestre – etanol derivado de resíduos do milho

Processos	Emissões	(kg 1,4-diclorobenzeno eq.)	Contrib.(%)
ammonia, steam reforming, liquid, at plant[RER, 2000-12]	Vanadium[air_high population density]	9,98E-05	1
copper, primary, at refinery[RLA, 1994-2003]	Arsenic[air_low population density]	0,000119	2
ferrochromium, high-carbon, 68% Cr, at plant[GLO, 1994-2003]	Chromium[air_low population density]	0,00416	56
ferrochromium, high-carbon, 68% Cr, at plant[GLO, 1994-2003]	Chromium VI[air_low population density]	0,000104	1
steel, electric, un- and low-alloyed, at plant[RER, 2001]	Mercury[air_unspecified]	0,000237	3
disposal, drilling waste, 71.5% water, to landfarming[CH, 2000-01-2000-12]	Chromium[soil_industrial]	9,07E-05	1
heavy fuel oil, burned in power plant[IT, 1985-2000]	Vanadium[air_high population density]	0,000137	2
hard coal, burned in power plant[RFC, 1998-2004]	Mercury[air_low population density]	0,000131	2
hard coal, burned in power plant[SERC, 1998-2004]	Mercury[air_low population density]	8,71E-05	1
Ammonia, partial oxidation, liquid, at plant/with US electricity[US]	Vanadium[air_high population density]	0,000259	3
Ammonia, steam reforming, liquid, at plant/with US electricity[US]	Vanadium[air_high population density]	0,00059	8
Total	Total	0,00601	81

Tabela G.19 Análise de contribuição para o impacto em toxicidade em água doce – etanol derivado de resíduos do milho

Processos	Emissões	(kg 1,4-diclorobenzeno eq.)	Contrib.(%)
electricity, nuclear, at power plant pressure water reactor[FR, 1995-1999]	Cobalt-60[water_river]	0,00301	7
discharge, produced water, onshore[GLO, 1980-2000]	Barium[water_river]	0,000784	2
electricity, nuclear, at power plant pressure water reactor[CH, 1995-2002]	Cobalt-60[water_river]	0,0106	25
electricity, nuclear, at power plant pressure water reactor[UCTE, 1995-1999]	Cobalt-60[water_river]	0,00177	4
electricity, nuclear, at power plant boiling water reactor[CH, 1995-2002]	Cobalt-60[water_river]	0,0185	43
Ammonia, partial oxidation, liquid, at plant/with US electricity[US]	Vanadium[air_high population density]	0,000675	2
Ammonia, steam reforming, liquid, at plant/with US electricity[US]	Vanadium[air_high population density]	0,00154	4
aplicação de herbicida, cana planta[BR, 2020-2035]	Carbofuran[soil_agricultural]	0,000446	1
Total	Total	0,0372	87

Tabela G.20 Análise de contribuição para o impacto em toxicidade em saúde humana – etanol derivado de resíduos do milho

Processos	Emissões	(kg 1,4-diclorobenzeno eq.)	Contrib.(%)
copper, primary, at refinery[RLA, 1994-2003]	Arsenic[air_low population density]	0,0257	7
copper, primary, at refinery[RLA, 1994-2003]	Nickel[air_low population density]	0,00505	1
ferrochromium, high-carbon, 68% Cr, at plant[GLO, 1994-2003]	Chromium VI[air_low population density]	0,117	31
natural gas, at consumer[RNA, 2000-2005]	Benzene[air_unspecified]	0,00606	2
hard coal, burned in power plant[RFC, 1998-2004]	Arsenic[air_low population density]	0,00455	1
hard coal, burned in power plant[RFC, 1998-2004]	Chromium VI[air_low population density]	0,00867	2
hard coal, burned in power plant[RFC, 1998-2004]	Hydrogen fluoride[air_low population density]	0,0137	4
hard coal, burned in power plant[SERC, 1998-2004]	Arsenic[air_low population density]	0,00428	1
hard coal, burned in power plant[SERC, 1998-2004]	Chromium VI[air_low population density]	0,00814	2
hard coal, burned in power plant[SERC, 1998-2004]	Hydrogen fluoride[air_low population density]	0,0128	3
hard coal, burned in power plant[WECC, 1998-2004]	Hydrogen fluoride[air_low population density]	0,0047	1
disposal, uranium tailings, non-radioactive emissions[GLO, 1980-01-2007-12]	Arsenic[air_low population density, long-term]	0,00918	2
disposal, uranium tailings, non-radioactive emissions[GLO, 1980-01-2007-12]	Chromium VI[air_low population density, long-term]	0,011	3
Ammonia, steam reforming, liquid, at plant/with US electricity[US]	Nickel[air_high population density]	0,00776	2
Ammonia, steam reforming, liquid, at plant/with US electricity[US]	Vanadium[air_high population density]	0,00553	1
Total	Total	0,245	65

Tabela G.21 Análise de contribuição para o impacto em aquecimento global – etanol derivado de resíduos do milho

Processos	Emissões	(kg CO2 eq.)	Contrib.(%)
combine harvesting[CH, 1991-2002]	Carbon dioxide, fossil[air_low population density]	0,0603	4
nitric acid, 50% in H2O, at plant[RER, 1990-01-2001-12]	Dinitrogen monoxide[air_high population density]	0,0245	2
lignite, burned in power plant[DE, 1993-2000]	Carbon dioxide, fossil[air_low population density]	0,0204	1
pig iron, at plant[GLO, 1999-2002]	Carbon dioxide, fossil[air_unspecified]	0,0176	1
natural gas, burned in industrial furnace >100kW[RER, 2000]	Carbon dioxide, fossil[air_high population density]	0,033	2
natural gas, burned in gas turbine[DE, 1990-2000]	Carbon dioxide, fossil[air_high population density]	0,0892	6
operation, freight train, diesel[RER, 1998-2003]	Carbon dioxide, fossil[air_unspecified]	0,0396	3
heavy fuel oil, burned in power plant[IT, 1985-2000]	Carbon dioxide, fossil[air_high population density]	0,0161	1
operation, lorry >32t, EURO5[RER, 2005]	Carbon dioxide, fossil[air_unspecified]	0,0175	1
natural gas, burned in power plant[US, 2004]	Carbon dioxide, fossil[air_unspecified]	0,0814	5
hard coal, burned in power plant[MRO, 1998-2004]	Carbon dioxide, fossil[air_low population density]	0,036	2
hard coal, burned in power plant[RFC, 1998-2004]	Carbon dioxide, fossil[air_low population density]	0,153	10
hard coal, burned in power plant[SERC, 1998-2004]	Carbon dioxide, fossil[air_low population density]	0,144	9
hard coal, burned in power plant[SPP, 1998-2004]	Carbon dioxide, fossil[air_low population density]	0,033	2
hard coal, burned in power plant[WECC, 1998-2004]	Carbon dioxide, fossil[air_low population density]	0,0527	3
Ammonia, steam reforming, liquid, at plant/with US electricity[US]	Carbon dioxide, fossil[air_high population density]	0,0614	4
corn stover fertilizer[US, 2022]	Dinitrogen monoxide[air_unspecified]	0,185	12
hydrated ethanol 2G, from cornstover[US, 2022]	Dinitrogen monoxide[air_high population density]	0,04	3
hydrated ethanol 2G, from cornstover[US, 2022]	Methane, biogenic[air_high population density]	0,0252	2
Total	Total	1,13	74

Tabela G.22 Análise de contribuição para o impacto em eutrofização – etanol derivado de resíduos da cana

Processos	Emissões	(kg PO4--- eq.)	Contrib.(%)
natural gas, burned in gas turbine[DE, 1990-2000]	Nitrogen oxides[air_high population density]	2,73E-05	1
operation, lorry >32t, EURO3[BR, 2012]	Nitrogen oxides[air_unspecified]	5,63E-05	3
Urea application, as N fertilizer[BR, 2020-2035]	Ammonia[air_low population density]	0,0011	54
Urea application, as N fertilizer[BR, 2020-2035]	Dinitrogen monoxide[air_low population density]	4,89E-05	2
hydrated ethanol 2G, from sugarcane's bagasse[BR, 2020-2035]	Dinitrogen monoxide[air_high population density]	3,62E-05	2
hydrated ethanol 2G, from sugarcane's bagasse[BR, 2020-2035]	Nitrogen oxides[air_high population density]	0,000316	15
[operation, farm machinery, diesel[BR, 2010]	Nitrogen oxides[air_low population density]	3,48E-05	2
cellulase enzyme production [1g2g2ETC][BR, 2020-2035]	phosphate[soil_agricultural]	0,000291	14
Total	Total	0,00191	94

Tabela G.23 Análise de contribuição para o impacto em acidificação – etanol derivado de resíduos da cana

Processos	Emissões	(kg SO2 eq.)	Contrib.(%)
secondary sulphur, at refinery[RER, 1980-2000]	Sulfur dioxide[air_high population density]	0,000258	3
natural gas, burned in gas turbine[DE, 1990-2000]	Nitrogen oxides[air_high population density]	0,000105	1
sour gas, burned in gas turbine, production[NO, 1991-01-2000-12]	Sulfur dioxide[air_low population density]	0,000137	2
Sulphuric acid, liquid, at plant[BR, 2009]	Sulfur dioxide[air_high population density]	0,000224	3
operation, lorry >32t, EURO3[BR, 2012]	Nitrogen oxides[air_unspecified]	0,000217	3
Urea application, as N fertilizer[BR, 2020-2035]	Ammonia[air_low population density]	0,00502	59
hydrated ethanol 2G, from sugarcane's bagasse[BR, 2020-2035]	Nitrogen oxides[air_high population density]	0,00121	14
operation, farm machinery, diesel[BR, 2010]	Nitrogen oxides[air_low population density]	0,000134	2
cellulase enzyme production [1g2g2ETC][BR, 2020-2035]	Sulfur dioxide[air_high population density]	0,000567	7
Total	Total	0,00787	93

Tabela G.24 Análise de contribuição para o impacto em oxidação fotoquímica – etanol derivado de resíduos da cana

Processos	Emissões	(kg etileno eq.)	Contrib.(%)
hydrated ethanol 2G, from sugarcane's bagasse[BR, 2020-2035]	Carbon monoxide, biogenic[air_high population density]	6,60E-05	6
hydrated ethanol 2G, from sugarcane's bagasse[BR, 2020-2035]	Ethanol[air_high population density]	0,000588	53
cellulase enzyme production [1g2g2ETC][BR, 2020-2035]	Ethene[air_high population density]	6,22E-05	6
cellulase enzyme production [1g2g2ETC][BR, 2020-2035]	Sulfur dioxide[air_high population density]	2,27E-05	2
sugarcane processing, at mill[1G2GETC][BR, 2020-2035]	Ethanol[air_high population density]	0,000302	27
Total	Total	0,00104	93

Tabela G.25 Análise de contribuição para o impacto em ecotoxicidade terrestre – etanol derivado de resíduos da cana

Processos	Emissões	(kg 1,4-diclorobenzeno eq.)	Contrib.(%)
ammonia, partial oxidation, liquid, at plant[RER, 2000-12]	Vanadium[air_high population density]	4,02E-05	3
ammonia, steam reforming, liquid, at plant[RER, 2000-12]	Vanadium[air_high population density]	0,00016	11
cast iron, at plant[RER, 2001-2002]	Mercury[air_unspecified]	1,84E-05	1
copper, primary, at refinery[RLA, 1994-2003]	Arsenic[air_low population density]	1,98E-05	1
ferrochromium, high-carbon, 68% Cr, at plant[GLO, 1994-2003]	Chromium[air_low population density]	0,000563	38
steel, electric, un- and low-alloyed, at plant[RER, 2001]	Mercury[air_unspecified]	8,18E-05	5
heavy fuel oil, burned in industrial furnace 1MW, non-modulating[RER, 1991-2000]	Vanadium[air_high population density]	1,65E-05	1
heavy fuel oil, burned in refinery furnace[RER, 1980-2000]	Vanadium[air_high population density]	2,37E-05	2
disposal, drilling waste, 71.5% water, to landfarming[CH, 2000-01-2000-12]	Chromium[soil_industrial]	2,52E-05	2
soybeans, at farm[BR, 2001-2006]	Chromium[soil_agricultural]	1,59E-05	1
ammonia, partial oxidation, liquid, at plant[BR]	Vanadium[air_high population density]	6,88E-05	5
aplicação de herbicida, cana planta[BR, 2020-2035]	Carbofuran[soil_agricultural]	6,71E-05	5
aplicação de herbicida, cana planta[BR, 2020-2035]	Diuron[soil_agricultural]	0,000199	13
Total	Total	0,0013	87

Tabela G.26 Análise de contribuição para o impacto em ecotoxicidade em água doce – etanol derivado de resíduos da cana

Processos	Emissões	(kg 1,4-diclorobenzeno eq.)	Contrib.(%)
ammonia, steam reforming, liquid, at plant[RER, 2000-12]	Vanadium[air_high population density]	0,000416	2
electricity, nuclear, at power plant pressure water reactor[FR, 1995-1999]	Cobalt-60[water_river]	0,000784	4
discharge, produced water, onshore[GLO, 1980-2000]	Barium[water_river]	0,000224	1
electricity, nuclear, at power plant pressure water reactor[CH, 1995-2002]	Cobalt-60[water_river]	0,0029	14
electricity, nuclear, at power plant pressure water reactor[UCTE, 1995-1999]	Cobalt-60[water_river]	0,000476	2
electricity, nuclear, at power plant boiling water reactor[CH, 1995-2002]	Cobalt-60[water_river]	0,00507	24
dessecação da soqueira antiga_RC[BR, 2020-2035]	glyphosate [fresh_water]	0,000533	3
aplicação de herbicida, cana planta[BR, 2020-2035]	Carbofuran[soil_agricultural]	0,00523	25
aplicação de herbicida, cana planta[BR, 2020-2035]	Diuron[soil_agricultural]	0,00303	14
aplicação de herbicida, cana planta[BR, 2020-2035]	diuron [fresh_water]	0,00126	6
Total	Total	0,0199	95

Tabela G.27 Análise de contribuição para o impacto em toxicidade huama – etanol derivado de resíduos da cana

Processos	Emissões	(kg 1,4-diclorobenzeno eq.)	Contrib.(%)
ammonia, steam reforming, liquid, at plant[RER, 2000-12]	Nickel[air_high population density]	0,0021	3
ammonia, steam reforming, liquid, at plant[RER, 2000-12]	Vanadium[air_high population density]	0,0015	2
copper, primary, at refinery[RLA, 1994-2003]	Arsenic[air_low population density]	0,00428	6
copper, primary, at refinery[RLA, 1994-2003]	Nickel[air_low population density]	0,000842	1
ferrochromium, high-carbon, 68% Cr, at plant[GLO, 1994-2003]	Chromium VI[air_low population density]	0,0159	22
ammonia, partial oxidation, liquid, at plant[BR]	Nickel[air_high population density]	0,000908	1
aplicação de herbicida, cana planta[BR, 2020-2035]	Carbofuran[soil_agricultural]	0,0127	17
aplicação de herbicida, cana planta[BR, 2020-2035]	Diuron[soil_agricultural]	0,0111	15
hydrated ethanol 2G, from sugarcane's bagasse[BR, 2020-2035]	Nitrogen oxides[air_high population density]	0,00291	4
Total	Total	0,0523	71

Tabela G.28 Análise de contribuição para o impacto em aquecimento global – etanol derivado de resíduos da cana

Processos	Emissões	(kg CO2 eq.)	Contrib.(%)
ammonia, steam reforming, liquid, at plant[RER, 2000-12]	Carbon dioxide, fossil[air_high population density]	0,0166	3
clinker, at plant[CH, 1997-2001]	Carbon dioxide, fossil[air_unspecified]	0,0055	1
natural gas, burned in industrial furnace >100kW[RER, 2000]	Carbon dioxide, fossil[air_high population density]	0,00745	2
natural gas, burned in gas turbine[DE, 1990-2000]	Carbon dioxide, fossil[air_high population density]	0,0892	18
natural gas, vented[GLO, 2000]	Methane, fossil[air_low population density]	0,00524	1
operation, lorry 16-32t, EURO3[RER, 2005]	Carbon dioxide, fossil[air_unspecified]	0,00729	1
operation, lorry >32t, EURO3[BR, 2012]	Carbon dioxide, fossil[air_unspecified]	0,0496	10
Dolomite application for soil correction [BR, 2020-2035]	Carbon dioxide, fossil[air_low population density]	0,0273	6
Urea application, as N fertilizer[BR, 2020-2035]	Carbon dioxide, fossil[air_low population density]	0,0135	3
Urea application, as N fertilizer[BR, 2020-2035]	Dinitrogen monoxide[air_low population density]	0,0539	11
trash left in the field[BR, 2020-2035]	Dinitrogen monoxide[air_low population density]	0,02	4
sugarcane roots in the field[BR, 2020-2035]	Dinitrogen monoxide[air_low population density]	0,0206	4
hydrated ethanol 2G, from sugarcane's bagasse[BR, 2020-2035]	Dinitrogen monoxide[air_high population density]	0,04	8
hydrated ethanol 2G, from sugarcane's bagasse[BR, 2020-2035]	Methane, biogenic[air_high population density]	0,0252	5
operation, farm machinery, diesel[BR, 2010]	Carbon dioxide, fossil[air_low population density]	0,0196	4
Vinasse transport and application[1G2G][BR, 2020-2035]	Dinitrogen monoxide[air_low population density]	0,0177	4
Total	Total	0,419	85