

ESTÉ EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR Cynthia Rubio
Urbano da Silva..... E APROVADA
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 29 / 7 / 2009
Arnaldo Cesar da Silva Walter
.....
ORIENTADOR

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Balanço de energia e das emissões de gases de efeito estufa da cadeia produtiva do etanol brasileiro

**Autora: Cynthia Rubio Urbano da Silva
Orientador: Arnaldo Cesar da Silva Walter**

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

Balanco de energia e das emissões de gases de efeito estufa da cadeia produtiva do etanol brasileiro

Autora: **Cinthia Rubio Urbano da Silva**
Orientador: **Arnaldo Cesar da Silva Walter**

Curso: Planejamento de Sistemas Energéticos.

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Planejamento de Sistemas Energéticos.

Campinas, 2009
S.P. – Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

Si38b Silva, Cinthia Rubio Urbano da
Balço de energia e das emissões de gases de efeito estufa da cadeia produtiva do etanol brasileiro / Cinthia Rubio Urbano da Silva. --Campinas, SP: [s.n.], 2009.

Orientador: Arnaldo Cesar da Silva Walter.
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Energia - Fontes alternativas. 2. Cana-de-açúcar. 3. Biocombustíveis. 4. Efeito estufa (Atmosfera). 5. Alcool como combustível. I. Walter, Arnaldo Cesar da Silva. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Título em Inglês: Energy and greenhouse gas emission balance of Brazilian ethanol productive chain

Palavras-chave em Inglês: Renewable energy sources, Sugarcane, Biomass energy - Brasil, Greenhouse effect, Atmospheric, Alcohol as fuel

Área de concentração: --

Titulação: Mestre em Planejamento de Sistemas Energéticos

Banca examinadora: Joaquim Eugênio Abel Seabra, Carla Kazue Nakao Cavaliero

Data da defesa: 29/7/2009

Programa de Pós Graduação: Engenharia Mecânica

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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

**Balanco de energia e das emissões de gases de
efeito estufa da cadeia produtiva do etanol
brasileiro**

Autora: **Cinthia Rubio Urbano da Silva**
Orientador: **Arnaldo Cesar da Silva Walter**

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



Prof. Dr. Arnaldo Cesar da Silva Walter
Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Mecânica



Profª. Drª. Carla Kazue Nakao Cavaliero
Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Mecânica



Dr. Joaquim Eugênio Abel Seabra
Universidade Estadual de Campinas – Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético

Campinas, 29 de julho de 2009

Dedicatória:

A todos que estiveram comigo no decorrer destes dois anos.

Agradecimentos:

A minha família, que sempre me apoiou e acreditou na minha capacidade.

À Prof. Arnaldo, pelo incentivo dado através da orientação sempre clara, da paciência, atenção e oportunidades.

À Paulo Dolzan, pelas referências de estoque de carbono em diferentes culturas.

Aos membros da banca examinadora desta dissertação, por terem colaborado com a finalização deste trabalho.

Aos docentes do curso de Planejamento de Sistemas Energéticos pela prontidão em esclarecer dúvidas.

Aos funcionários da Faculdade de Engenharia Mecânica que colaboraram com este trabalho através do cuidado com que realizam suas atividades.

Ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – pelo apoio financeiro.

Ao Antônio Bonomi, Mirna Scandiffio e Marcelo Cunha pela atenção e apoio.

A todos os meus amigos pelo convívio agradável; especialmente: Reynaldo Palacios, Vivi, Davizinho, Juan, Janaina, Andrea e meu namorado (Pablo).

Resumo

Silva, C. R.U, *Balanço de energia e das emissões de gases de efeito estufa da cadeia produtiva do etanol brasileiro*, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2009. 134p. Dissertação (Mestrado)

A busca por combustíveis que substituam fontes fósseis tem incentivado a produção de biocombustíveis, especialmente para o setor de transporte. O objetivo deste trabalho é fazer os balanços de energia e das emissões de gases de efeito estufa do etanol derivado da cana de açúcar produzido no Brasil. Na dissertação, foram também avaliadas as emissões de gases de efeito estufa associadas à mudança do uso do solo devido à expansão de áreas cultivadas com cana (impacto direto), bem como os fatores relacionados à distribuição do etanol para uso no Brasil e na Europa. Um cenário de uso do etanol em substituição ao biodiesel (B3) nas etapas de transporte da cana e distribuição do etanol é igualmente analisado. Os balanços abrangem as etapas de produção da cana de açúcar, transporte até as usinas, produção, distribuição e uso final do etanol anidro. A análise é realizada separadamente para cada estado brasileiro da região Centro-Sul que tem significativa produção de etanol (Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, São Paulo e Paraná). A base de dados, obtida na literatura, reflete as condições de produção no Brasil no período de 2005 a 2007. Os resultados apontam balanços favoráveis para o etanol quando usado no Brasil. Para a produção no Brasil e uso na Europa, os balanços resultaram menos favoráveis. Quando o uso do etanol passa a ser feito em substituição ao B3, os balanços são significativamente mais positivos. Os resultados levam à conclusão de que melhores balanços de energia e das emissões de gases de efeito estufa dependem basicamente do modal de

transporte para distribuição do etanol, práticas agrícolas adotadas (plantio direto ou convencional) tanto para produção da cana quanto da biomassa que foi substituída, método para cálculo das emissões de óxido nitroso associadas à aplicação de fertilizantes nitrogenados, além das produtividades agrícolas e industriais.

Palavras chave: Etanol, cana-de-açúcar, consumo energético, emissões de gases de efeito estufa

Abstract

Silva, C.R.U., *Energy and greenhouse gas emission balance of ethanol productive chain*, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2009. 134p. Dissertação (Mestrado)

The search for fuels that replace fossil resources have stimulated biofuel production, especially for the transportation sector. The goal of this work is to do balances of energy and of greenhouse gas emission of ethanol from sugar cane produced in Brazil. In this dissertation, greenhouse gas emission associate to land use change due to expansion of areas cultivated with sugar cane (direct impact), as well as how the factors related to distribution of ethanol for use in Brazil and for use in Europe, were also evaluated. Scenery of ethanol use in replace to biodiesel (B3) in the transportation of sugar cane and distribution of ethanol stages is equally analyzed. The balances embrace the stages of the sugar cane production, transportation until the mill, production, distribution and end use of the anhydrous ethanol. The analysis is done separately for each Brazilian State of the Centre-South region that has great ethanol production (Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, São Paulo and Paraná). The data base, achieved in literature, reflects the conditions Brazilians of production in the period from 2005 to 2007. The results show favorable balances for the ethanol when it is used in Brazil. In the case of production in Brazil and consumption in Europe, the balances resulted less favorable. When the ethanol use starts to be done in replace to B3, the balances are remarkably more positive. The results lead to the conclusion that better energy and greenhouse emission balance depend basically on: i) the

means of transportation to distribute the ethanol; ii) agricultural management adopted (direct or conventional planting) as for sugar cane production as for biomass production that was replaced; iii) the method to calculate the nitrous oxide emission from application of fertilizer with nitrogen, besides agricultural and industrial productions.

Key words: Renewable energy sources, Sugarcane, Biomass energy, Greenhouse effect, Alcohol as fuel

Índice

Resumo.....	vi
Abstract	viii
Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas.....	xv
Nomenclatura	xviii
Introdução.....	1
Capítulo 1.....	5
Análise do ciclo de vida e suas aplicações a biocombustíveis	5
1.1 Biocombustíveis no setor de transportes	5
1.2 Análise do ciclo de vida	6
1.1.1 Definição do Objetivo e do Escopo.....	7
1.2.2 Análise de Inventário	8
1.2.3 Avaliação de Impactos no Ciclo de Vida - AICV	10
1.2.4 Análise de Melhorias/Interpretação	11
1.3 Normas ISO para Análise do Ciclo de Vida	12
1.4 Análise do ciclo de vida de biocombustíveis	12
1.4.1 Algumas ACVs de biocombustíveis	14
1.4.2 ACVs de etanol de cana de açúcar produzido no Brasil	18
1.4.3 Comparação entre etanol produzido a partir de diferentes biomassas	23
1.5 Incompatibilidades relacionadas aos balanços de GEE de biocombustíveis	27
Capítulo 2.....	29
Fertilizantes nitrogenados e emissões de GEE	29
2.1 Emissões de NO e N ₂ O e aquecimento global	29
2.2 Metodologias utilizadas para calculo das emissões de N ₂ O devido às práticas agrícolas	31
2.2.1 Algumas referências utilizadas pelo IPCC.....	31
2.2.2 Metodologia aplicada por Crutzen	32
2.3 Comparação de resultados por diferentes metodologias	34
2.4 Influência da colheita mecanizada na absorção de nitrogênio pela planta.....	36
Capítulo 3.....	38
Balanços energéticos e de emissões de GEE.....	38
3.1 Alocação dos co-produtos	40
3.2 Uso de B3	42
3.3 Balanço Energético	43

3.3.1 Balanço energético considerando o uso do etanol no exterior	46
3.4 Balanço das emissões de gases de efeito estufa	51
3.4.1 Balanço das emissões de GEE considerando o uso do etanol no exterior	55
Capítulo 4.....	58
Emissões de GEE associadas à expansão da cana-de-açúcar.....	58
4.1 Mudança direta do uso do solo.....	59
4.2 Mudança indireta do uso do solo.....	61
4.3 Metodologia adotada para estimar emissões de GEE devido à mudança do uso do solo	62
4.3.1 Metodologia para quantificação das emissões de GEE associadas à DLUC	62
4.4 Emissões de GEE resultantes da expansão da cana de açúcar no Brasil.....	65
4.4.1 Análise das emissões de GEE associadas à substituição de diferentes biomassas por cana de açúcar.....	68
4.4.2 Análise das emissões de GEE associadas à expansão em áreas de pastagem.....	73
4.4.3 Análise das emissões de GEE associadas à expansão em áreas de Cerrado	76
4.4.4 Análise das emissões de GEE associadas à expansão da cana – estoque de carbono na camada de solo de 0-20 cm	79
Capítulo 5.....	84
Uso de etanol em substituição ao diesel.....	84
5.1 Motor ciclo diesel desenvolvido para uso de etanol	85
5.2 Balanço energético do etanol brasileiro com uso de etanol nas etapas de transporte e distribuição	86
5.2.1 Balanço Energético do etanol brasileiro exportado para a Europa com uso de etanol nas etapas de transporte e distribuição	88
5.3 Balanço das emissões de GEE do etanol brasileiro com uso de etanol nas etapas de transporte e distribuição	90
5.3.1 Balanço das emissões de GEE do etanol brasileiro exportado para a Europa com uso de etanol nas etapas de transporte e distribuição	92
5.4 Balanço energético do etanol brasileiro com uso de etanol em substituição ao diesel em sua cadeia produtiva	93
5.4.1 Balanço energético do etanol brasileiro exportado para a Europa com uso de etanol em substituição ao diesel em sua cadeia produtiva.....	96
5.5 Balanço das emissões de GEE do ciclo de vida do etanol brasileiro com uso de etanol em substituição do diesel em sua cadeia produtiva.....	98
Capítulo 6.....	100
Conclusões.....	100
6.1 Comparação entre etanol derivado de diferentes biomassas.....	100
6.2 Emissões de GEE associadas à aplicação de fertilizantes nitrogenados	101
6.3 Balanços de energia e das emissões de GEE nos estados da região Centro-Sul.....	101
6.4 Emissões de GEE associadas à expansão da cana de açúcar no Brasil.....	103
6.5 Uso de etanol em substituição ao diesel na cadeia produtiva do etanol brasileiro.....	105
6.6 Sugestões para estudos futuros.....	105
Referências bibliográficas.....	107
Anexo I	116

Dados para cálculo dos balanços de energia e das emissões de GEE	116
Anexo II.....	131
Diferentes hipóteses para alocação de co-produtos gerados pelo setor sucroalcooleiro.....	131
Anexo III	134
Dados de expansão da cana-de-açúcar no estado de São Paulo.....	134

Lista de Figuras

Figura 1.1 Estrutura de uma ACV.....	7
Figura 1.2 Ciclo de vida do etanol de cana de açúcar	13
Figura 1.3 Proposta de um modelo ideal para ACV	15
Figura 1.4 Comparação das emissões de GEE de etanol produzido por diferentes rotas	25
Figura 1.5 Balanço energético de etanol derivado de diferentes biomassas	27
Figura 2.1 Emissão de N ₂ O no ciclo de vida do etanol, considerando diferentes metodologias ...	36
Figura 3.1 Consumo energético na cadeia produtiva do etanol consumido no Brasil	44
Figura 3.2 Balanço energético do etanol de cana consumido no Brasil.....	45
Figura 3.3 Avaliação da distância até o Porto de Santos	47
Figura 3.4 Consumo de energia fóssil na cadeia produtiva do etanol brasileiro consumido na Europa	49
Figura 3.5 Balanço Energético do etanol brasileiro consumido na Europa	50
Figura 3.6 Emissões de GEE em cada etapa da cadeia produtiva do etanol produzido e usado no Brasil	53
Figura 3.7 Emissões de GEE evitadas pelo uso de etanol no Brasil	54
Figura 3.7 Emissões de GEE em cada etapa da cadeia produtiva do etanol brasileiro consumido na Europa.....	56
Figura 3.8 Emissões de GEE evitadas pelo uso de etanol brasileiro em substituição à gasolina na Europa	57
Figura 4.1 Expansão da cana de açúcar na região Centro-Sul brasileira (ha).....	60
Figura 4.1 Emissões de GEE devido à expansão da cana em áreas com diferentes biomassas	69
Figura 4.2 Participação das emissões de GEE associadas à expansão da cana no balanço das emissões de GEE do etanol produzido no estado de São Paulo.....	72
Figura 4.3 Emissões de GEE evitadas considerando a substituição de diferentes biomassas e diferentes manejos	73
Figura 4.4 Participação das emissões de GEE da expansão da cana em áreas de pasto no balanço de emissões de GEE	75
Figura 4.5 Emissões de GEE evitadas considerando expansão em áreas de pastagem	76
Figura 4.6 Participação das emissões de GEE da expansão da cana em áreas de Cerrado no balanço de emissões de GEE.....	78
Figura 4.7 Emissões de GEE evitadas considerando a substituição de Cerrado.....	79
Figura 4.8 Emissões de GEE associadas à expansão da cana em diferentes áreas (0-20cm de profundidade)	81
Figura 4.9 Fator de emissão de GEE referentes à expansão da cana (faixa de 0-20cm).....	82
Figura 4.10 Emissões de GEE evitadas, considerando as emissões da expansão (0-20cm)	83

Figura 5.1 Consumo energético do etanol com uso de etanol no transporte e distribuição	87
Figura 5.2 Balanço Energético do etanol com uso de etanol no transporte e distribuição.....	87
Figura 5.3 Consumo energético do etanol brasileiro exportado para a Europa, considerando o uso de etanol no caminhão	89
Figura 5.4 Balanço energético do etanol brasileiro, consumido na Europa, com uso de etanol nas etapas de transporte e distribuição	89
Figura 5.5 Emissões de GEE em cada etapa do ciclo de vida do etanol com uso de etanol no transporte e distribuição	90
Figura 5.6 Emissões de GEE evitas pelo uso de etanol com o uso de etanol nas etapas de transporte e distribuição	91
Figura 5.7 Emissões de GEE em cada etapa da cadeia produtiva do etanol brasileiro consumido na Europa considerando o uso etanol no transporte e distribuição	92
Figura 5.8 Emissões de GEE evitadas pelo uso de etanol quando o uso de etanol é feito nas etapas de transporte e distribuição	93
Figura 5.9 Consumo de energia em cada etapa da cadeia produtiva do etanol com uso de etanol em substituição ao diesel em todas as etapas	94
Figura 5.10 Comparação dos balanços energéticos do etanol produzido e consumido em Goiás, Mato Grosso do Sul e Mato Grosso	95
Figura 5.11 Comparação dos balanços energéticos do etanol produzido e consumido em Minas Gerais, São Paulo e Paraná.....	96
Figura 5.12 Comparação dos balanços energéticos do etanol usado na Europa e produzido em Goiás, Mato Grosso do Sul e Mato Grosso.....	97
Figura 5.13 Comparação dos balanços energéticos do etanol usado na Europa e produzido em Minas Gerais, São Paulo e Paraná.....	97
Figura 5.14 Comparação das emissões de GEE evitadas pelo uso de etanol em substituição ao diesel em Goiás, Mato Grosso do Sul e Mato Grosso.....	98
Figura 5.14 Comparação das emissões de GEE evitadas pelo uso de etanol em substituição ao diesel em Minas Gerais, São Paulo e Paraná	99
Figura A 2.1 Análise sensitiva do balanço energético do etanol considerando diferentes hipóteses para alocação de créditos dos co-produtos	132
Figura A 2.2 Análise sensitiva das emissões de GEE evitadas pelo uso de etanol considerando diferentes hipóteses para alocação de créditos dos co-produtos	133

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 Balanço de energia e emissões de GEE evitadas em usinas de etanol de milho nos US	17
Tabela 1.2 Comparação dos balanços energéticos de etanol nas condições brasileiras de produção e consumo.....	20
Tabela 1.3 Comparação dos balanços das emissões de GEE de etanol nas condições brasileiras de produção.....	22
Tabela 1.4 Fatores de emissão (gCO ₂ eq/MJ)	24
Tabela 2.1 Uso de nitrogênio no cultivo da cana de açúcar – gramas de nitrogênio por kg de cana de açúcar.....	35
Tabela 3.1 Consumo energético e distâncias para transporte do etanol até os portos.....	48
Tabela 3.2 Distâncias e consumo energético para exportação do etanol	49
Tabela 3.3 Fatores de emissão de GEE nos ciclos de vida do diesel e do Biodiesel	52
Tabela 3.4 Fator de emissão para exportação do etanol (gCO ₂ eq/MJ)	56
Tabela 4.1 Estoque de carbono no solo e na biomassa de acordo com a classe de solo e profundidade do solo (tC/ha).....	66
Tabela 4.2 Fator de emissão de GEE da expansão da cana de açúcar – média ponderada	71
Tabela 4.3 Fatores de emissão de GEE associados à expansão da cana em áreas de pasto e solo Latossolo	74
Tabela 4.4 Fatores de emissões de GEE associados substituição de Cerrado por cana.....	77
Tabela A 1.1 Consumo energético na cadeia produtiva do etanol produzido em Minas Gerais (MJ/MJ).....	116
Tabela A 1.2 Consumo energético na cadeia produtiva do etanol produzido em Goiás (MJ/MJ)	117
Tabela A 1.3 Consumo energético na cadeia produtiva do etanol produzido em Mato Grosso do Sul (MJ/MJ).....	117
Tabela A 1.4 Consumo energético na cadeia produtiva do etanol produzido em Mato Grosso (MJ/MJ).....	118
Tabela A 1.5 Consumo energético na cadeia produtiva do etanol produzido em São Paulo (MJ/MJ).....	118
Tabela A 1.6 Consumo energético na cadeia produtiva do etanol produzido em Paraná (MJ/MJ)	119
Tabela A 1.7 Emissões de GEE na cadeia produtiva do etanol produzido em Minas Gerais (gCO ₂ eq/MJ)	120
Tabela A 1.8 Emissões de GEE na cadeia produtiva do etanol produzido em Goiás (gCO ₂ eq/MJ)	121

Tabela A 1.9 Emissões de GEE na cadeia produtiva do etanol produzido em Mato Grosso do Sul (gCO ₂ eq/MJ)	122
Tabela A 1.10 Emissões de GEE na cadeia produtiva do etanol produzido em Mato Grosso (gCO ₂ eq/MJ)	123
Tabela A 1.11 Emissões de GEE na cadeia produtiva do etanol produzido em São Paulo (gCO ₂ eq/MJ)	124
Tabela A 1.12 Emissões de GEE na cadeia produtiva do etanol produzido em Paraná (gCO ₂ eq/MJ)	125
Tabela A 1.13 Dados para cálculo dos balanços energéticos e das emissões de GEE (safra 2007/2008)	126
Tabela A 3.1 Lavouras substituídas no estado de São Paulo pela expansão da cana (2007/2008)	134

Nomenclatura

Abreviaturas:

B3 – Diesel com 3% em volume de biodiesel

E25 – Gasolina com 25% de etanol em volume

PBUE – Produção no Brasil e Uso na Europa

PUB – Produção e Uso no Brasil

Siglas:

ACV – Análise do Ciclo de Vida

AICV – Avaliação dos Impactos no Ciclo de Vida

COVs – Carbono Orgânico Voláteis

Conab – Companhia Nacional de Abastecimento

GEE – Gases de Efeito Estufa

DDGS – distilled dried grain solubles

DGS – distilled grain solubles

GWP – Global Warm Potencial

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change

LUC – Land Use Change

PCI – Poder Calorífico Inferior

UNICA – União da Indústria de Cana de açúcar

WTP – Well-to-Pump

WTW- Well-to-Wheels

Unidades de medida:

GJ – Gigajoule

m³ – metro cúbico

kg - quilograma

ha - hectare

MJ - Megajoule

L - litros

TC – Tonelada métrica de cana de açúcar

tC – Tonelada de Carbono

km – Quilômetro

g – Grama

% - Porcentagem

MT – Mega tonelada

Tg – Tera grama

GWh – Gigawatt hora

ATR – Açúcares Totais Recuperáveis

CO₂eq – Emissões equivalentes de dióxido de carbono

Fórmulas estruturais:

CO₂ – dióxido de carbono

CH₄ – metano

CO – monóxido de carbono

MP₁₀ – material particulado com diâmetro aerodinâmico menor que 10µm

N – nitrogênio

N₂ – nitrogênio gasoso

NH₃ – gás amônia

NH⁴⁺ - amônio

NO₃⁻ - nitrato

NO_x – óxidos de nitrogênio

NO – óxido nítrico

N₂O – óxido nitroso

SO_x – óxidos de enxofre

Introdução

O desenvolvimento econômico e industrial vem oferecendo à sociedade uma ampla e atrativa variedade de tecnologias, que têm provocado grandes mudanças no modo de vida e no ambiente, resultando em impactos positivos e negativos à qualidade de vida. A geração e uso de energia, indispensáveis às atividades cotidianas e ao desenvolvimento, são também fontes de emissões de gases poluentes que podem prejudicar a qualidade de vida através das diferentes formas de impacto no ambiente e na saúde humana.

A necessidade de diversificação da matriz energética mundial tem sido justificada por dois motivos: segurança energética, o que requer a redução da dependência externa de combustíveis fósseis (as principais fontes de energia), e redução das emissões dos gases de efeito estufa (GEE). Nesse contexto, os biocombustíveis são alternativas para a substituição da gasolina e do diesel no setor de transportes, que é onde ocorre, no cenário mundial, o maior consumo de petróleo – de acordo com o IPCC (2007), um terço da demanda energética da humanidade é atendido por combustíveis líquidos, principalmente derivados de petróleo, utilizados em sistemas de transportes.

A importância dos biocombustíveis na substituição dos derivados de petróleo é crescente, mas o desafio é que os mesmos sejam fontes de energia realmente sustentáveis e que sua produção contribua para o desenvolvimento sustentável.

O foco ambiental dos estudos sobre a sustentabilidade dos biocombustíveis tem sido o consumo de fontes não-renováveis de energia na produção de uma fonte renovável, como o

etanol produzido a partir da biomassa, e as conseqüentes emissões de GEE, bem como as emissões de GEE evitadas pelo uso de biocombustível em substituição ao uso de gasolina ou diesel.

A análise do ciclo de vida (ACV) tem sido a ferramenta adotada para a realização dos balanços energéticos e das emissões de GEE de combustíveis. Apesar da extensa variabilidade dos resultados da análise do ciclo de vida de biocombustíveis, esses estudos, em sua maioria e em maior ou menor medida, salientam os benefícios ambientais e energéticos associados aos combustíveis renováveis. No entanto, polêmicas sobre as emissões evitadas pelo uso de biocombustíveis têm sido levantadas. Essas polêmicas envolvem principalmente as emissões de GEE associadas à mudança do uso do solo.

O foco desta dissertação é justamente o balanço de energia e de emissões de GEE do etanol da cana de açúcar. O principal objetivo é a análise de ambos balanços, considerando a produção de etanol em diferentes estados brasileiros (e.g., Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, São Paulo e Paraná), e seu uso no Brasil e no exterior (e.g., na Europa). Aspectos específicos que foram estudados correspondem (i) à avaliação das emissões de GEE associadas à aplicação de fertilizantes nitrogenados, (ii) à análise dos impactos da mudança do uso do solo quando da expansão do plantio da cana, e (iii) à estimativa dos impactos da substituição do diesel mineral, utilizado em caminhões e máquinas agrícolas, por biodiesel (B3, mais especificamente) e por etanol. A metodologia de análise do ciclo de vida foi considerada em todas as análises feitas nesta dissertação.

O melhor entendimento dos aspectos energéticos e ambientais relacionados à produção e ao consumo de etanol combustível é essencial para o planejamento energético e ambiental do país, além de dar respaldo para comercialização internacional do produto, uma vez que a tendência é a exigência de cumprimento de princípios básicos da sustentabilidade.

Esta dissertação está dividida em seis capítulos, descritos a seguir:

No Capítulo 1 é feita a revisão da bibliografia sobre o uso de biocombustíveis, sobre a análise de ciclo de vida, e de estudos específicos sobre os biocombustíveis, fundamentados nessa ferramenta. Também são apresentados fatores que resultam em incompatibilidades e incertezas nos estudos de balanço energético e das emissões de GEE dos biocombustíveis. Finalmente, são apresentadas diferenças entre estudos publicados, baseados na análise do ciclo de vida do etanol derivado da cana de açúcar produzido no Brasil, e comparações de resultados de estudos que tratam do etanol produzido por diferentes biomassas.

No Capítulo 2 é tratado um tema polêmico dos estudos das emissões evitadas pelo uso de biocombustíveis – as emissões de óxido nitroso devido ao uso de fertilizantes nitrogenados no cultivo da biomassa. São apresentadas avaliações das frações de nitrogênio não absorvido pela planta, e que é então emitido para atmosfera como óxido nitroso. Considerados resultados de balanços de emissões de GEE já publicados, uma análise de sensibilidade foi feita, variando-se a fração de nitrogênio que é emitida para a atmosfera de acordo com as referências publicadas.

No Capítulo 3 são apresentados os balanços energéticos e das emissões de GEE do etanol produzido nos estados da região Centro-Sul do país, nos quais há maior produção de etanol. Nos balanços foi considerado o uso do etanol no Brasil e na Europa. São identificados no ciclo de vida do etanol os fatores que mais influenciam os balanços e quais melhorias podem ser realizadas para que os balanços sejam mais positivos, ou seja, para que o uso do etanol brasileiro resulte em mais benefícios quanto à redução do consumo de fontes fósseis e das emissões de GEE.

No Capítulo 4 o tema são as emissões de GEE associadas aos impactos diretos da mudança do uso do solo devido à expansão de áreas cultivadas com cana de açúcar. São avaliadas a influência das práticas agrícolas empregadas, antes e depois da mudança do uso do solo, e que resultam na mudança de seu estoque de carbono. Como é mostrado, os impactos sobre o balanço de emissões de GEE podem ser positivos ou negativos.

No Capítulo 5 é apresentada a avaliação do impacto da substituição das misturas B3 – diesel mineral e biodiesel – por etanol, nas operações agrícolas, no transporte da cana e na

distribuição do etanol. Para tanto, os balanços energéticos e das emissões de GEE anteriormente apresentados foram ajustados. Não foi feita análise de viabilidade econômica da substituição entre energéticos.

Finalmente, no Capítulo 6 é apresentada discussão dos resultados obtidos, bem como as conclusões desta dissertação.

Capítulo 1

Análise do ciclo de vida e suas aplicações a biocombustíveis

1.1 Biocombustíveis no setor de transportes

Seja devido à efervescência das discussões sobre mudanças climáticas que resultaram, no Protocolo de Quioto¹, na definição de metas de redução das emissões de GEE para alguns países chamados “*Anexo I*”, seja em razão da necessidade de diversificar a matriz energética, tornou-se essencial a compreensão das vantagens da substituição de combustíveis fósseis² por fontes renováveis.

No setor de transportes, muitas alternativas têm sido apresentadas para a substituição de gasolina e diesel como, por exemplo, células a combustível, eletricidade, etanol, biodiesel, entre outras. Os biocombustíveis são divididos em dois grupos: os de produção convencional (ou de primeira geração), como o etanol produzido a partir do caldo da cana de açúcar e o biodiesel produzido a partir de oleaginosas; e os de produção avançada (ou de segunda geração), que são os combustíveis produzidos a partir de lignocelulose como, por exemplo, bioetanol produzido por hidrólise ou o diesel *Fischer-Tropsch* produzido a partir do gás de síntese gerado na gaseificação da biomassa.

¹ O Protocolo de Quioto foi estabelecido na COP 3, em 1997, porém só entrou em vigor em 2005; atualmente o acordo está no seu primeiro período de compromisso – 2008 a 2012.

² As fontes fósseis de energia são não renováveis e, portanto, são finitas, além de estarem localizadas em países com grandes instabilidades políticas.

Um reflexo da importância dos biocombustíveis é o aumento da sua produção. Em 2007 os Estados Unidos tornaram-se os maiores produtores de etanol – derivado do milho. No entanto, a produção de etanol naquele país atende somente cerca de 3% da sua demanda (FARREL *apud* TOLLEFSON, 2008). Na Europa, a atenção se voltou para a produção de biodiesel, e o continente é líder mundial na produção desse biocombustível; o etanol também tem sido produzido na Europa, mas em menor escala, e não em volume suficiente para atender a demanda (BNDES, 2007). O Brasil é o segundo maior produtor de etanol – aqui derivado da cana de açúcar – que tem sido usado no país tanto puro (hidratado) quanto em mistura com a gasolina (essa mistura tem 20 a 25% de etanol anidro, em base volumétrica), ou ainda em misturas de etanol hidratado em qualquer porcentagem com a gasolina C (ou E25), em carros flex-fuel. O biodiesel foi adicionado à matriz energética brasileira através do Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB), e desde julho de 2009 é obrigatória adição de 4% de biodiesel ao diesel comercializado no país (base volumétrica).

Há grande preocupação quanto a sustentabilidade na produção e no uso dos biocombustíveis. Os princípios da sustentabilidade na produção e no uso de biocombustíveis focam as emissões de gases de efeito estufa, a competição com alimentos, impactos sobre a biodiversidade, e a prosperidade e o bem estar social (CRAMER et al., 2007).

1.2 Análise do ciclo de vida

Análise do ciclo de vida (ACV) é uma ferramenta que permite identificar todos os insumos e efluentes, inclusive todos os impactos ambientais, da produção de um determinado bem, ou serviço, de maneira que melhorias possam ser identificadas e realizadas.

No setor energético, o uso da análise do ciclo de vida começou quando, em resposta às crises dos preços do petróleo dos anos 1970, vantagens e/ou desvantagens da substituição do petróleo por combustíveis alternativos passaram a ser estudadas. Naquela época a preocupação estava relacionada somente ao balanço de energia, ou seja, as análises visavam a comparação das alternativas em relação à gasolina e ao diesel, por exemplo, de acordo com o uso de energia no

ciclo de vida do combustível. Mais tarde – no final dos anos 1980 –, os impactos da queima de combustíveis fósseis sobre o clima passaram a ser a maior preocupação. Assim, a estimativa das emissões de dióxido de carbono (CO₂) no ciclo de vida dos energéticos tornou-se necessária, e desde o início dos anos 1990, outros gases de efeito estufa passaram a ser incorporados às análises (considerados seus potenciais de aquecimento global) (CURRAN, 1996; DELUCCHI, 2006).

A metodologia da análise do ciclo de vida possui quatro etapas: i) definição do objetivo e do escopo; ii) análise de inventário; iii) avaliação de impactos; e iv) avaliação de melhoria/interpretação (CURRAN, 1996; UGAYA, 2001; CHEMINFO et al., 2008a). Na Figura 1.1 são apresentadas as quatro etapas citadas.

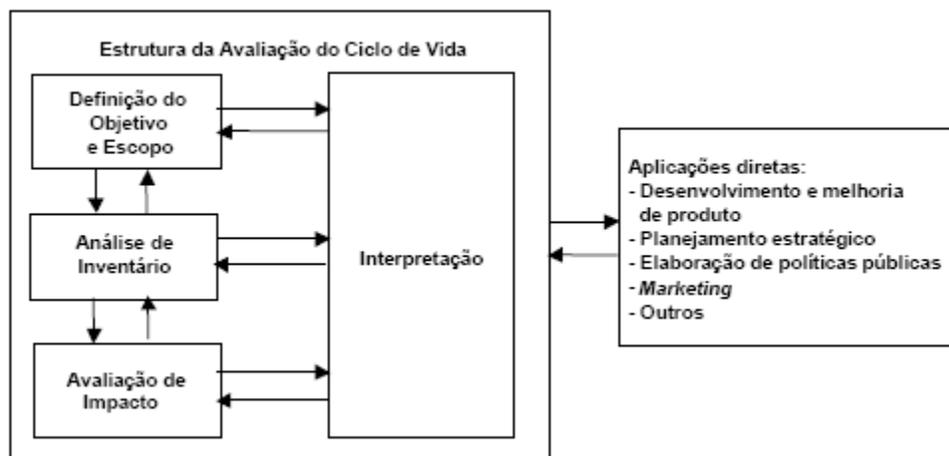


Figura 1.1 Estrutura de uma ACV

Fonte: Coltro (2007)

1.1.1 Definição do Objetivo e do Escopo

É a etapa inicial da análise, e nela é definida a proposta do estudo, ou seja, seu objetivo geral. Na etapa são necessárias a definição das condições de fronteira e a definição dos limites temporal e espacial (CURRAN, 1996; UGAYA, 2001). A primeira pode ser entendida como a definição da abrangência do estudo, com o estabelecimento de quais serão os sistemas considerados na análise e quais operações de cada um dos sistemas serão abordadas.

Depois que todos os sistemas e operações foram identificados dentro da fronteira, é possível excluir alguns/algumas para simplificação do estudo, porém a exclusão só é possível se não houver substancial alteração dos resultados, o que requer pesquisas preliminares, suficientes para entender a contribuição de cada subsistema (CURRAN, 1996). Outra justificativa para a exclusão de um sistema, ou operação, é quando da análise comparativa, e nesses casos excluem-se as etapas que são comuns (UGAYA, 2001).

Definido o objetivo e a fronteira de análise, determina-se o período e a fronteira espacial (região geográfica) da análise que será realizada. Uma análise da confiabilidade e da representatividade dos dados, dentro do período em que esses foram coletados, se faz necessária, pois, segundo Curran (1996), se mudanças operacionais ocorreram durante o período em que os dados foram originalmente coletados, dados atualizados são necessários. De acordo com Ugaya (2001), para evitar que dados sazonais sejam considerados na análise, o período de obtenção de dados é, geralmente, de um ano.

De acordo com Cheminfo et al. (2008a), nessa primeira etapa da ACV algumas decisões são necessárias como, por exemplo, o tipo de informação requerido para a tomada de decisões, ou seja, quão exatos os resultados devem ser, e como os resultados podem ser interpretados e expostos quanto à sua importância e utilidade. Os autores enfatizam que as definições do objetivo e do escopo determinam o tempo e os recursos necessários, além de impactar como a análise será conduzida e a relevância do resultado final.

Ugaya (2001) menciona mais dois passos necessários nesta primeira etapa: a definição das categorias de poluição e de impactos ambientais que serão consideradas no estudo; e a definição da unidade funcional.

1.2.2 Análise de Inventário

Nesta etapa é feita a quantificação de todas as entradas e saídas associadas ao sistema do produto, processo, ou atividade em estudo, que pode incluir manufatura, transporte, uso e

disposição final (por exemplo, reciclagem, reuso, incineração) (CURRAN, 1996; CHEMINFO et al., 2008a). As entradas são, normalmente, representadas pela energia e matérias-primas consumidas, e as saídas, pelas emissões atmosféricas, efluentes líquidos e resíduos sólidos, por exemplo.

Assim, a coleta, o armazenamento e a interpretação dos dados são realizados nessa etapa da análise. A definição do método de alocação entre os coprodutos gerados durante o processo avaliado também deve ser determinada (CURRAN, 1996; UGAYA, 2001).

A coleta de dados pode ser considerada como o principal passo na análise do ciclo de vida, já que a confiabilidade do estudo é julgada através da confiabilidade e rastreabilidade dos dados. Esses dados podem não estar disponíveis na literatura, sendo, portanto, de acordo com Curran (1996), necessário confiar em dados fornecidos pelas indústrias para realizar o estudo.

De acordo com Cheminfo et al. (2008a), a obtenção de alguns dados pode ser difícil ou até mesmo impossível, e pode ser difícil adequar os dados disponíveis para a unidade funcional necessária. Então, as fronteiras ou a qualidade dos dados da análise podem ser redefinidas em função dos dados disponíveis – processo comum em muitas ACVs.

Indicadores quantitativos, como exatidão, desvio ou erro sistemático; e qualitativo, como acessibilidade, consistência, representatividade, reprodutibilidade entre outros, podem ser utilizados para avaliar os dados (UGAYA, 2001).

Modelos computacionais têm sido usados para facilitar o armazenamento, manutenção, atualização e compilação dos dados, já que a quantidade de informações necessárias para realização da ACV é consideravelmente grande. Quanto às ACVs de biocombustíveis, muitos modelos foram criados nos Estados Unidos (GREET, LEM, STELLA, entre outros) e na Europa (GM-LBST Europe, por exemplo). No Brasil não há um modelo computacional com base de dados disponível e esta tem sido uma dificuldade na realização dessas análises para o caso brasileiro, pois a utilização de dados de outros países não reflete a realidade das condições brasileiras de produção da matéria-prima e do produto.

Quanto ao processo de alocação dos coprodutos, um procedimento de repartição das responsabilidades dos impactos ambientais e do consumo energético entre os diversos produtos, materiais ou processo deve ser realizado (UGAYA, 2001; COLTRO, 2007). Há diversas metodologias para alocação de coprodutos, o que tem sido motivo de incompatibilidades entre resultados de ACVs de um mesmo produto como, por exemplo, os de biocombustível.

Finalmente a interpretação dos dados pode ser realizada com a verificação da variabilidade dos dados e da ordem de grandeza da incerteza inserida na análise, o que, segundo Ugaya (2001), pode ser feita através da análise de sensibilidade.

Faz parte da Análise de Inventário o desenvolvimento de um fluxograma para mapear as entradas e saídas dos processos e sistemas, assim como um plano para coleta de dados. O fluxograma pode facilitar a visualização e compreensão do estudo, e o plano para coleta de dados pode direcionar a atividade (CHEMINFO et al., 2008a).

1.2.3 Avaliação de Impactos no Ciclo de Vida - AICV

Os impactos ambientais associados a cada sistema e operação considerados na análise são avaliados quanto à capacidade de seus efeitos alterarem as condições naturais do ambiente em que são lançados. Quantificar o potencial que cada aspecto ambiental tem de alterar (ou seja, impactar) o ambiente é uma tarefa que pode gerar discussões quanto aos resultados; exemplo são os potenciais de aquecimento global para cada gás de efeito estufa. As incertezas relacionadas são, geralmente, o motivo que levam as ACVs não avançarem em relação à etapa anterior – a análise de inventário (UGAYA, 2001).

A metodologia utilizada nesta etapa é dividida em três passos: i) classificação, ii) caracterização; iii) valoração (CURRAN, 1996). Porém, alguns autores assumem dois passos a mais: definição e análise de significância (Ugaya, 2001).

De acordo com Cheminfo et al. (2008a), o propósito da classificação é organizar e combinar os resultados da Análise de Inventário em categorias de impactos.

Na fase de caracterização todas as saídas dos sistemas são agrupadas de acordo com seus efeitos no ambiente.

Para valoração dos impactos ambientais uma forma de ponderação é definida e, então, aplicada para os diferentes impactos. Por exemplo, a emissão de óxido nitroso tem maior impacto, quanto ao potencial de aquecimento global, do que o dióxido de carbono.

Conforme apresentado anteriormente, essa etapa é muito complexa, podendo haver uma margem de incerteza quanto à metodologia aplicada para a valoração do impacto. O IPCC, ao longo dos anos, tem alterado a valoração dada a cada gás de efeito estufa e Delucchi (2006) assume, em seu programa para análise do ciclo de vida – LEM –, valores de potencial de aquecimento global (GWP) diferentes dos assumidos pelo IPCC, por exemplo.

A dificuldade em encontrar a maneira mais precisa de valoração é exposta por Curran (1996), que afirma não haver um método para completar cuidadosamente o passo de valoração de impacto. Ugaya (2001) enfatiza que, para a SETAC (1993), o julgamento adequado para valoração é mais importante do que a existência de uma grande quantidade de dados sem um modo efetivo de análise.

1.2.4 Análise de Melhorias/Interpretação

Coletadas todas as informações e avaliados os diferentes impactos ambientais decorrentes dos sistemas e operações, é viável identificar e analisar possíveis melhorias para mitigação, ou até mesmo para eliminação, de alguns impactos ambientais.

A realização dessa análise é feita em três ações: i) verificação de poluição ambiental, para identificação do processo ou atividade que mais impacta o ambiente, ii) levantamento das

alternativas tecnológicas existentes para substituição do processo, ou atividade, e iii) construção de cenários para verificação dos resultados possíveis (UGAYA, 2001).

1.3 Normas ISO para Análise do Ciclo de Vida

Baseada na necessidade de padronização da metodologia de ACV, a Organização Internacional de Normalização – *International Standards Organization* (ISO) – tem desenvolvido normas e relatórios técnicos para ACV dentro da série ISO 14000 – série de normas para Gerenciamento Ambiental.

A ISO desenvolveu, entre 1997 e 2000, um grupo de quatro normas que estabelece os princípios e estrutura para ACV (ISO 14040:1997) e os requisitos para as diferentes fases da ACV (ISO 14041-14043). Em 2006 essas normas foram substituídas por duas outras: uma de princípios para ACV (ISO 14040:2006), e outra de requisitos e diretrizes para ACV (14044:2006). A ISO tem publicado, também, documentos de diretrizes e relatórios técnicos (ISO 14047-14049) para divulgar a boa prática na aplicação dos conceitos de ACV (CHEMINFO et al., 2008a).

1.4 Análise do ciclo de vida de biocombustíveis

O uso de biocombustíveis no setor de transportes, com o objetivo de estabilizar ou reduzir as emissões de GEE, requer a comparação dos balanços energéticos e da emissão de gases de efeito estufa de diferentes rotas de produção. Os resultados podem indicar possíveis melhorias, tanto nas etapas de plantio e de cultivo da biomassa, quanto nas etapas de produção e distribuição do combustível.

A análise de ciclo de vida é fundamental na realização desses balanços, bem como na comparação entre combustíveis, de forma a apontar quais são as maiores vantagens ambientais e energéticas.

As análises completas de ciclo de vida de combustíveis abrangem os sistemas de produção da matéria prima, transporte da matéria prima, produção do combustível, armazenamento e distribuição do combustível (até o posto de combustível), e o uso final nos veículos.

Nos casos em que a análise não abrange o uso final do combustível, a ACV é mencionada na literatura em Inglês como “well to pump” – ou seja, do poço à bomba – e nos casos em que o uso final é incluído, a análise é identificada como “well to wheels” – ou seja, do poço às rodas (DELUCCHI, 2006). A análise “pump to wheels” – da bomba às rodas, pode ser feita separadamente e ser somada à análise “do poço à bomba” (WANG et al., 2007a), conforme ilustrado na Figura 1.2. Como as emissões na cadeia de produção-disposição final dos veículos (exceto as emissões do consumo de combustível) são praticamente iguais quando da comparação entre biocombustíveis e combustíveis fósseis, elas podem ser desconsideradas em estudos comparativos.

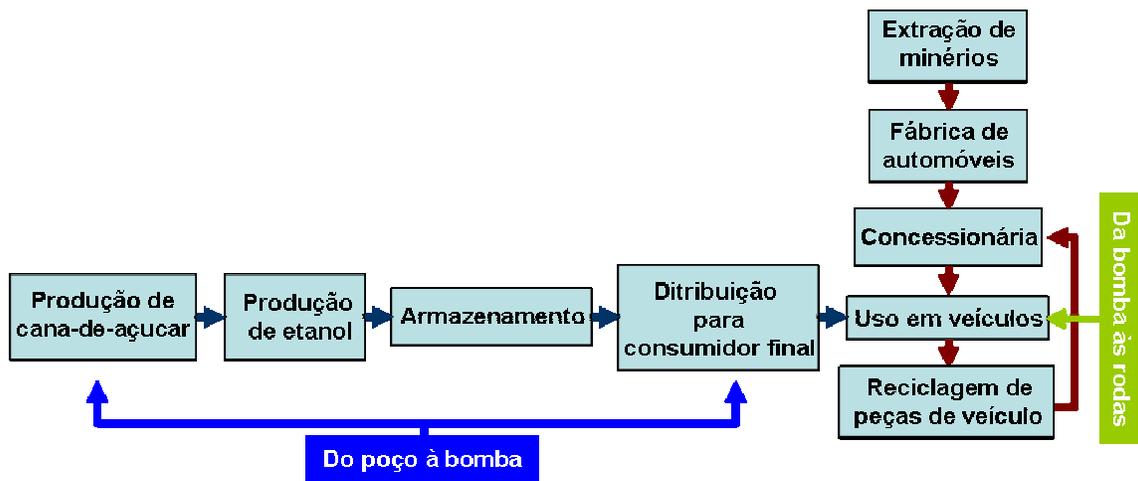


Figura 1.2 Ciclo de vida do etanol de cana de açúcar

Fonte: Adaptada de Wang et al. (2007a)

O objetivo das análises do ciclo de vida de combustíveis tem sido a realização dos balanços de energia e de emissões dos gases de efeito estufa. O balanço energético pode ser expresso pela razão entre a energia contida no combustível fabricado e a energia fóssil necessária para a produção do combustível. Já o balanço de emissões de gases de efeito estufa permite a estimativa

das emissões em todas as etapas consideradas na análise do ciclo de produção, transporte e consumo.

No caso dos biocombustíveis, as emissões de GEE no processo produtivo não estão exclusivamente relacionadas ao uso de energia (de diferentes fontes), pois uma parcela significativa dessas emissões está associada ao cultivo e às mudanças do uso da terra (DELUCCHI, 2006).

Os benefícios relacionados às reduções das emissões de gases de efeito estufa, considerados a produção e o uso de biocombustíveis, dependem basicamente da biomassa utilizada, pois a mesma determina a extensão de terra para cultivo da matéria-prima, bem como o processo de produção.

No processo de produção, além da emissão de GEE, a demanda energética e a fonte de energia utilizada para suprir essa demanda são os principais fatores das vantagens ambientais e energéticas dos biocombustíveis.

1.4.1 Algumas ACVs de biocombustíveis

Algumas discrepâncias entre análises de ciclo de vida de biocombustíveis foram observadas por Larson (2006), que aponta como as principais causas das diferenças de resultados de ACVs para biocombustíveis derivados da mesma biomassa: i) alguns estudos consideram somente os gases de efeito estufa de efeito direto, enquanto outros estudos consideram também os gases de efeito indireto (e, no grupo dos que consideram os gases de efeito indireto, alguns consideram os aerossóis e outros não); ii) consideração das emissões provenientes da aplicação de fertilizantes nitrogenados no solo e da decomposição das folhas; iii) diferentes critérios de alocação entre os coprodutos; iv) consideração do sequestro de carbono no solo, e v) o tipo de veículo considerado no uso final do combustível.

Delucchi (2006), baseado no seu modelo computacional LEM, apresenta resultados de biocombustíveis derivados de diferentes biomassas, em um cenário para 2010. Um aspecto

importante é o modelo LEM utilizar um fator de aquecimento global para os GEE diferente do GWP do IPCC. Além disso, emissões devido à mudança do uso do solo podem ser consideradas no modelo. GEE de efeito direto e indireto são considerados no estudo. O autor aponta a necessidade de conhecer as emissões no ciclo do nitrogênio (através de medições em campo) para que o balanço das emissões de GEE seja mais representativo, e propõe um modelo chamado *ideal* para ACV. Os resultados indicam que as emissões associadas ao cultivo e mudança do uso do solo (considerando a expansão em áreas de vegetação nativa) representam 33% das emissões de GEE na análise WTT da cadeia produtiva do etanol de milho (em um cenário para 2010) e que chegam a 81% no cultivo da soja para biodiesel. Na Figura 1.3 é apresentada a esquematização do modelo ideal proposto pelo autor.

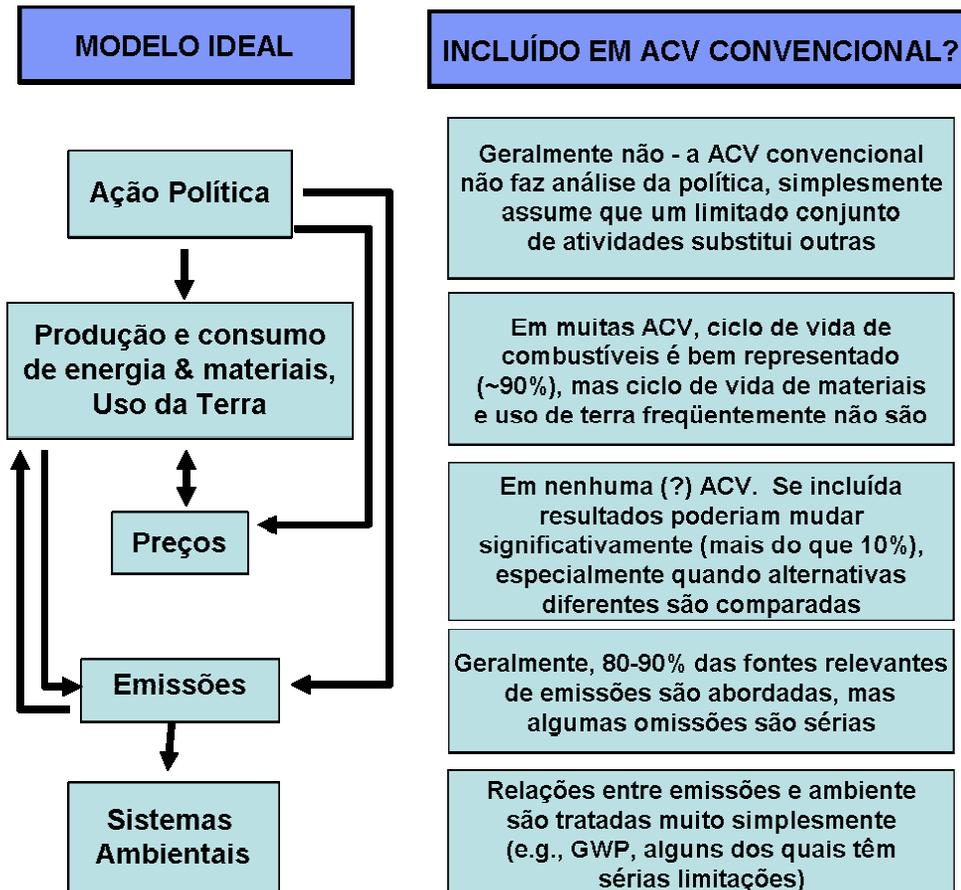


Figura 1.3 Proposta de um modelo ideal para ACV

Fonte: Adaptada de Delucchi (2006)

Sugerindo que a abrangência de todos os sistemas seria o ideal para uma análise de ciclo de vida de combustíveis, Delucchi (2006) afirma que as emissões são afetadas pela produção e pelo consumo de energia e de materiais, bem como pelo uso da terra (PCEM), e, também, por medidas políticas. Alterações nas emissões resultam em mudanças nos sistemas ambientais. Ações políticas afetam as PCEM, que afetam e são afetadas pelos preços, ou seja, ações de mudanças em um dos sistemas ocasionam alteração nos outros. Segundo o autor, a omissão desses fatores induz a um erro de magnitude não conhecida, mas potencialmente grande, e pode conferir as ACVs de combustíveis um resultado sem sentido.

Wang et al. (2006) fizeram um estudo de ACV de etanol derivado da palha do milho, considerando que essa biomassa, deixada no campo atualmente, será utilizada na produção de etanol celulósico quando a tecnologia estiver comercialmente disponível. A análise é do tipo WTW (do poço às rodas) e foram considerados os GEE de efeito direto e indireto: CO₂, CH₄, N₂O, CO, COVs, NO_x, SO_x e MP₁₀. Os dados são os do GREET MODEL³ e de literaturas revisadas. Na Tabela 1.1, a seguir, são apresentados os dados deste estudo e de outro estudo realizado por Wang et al. (2007a) com o objetivo de identificar as emissões de GEE e de consumo energético do etanol de milho produzido nos Estados Unidos, considerando o uso de diferentes combustíveis nas usinas.

Para a produção de etanol de milho, Wang et al. (2006) consideram uma planta de bioconversão convencional para os cenários de 2012 e 2030, sendo a produtividade de etanol a diferença entre os dois cenários. No caso da produção do etanol de palha de milho, os autores consideraram um processo de conversão bioquímico no cenário de 2012 e que, em 2030 a biorrefinaria terá o bioprocessamento consolidado e turbina à gás de ciclo combinado (GTCC). A produção de etanol de resíduos florestais será feita através de processo bioquímico ou termoquímico usando calor e eletricidade da combustão de biomassa em caldeira de leito fluidizado, eletricidade da rede e/ou gás natural.

³ GREET (Greenhouse Gases, Regulated Emissions e Energy use in Transportation) é um software de uso público desenvolvido pelo Laboratório Argonne (nos EUA) para análises WTW referentes a combustíveis para o setor de transporte e tecnologias de veículos (Wang et al., 2006).

O estudo de Wang et al. (2007a) considera que o etanol de milho nos Estados Unidos em 2006 (atual) era produzido 80% em usinas de moagem à seco e 20% em usinas de moagem úmida, e no cenário para 2010 os autores consideraram que o etanol será produzido 87,5% em plantas de moagem à seco e 12,5% em moagem úmida.

Tabela 1.1 Balanço de energia e emissões de GEE evitadas em usinas de etanol de milho nos US

Combustível (tipo de usina)	Balanço Energético (MJprod/MJcons)	Emissões de GEE evitadas (%)
Gasolina ^a	0,81	-
EtOH milho (2012) ^a	1,28	21
EtOH sabugo (2012) ^a	9,09	86
EtOH milho (2030) ^a	1,30	24
EtOH sabugo (2030) ^a	10,10	89
EtOH resíduos florestais ^a	5,55	85
EtOH milho (atual) ^b	1,28	19
EtOH milho (2010) ^b	1,30	21
EtOH milho (gas natural) ^b	1,33	28
EtOH milho (GN e DGS úmida) ^b	1,69	39
EtOH milho (GN e CHP) ^b	1,34	32
EtOH milho (carvão) ^b	1,22	-3
EtOH milho (carvão e DGS úmida) ^b	1,59	18
EtOH milho (carvão e CHP) ^b	1,25	-1
EtOH milho (biomassa) ^b	2,86	52
EtOH milho (GN e syrup) ^b	1,67	36
EtOH milho (DGS) ^b	2,38	39
EtOH celulósico ^b	10,00	86

Fontes: ^a Wang et al (2006), valores aproximados – extraídos de gráficos

^b Wang et al. (2007a), valores aproximados – extraídos de gráficos

A diferença dos resultados entre os outros oito casos analisados pelos autores está no combustível usado na usina de etanol, na forma como a ração animal será produzida (no caso DGS, a ração não passa pelo processo de secagem e isto reduz o consumo de energia na planta), o

uso de sistemas que produzem calor e eletricidade para operação da usina (CHP), uso de chips de madeira (biomassa) que serão gaseificados para a produção de gás de síntese (syngás) que fornecerá calor para a operação da planta, uso de syrup para fornecer uma parte do calor necessário para a operação da usina e uso do DGS para produção de calor e eletricidade na planta de etanol de milho – de acordo com os autores, a quantidade de energia contida no DGS gerado em usinas de moagem à seco é maior do que a energia necessária para o funcionamento de uma planta de etanol de milho nos Estados Unidos. Algumas características dos estudos podem ser citadas: i) o método utilizado na alocação de créditos devido aos coprodutos foi o de alocação em base energética; ii) os autores não consideraram os efeitos da mudança do uso do solo; iii) gases aerossóis, que são GEE de efeito indireto, não foram considerados; e iv) as emissões de óxido nitroso associadas ao uso de fertilizantes nitrogenados foram incluídas na análise.

1.4.2 ACVs de etanol de cana de açúcar produzido no Brasil

De Oliveira et al. (2005) realizaram um estudo do consumo energético e das emissões gases de efeito estufa no ciclo de vida do etanol derivado da cana de açúcar e do milho. Os autores consideraram as fases de cultivo, produção de etanol, distribuição e o uso final. Os dados são referentes ao período de 1996 a 2002, baseados no modelo computacional STELLA (que contém dados representativos das condições brasileiras de produção e uso do etanol derivado da cana de açúcar) e em bibliografia. Todas as emissões de GEE e consumo energético na cadeia produtiva foram alocados ao produto. Os resultados indicam que as vantagens, energética e de redução das emissões de GEE, para o etanol de cana de açúcar em substituição à gasolina são maiores do que as do etanol derivado de milho em substituição à gasolina. O estudo não considera mudança do uso do solo para cultivo da biomassa.

Macedo et al. (2008) fizeram os balanços das emissões de GEE e energético do ciclo de vida do etanol de cana de açúcar, atualizando estudo realizado anteriormente (Macedo et al., 2004). Os autores utilizaram o método de alocação por substituição para alocação entre produtos e coprodutos, e não consideram as etapas de distribuição e de uso final do biocombustível. No estudo não são consideradas as emissões de carbono associadas à mudança do uso do solo, mas as emissões de N₂O associadas à aplicação de fertilizantes nitrogenados foram avaliadas e

incluídas nos resultados. As informações do estudo são referentes à região Centro-Sul brasileira, na qual as áreas de produção de cana de açúcar estão concentradas, foram coletadas junto ao CTC (Centro de Tecnologia Canavieira), e são referentes à safra de 2005/2006. A amostra considerada – 100 milhões de toneladas de cana processadas – é muito representativa em relação à produção nacional.

Seabra (2008), utilizando os dados do estudo realizado por Macedo et al. (2008), incluiu à análise a etapa de distribuição do etanol derivado da cana de açúcar – caracterizando a análise como “well-to-pump”. O método de alocação por substituição foi mantido. A Tabela 1.2, a seguir, apresenta os principais dados utilizados nos estudos citados.

As principais razões para a discrepância entre os resultados dos balanços energéticos apresentados são:

- Aplicação de cal, herbicida e inseticida. Nesta fase, os dois estudos consideram quantidades diferentes de aplicação, ou seja, 1.900 kg/ha, 2,2 kg/ha, 0,16 kg/ha (MACEDO et al., 2008), e 616 kg/ha, 3 kg/ha, 0,5 kg/ha para cal, herbicida e inseticida, respectivamente (DE OLIVEIRA et al, 2005). Macedo et al. (2008) indicam que a demanda de energia na produção é de 0,1, 355,6 e 358,0 MJ/kg de cal, herbicida e inseticida, respectivamente. No trabalho de De Oliveira et al. (2005) os valores assumidos foram 1,71 MJ/kg, 266,56 e 284,82 MJ/kg de cal, herbicida e inseticida, respectivamente. No estudo de Macedo et al. (2008), para a obtenção da energia necessária na produção desses insumos, foram empregados os modelos GREET e EBAMM⁴, que se referem às condições norte americanas de produção, enquanto no estudo de De Oliveira et al. (2005) os valores foram obtidos na bibliografia de referência, também indicando às condições norte americanas de produção.

⁴ “ERG Biofuel Analysis Meta-Model” – software desenvolvido por estudantes e docentes do Energy and Resources Group e Richard & Rhoda Goldman School of Public Policy, na UC Berkeley (<http://rael.berkeley.edu/ebamm/>).

Tabela 1.2 Comparação dos balanços energéticos de etanol nas condições brasileiras de produção e consumo.

Fases da produção	Unidade	De Oliveira et al. (2005) ^a	Macedo et al. (2008) ^b
Fertilizante	GJ/m ³	0,75	0,61
Cal, herbicida + pesticida	GJ/m ³	0,31	0,14
Operações manuais	GJ/m ³	0,45	- ^c
Mudas/sementes ^d	GJ/m ³	0,52	0,07
Consumo de combustíveis fósseis	GJ/m ³	3,59	1,42 ^e
Energia embutida ^f	GJ/m ³	-	0,21
Etapa agrícola	GJ/m³	5,62	2,44
Destilaria	GJ/m ³	0,57	0,27
Etapa industrial	GJ/m³	0,57	0,27
Sub total (produção de etanol) (1)	GJ/m³	6,19	2,71
Distribuição	GJ/m ³	0,44	0,68
Sub total (etanol na bomba) (2)	GJ/m³	6,63	3,39
Créditos (3)	GJ/m³	0,24^g	3,00
Conteúdo energético do etanol (4)^h	GJ/m³	24,31	22,32
Balanço (saída/entrada) (4+3)/(1)		3,97	9,34
Balanço (saída/entrada) (4+3)/(2)		3,70	7,47
Balanço (saída/entrada) (4)/(1)		3,93	8,24

Fonte: *Elaboração própria tendo por base De Oliveira et al. (2005); Macedo et al. (2008) e Seabra (2008).*

Notas: ^a Considerada a produtividade de 80 TC/ha e produção de etanol de 80 l/TC (DE OLIVEIRA et al., 2005).

^b Considerada a produtividade de 87,1 TC/ha e produção de etanol de 86,3 l/TC (MACEDO et al., 2008).

^c A energia despendida pela mão-de-obra não é considerada nos estudo de Macedo et al. (2008). Em 1984 o valor estimado nesta etapa era de 1.880 kcal/TC e tem diminuído devido à mecanização da colheita (MACEDO et al., 2004).

^d Consumo energético para produção das mudas avaliado considerando o rendimento de mudas e que o gasto de energia para produzi-las seria semelhante ao da produção de cana.

^e Incluindo o consumo relacionado a outras atividades e pequenos serviços realizados na fase agrícola para os quais não há informações detalhadas (MACEDO et al., 2008)

^f Consumo de energia associado à produção das máquinas e equipamentos agrícolas utilizados nos canaviais.

^g Valor referente ao total de energia gerada pela queima do bagaço nas caldeiras (5,17 GJ/ha) menos a energia consumida na fase industrial (3,63 GJ/ha) e que não foi alocado no balanço (DE OLIVEIRA et al., 2005).

^h Se o consumo de energia para distribuição do combustível não for considerado, o balanço energético resulta em 9,3 (MACEDO et al., 2008).

- Consumo de combustível. De Oliveira et al. (2005) consideraram o consumo de 600 l de diesel/ha e demanda de energia na produção de diesel de 1,078 MJ/MJ. No trabalho de Macedo et al. (2008) foi considerado o consumo de 164 l diesel/ha e uma demanda de energia para produção de diesel de 1,16 MJ/MJ.

- Fase industrial. Nesta etapa o consumo de energia considerado por Macedo et al. (2008) é referente à soma de 19,2 MJ/TC (produtos químicos e lubrificantes), 0,5 MJ/TC (energia embutida em prédios) e 3,9 MJ/TC (energia embutida em equipamentos). De Oliveira et al. (2005) não especificam onde há o consumo de energia nesta fase.

- Distribuição. Para esta etapa De Oliveira et al. (2005), utilizando dados da literatura referente ao etanol derivado do milho, considerou um consumo de energia de 2,82GJ/ha de cana. No trabalho de Seabra (2008) o valor corresponde a um consumo específico de 0,024 l/(m³.km) e à distância média de 337 km para distribuição do etanol - valor referente a uma grande cooperativa de usinas na região Centro-Sul do Brasil (SEABRA, 2008).

Quanto às emissões de GEE, a aplicação de cal, herbicidas e inseticidas resultou diferente entre os dois estudos. Os fatores de emissão considerados por Macedo et al. (2008) foram extraídos do modelo GREET, EBAMM (para o caso da cal, o valor é uma estimativa dos autores) e são de 0,01 kgCO₂eq/kg, 25 kgCO₂eq/kg e 29 kgCO₂eq/Kg de cal, herbicida e inseticida, respectivamente. No estudo de De Oliveira et al. (2005) esses valores são, respectivamente, 80,08 kgCO₂/ha, 51,72 kgCO₂/ha e 9,04 kgCO₂/ha (representado apenas as emissões de dióxido de carbono).

As “emissões do solo” são referentes, no estudo de De Oliveira et al. (2005), às emissões de metano e óxido nitroso, em CO₂ equivalente, na fase agrícola e, no estudo de Macedo et al. (2008), o valor representa as emissões de metano e óxido nitroso devido à queima pré-colheita, óxido nitroso devido à aplicação de fertilizante e resíduos e dióxido de carbono devido a aplicação de cal e uréia.

Transporte e operações agrícolas representam emissões de GEE devido ao uso de combustível fóssil – diesel. Nesta etapa De Oliveira et al. (2005) consideram um fator de emissão igual a 3,08 kgCO₂/l, e Macedo et al. (2008) consideram um fator de emissão, devido ao uso, de 20,2 gC/MJ de diesel e de 3,87 gC/MJ devido à produção do diesel, além disto, conforme exposto anteriormente, De Oliveira et al. (2005) consideram um maior consumo de diesel do que Macedo et al. (2008).

Na etapa de distribuição de etanol também pode ser observada a diferença entre os dois estudos, pois De Oliveira et al. (2005) assume um fator de emissão de 227 kgCO₂/ha, já no estudo de Macedo et al. (2008) os fatores considerados são os mesmos que para a etapa de transporte e operações agrícolas, visto que o combustível utilizado é o mesmo – diesel. As discrepâncias aqui detalhadas podem ser visualizadas na Tabela 1.3, abaixo.

Tabela 1.3 Comparação dos balanços das emissões de GEE de etanol nas condições brasileiras de produção.

Fases	Unidade	De Oliveira et al., 2005 ^a	Macedo et al., 2008 ^b
Cultivo ^c	gCO ₂ eq/MJ	2,93 ^d	2,79
Queima da palha	gCO ₂ eq/MJ	-	3,72
Maquinário	gCO ₂ eq/MJ	-	0,26
Emissões do solo ^e	gCO ₂ eq/MJ	4,36	6,36
Transp. e op. agrícolas	gCO ₂ eq/MJ	12,89 ^d	5,22
Fase agrícola	gCO ₂ eq/MJ	20,19	18,35
Fase industrial	gCO ₂ eq/MJ	-	1,14
Distribuição	gCO ₂ eq/MJ	1,58 ^d	2,28
Créditos	gCO ₂ eq/MJ	-	- 9,41
Total	gCO ₂ eq/MJ	21,77	12,36

Fonte: Elaboração própria tendo por base De Oliveira et al. (2005); Macedo et al. (2008) e Seabra (2008).

Notas: ^a Considerada a produtividade de 80 TC/ha e produção de etanol de 80 l/TC (DE OLIVEIRA et al., 2005).

^b Considerada a produtividade de 87,1 TC/ha e produção de etanol de 86,3 l/TC (MACEDO et al., 2008).

^c Valor referente às emissões referentes ao uso de combustíveis fósseis para produção dos insumos agrícolas.

^d Valores em gCO₂/MJ.

^e Valor resultado de atividades agrícolas para o estudo de De Oliveira et al. (2005) e referente a aplicação de insumos (nitrogênio fertilizante, uréia e cal) para o estudo de Macedo et al. (2008).

Para a alocação dos créditos de emissão de GEE gerados pelos co-produtos - bagaço e eletricidade - Macedo et al. (2008) consideram o uso de bagaço em substituição ao óleo combustível nas caldeiras (cuja eficiência cai de 92% para 79%, PCI) e que a eletricidade vendida à rede substitui a eletricidade gerada em termelétricas a gás natural (SEABRA, 2008). Em razão de possíveis questionamentos sobre essa forma de alocação de créditos, no Capítulo 3 deste trabalho são apresentados resultados considerando outras estimativas de alocação.

Finalmente, Macedo e Seabra (2008) avaliaram as emissões de GEE associadas à mudança do estoque de carbono no solo. De acordo com as hipóteses consideradas pelos autores, essas emissões correspondem a $-118 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^3$, ou seja, $-5,27 \text{ gCO}_2\text{eq/MJ}$ de etanol. A análise dessas emissões foi feita considerando-se a produção em 2006 e que 50% das áreas de expansão da cana ocuparam áreas antes ocupadas com pastagem, e os 50% restantes áreas antes ocupadas com outros cultivos agrícolas. No estudo, os autores consideraram apenas a prática de colheita mecanizada.

1.4.3 Comparação entre etanol produzido a partir de diferentes biomassas

As emissões de gases de efeito estufa do etanol derivado de trigo, do etanol derivado de milho e da gasolina foram tomadas do Cheminfo et al. (2008a), que utilizou o modelo computacional GHGenius⁵. Essas emissões são comparadas às emissões de GEE no ciclo de vida do etanol derivado da cana de açúcar apresentadas por Macedo et al. (2008) e Seabra (2008).

Na Tabela 1.4, a seguir, são apresentados os fatores de emissão em cada etapa do ciclo de vida de cada biocombustível. Assumindo o resultado apresentado na tabela para as emissões do ciclo de vida da gasolina, podem-se comparar as emissões evitadas quando de sua substituição, parcial ou total, por etanol. Para que tal análise seja feita é preciso ter como hipótese a relação de substituição entre gasolina e etanol.

⁵ Cabe ressaltar que não é objetivo desta comparação analisar a qualidade ou comparar a consistência dos estudos.

Tabela 1.4 Fatores de emissão (gCO₂eq/MJ)

Etapas	Gasolina	Etanol de Milho	Etanol de trigo	Etanol de cana de açúcar
Insumos agrícolas ^a	0,00	5,33	10,70	2,79
Produção do combustível	12,28	28,95	31,88	1,14
Emissões deslocadas	0,00	-17,34	-31,79	-9,41
Emissões da combustão	64,72	2,10	2,10	-
Outras Emissões ^b	10,15	18,96	26,08	15,56
Emissões da distribuição	0,56	1,45	1,45	2,27
Total	86,72	39,45	40,43	12,35

Fonte: *Elaboração própria tendo por base Macedo et al., 2008; Cheminfo et al., 2008*

Notas: ^a Para etanol de milho e trigo são emissões provenientes da produção de fertilizantes e inseticidas, enquanto para etanol de cana de açúcar a emissão é referente somente ao uso de fertilizantes.

^b emissões provenientes da queima pré-colheita da cana, emissões do solo e do transporte da matéria-prima para o caso brasileiro, e para o caso canadense, é a soma das emissões de transporte e recuperação da matéria-prima e mudança do uso do solo e cultivo.

As emissões evitadas pelo uso de etanol, comparadas à emissão proveniente do uso da gasolina, podem ser calculadas pela equação 1 abaixo:

$$EE = [1 - (1 \times er^{-1}) \times (ET_{\text{etanol}} \times ET_{\text{gasol}}^{-1})] \times 100 (\%) \quad (1)$$

Sendo: EE = emissões evitadas quando da substituição; er = eficiência relativa, ET_{etanol} = emissões totais de GEE no ciclo de vida do etanol; e ET_{gasol} = emissões totais de gases de efeito estufa no ciclo de vida da gasolina.

Na hipótese de que não há variação da eficiência dos motores quando da operação com gasolina pura ou com mistura etanol-gasolina, a relação de substituição entre etanol e gasolina seria a relação entre os poderes caloríficos inferiores da gasolina e do etanol (ou seja, 1,42 L de etanol/L de gasolina – Walter et al., 2008a) e, nesse caso, a eficiência relativa seria igual a 1.

Assumindo tal hipótese e a substituição parcial da gasolina por etanol (em misturas até E10) as emissões evitadas de GEE foram calculadas e são apresentados na Figura 1.4. Pode-se observar que o etanol produzido a partir de trigo deslocaria 53% das emissões de GEE do ciclo de vida da gasolina, enquanto o etanol produzido a partir do milho traria benefício de deslocamento

das emissões em 54%. Para essa base de comparação, as emissões evitadas pelo etanol produzido a partir da cana, nas condições brasileiras, seriam iguais a 83%, quando o mesmo fator de emissão da combustão do etanol de milho e trigo é adicionado ao ciclo de vida do etanol da cana, ou 86% quando este fator não é considerado.

As emissões evitadas serão maiores se as emissões de GEE no ciclo de vida da gasolina forem maiores (por exemplo, no caso da substituição de gasolina reformulada). As emissões no ciclo de vida da gasolina poderiam ser ligeiramente superiores ao que apresentado por Cheminfo et al. (2008a): por exemplo, as emissões na combustão da gasolina (ou seja, no uso do automóvel) são apresentadas como 64,72 gCO₂eq/MJ por Cheminfo et al. (2008), enquanto a metodologia de avaliação do IPCC (1996) indica que tal resultado seria 69,3 gCO₂eq/MJ.

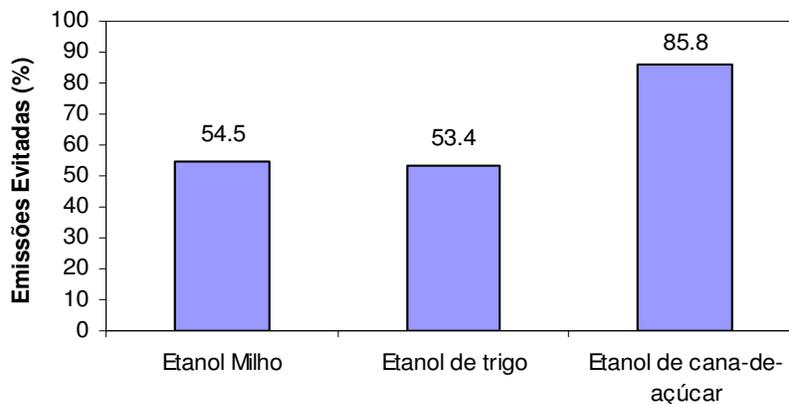


Figura 1.4 Comparação das emissões de GEE de etanol produzido por diferentes rotas

Fonte: *Elaboração própria tendo por base Macedo et al. (2008); Seabra (2008) e Cheminfo et al. (2008)*

No caso da produção de etanol a partir de trigo, o resultado corresponde a uma situação em que gás natural é a fonte de energia nas unidades industriais, em sistemas de cogeração de baixa eficiência, e os créditos em emissões evitadas⁶ são devidos à produção de DDG, que é usado como alimento e ração. O crédito na rota baseada em trigo é maior do que na rota baseada em

⁶ Os créditos estão relacionados à produção de co-produtos. No caso de balanços de GEE (assim como em balanços de custos) um método para alocação precisa ser usado a fim de distribuir valores entre o produto principal e coprodutos.

milho por causa do menor conteúdo de amido no trigo (6-10% menor comparado ao milho), o que implica maior produção de DDG de trigo (12-20% mais). Além do que, o conteúdo de proteína no DDG de trigo é maior do que no caso do milho (CHEMINFO et al., 2008a). O método de alocação usado é, em ambos os casos, o de substituição, ou seja, está baseado no consumo energético – e nas emissões de GEE – na produção de um produto semelhante, mas a partir de outra matéria-prima.

Os créditos considerados no caso da produção de etanol de cana de açúcar são atribuídos ao uso de bagaço excedente como combustível em outros ramos industriais, substituindo óleo combustível para produzir vapor, e devido à produção de eletricidade excedente que é vendida para o setor elétrico. Emissões evitadas de GEE foram avaliadas como sendo aquelas de óleo combustível que são deslocadas em alguns ramos industriais, e as emissões evitadas pela produção de eletricidade em usinas termelétricas a gás.

Quanto ao balanço energético, alguns estudos recentes sobre etanol produzido de milho apresentaram que a razão de energia é maior do que uma unidade, ou seja, a energia produzida como etanol é maior que a energia necessária para produzi-lo. Por exemplo, Shapouri et al. (2002) *apud* Urquiaga et al. (2005) apresentaram que a relação de energia é 1,23, ou seja, a produção de 1 GJ de etanol de milho requer 0,81 GJ de fontes fósseis de energia. É estimado que a razão de energia possa ser melhorada cerca de 1,3 a 2,9 se combustíveis fósseis usados nos processos industriais são alterados para combustíveis baseados em biomassa, como chips de madeira (Wang et al., 2007a).

Macedo et al. (2008) mostraram que o balanço energético no caso de etanol produzido da cana de açúcar no Brasil corresponde a uma razão de energia de 9,3. Detalhes deste resultado foram apresentados na seção anterior neste capítulo.

A Figura 1.5 apresenta as razões de energia de etanol produzido de diferentes biomassas, comparadas à razão de energia da produção de gasolina. Os resultados apresentados na Figura 1.5 correspondem aos valores mais aceitos de diferentes estudos sobre o mesmo tema.

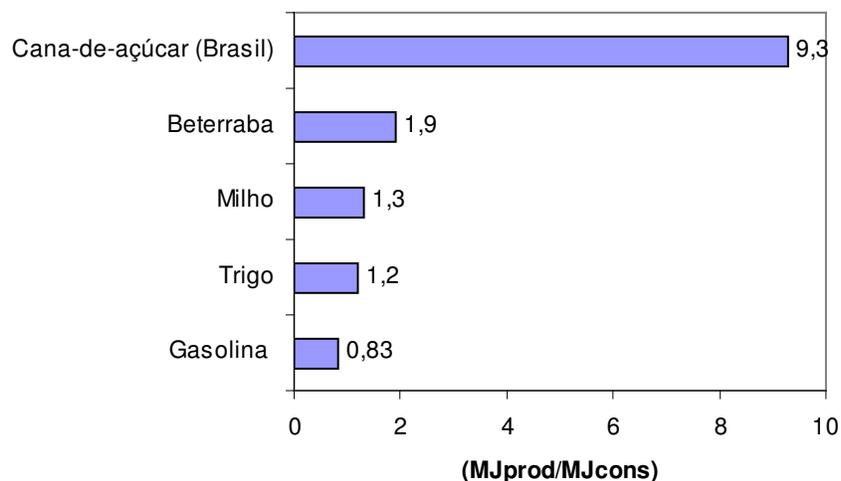


Figura 1.5 Balanço energético de etanol derivado de diferentes biomassas

Fonte: Macedo et al. (2008) e UNICA (2007)

1.5 Incompatibilidades relacionadas aos balanços de GEE de biocombustíveis

Polêmicas têm sido levantadas a respeito das emissões de GEE na etapa de cultivo de biomassas utilizadas como matéria prima para a produção dos biocombustíveis. Crutzen et al. (2007 e 2008) assumiram que entre 3 e 5% do nitrogênio utilizado como fertilizante é emitido como óxido nitroso, em vez de 1,3%, como apresentado pelo IPCC (2006), e concluíram que, assim, não há benefícios quanto à substituição de combustíveis fósseis por biocombustíveis de produção convencional. Fargione et al. (2008) estimam significativas emissões de carbono devido à expansão da área cultivada com biomassa, também anulando os benefícios das emissões evitadas de combustíveis fósseis.

A alocação entre produto e coprodutos é uma das principais polêmicas nas análises do ciclo de vida. Larson (2006) identificou, na literatura de análise do ciclo de vida de biocombustíveis, seis métodos de alocação. Um é simplesmente a não alocação devido às incertezas. Os outros cinco correspondem aos seguintes princípios: i) alocação proporcional à massa dos produtos, ii) alocação proporcional à energia contida nos produtos, iii) alocação por diferença, cabendo aos coprodutos a parcela demandada em sua produção; iv) alocação baseada em valores de mercado;

v) alocação por diferença, cabendo aos coprodutos a parcela de energia requerida na sua produção em processos convencionais.

Essas incertezas serão tratadas nos capítulos seguintes, com o objetivo de se conhecer seus impactos no balanço das emissões de GEE no ciclo de vida do etanol de cana de açúcar. Por apresentar dados mais atuais, confiáveis (por permitir rastreabilidade e serem representativos de um grande número de usinas) e mais detalhados, neste trabalho serão usadas informações dos estudos realizados por Macedo et al. (2008) e Seabra (2008).

Capítulo 2

Fertilizantes nitrogenados e emissões de GEE

2.1 Emissões de NO e N₂O e aquecimento global

A demanda crescente por biomassa tem gerado a necessidade de aumentar a produtividade. Neste sentido, o uso de fertilizantes nitrogenados e a irrigação são práticas agrícolas utilizadas, mas que acarretam maior consumo de energia utilizada tanto para o bombeamento da água quanto para a produção do fertilizante. Este fator, somado às emissões de GEE pela aplicação de fertilizantes nitrogenados, resultam maiores emissões de GEE na etapa agrícola de produção de biocombustíveis.

As emissões de GEE em cultivo de biomassa são, entre outras, emissões de óxido nitroso⁷ resultante dos processos de nitrificação e desnitrificação⁸ de nitrogênio aplicado como fertilizante, e são intensificadas quando a quantidade aplicada é maior do que a requerida pela planta (Bouwman, 1990 *apud* Sawamoto et al., 2005). Essas emissões ocorrem de duas maneiras: i)

⁷ Considerado um potente GEE, com potencial de aquecimento global – GWP – igual a 296, o que significa um potencial 296 vezes maior do que o dióxido de carbono (base de massa).

⁸ Nitrificação é um processo biológico que ocorre no solo onde bactérias chamadas nitrificantes convertem amônio em nitrito (NO₂⁻) e depois para nitrato (NO₃⁻), N₂O é gerado como co-produto da reação. Denitrificação é uma reação microbiótica em que o nitrato é convertido em nitrogênio gasoso (N₂) por bactérias heterotróficas (Cavigelli e Robertson, 2000 *apud* Robertson e Grace, 2003). A denitrificação é considerada ao mesmo tempo um absorvedouro de N₂O (Bouwman e Boumans, 2002a).

diretamente, pela aplicação de N no solo; e ii) indiretamente, quando as emissões de NH_3 e NO_x dos solos cultivados e da combustão de combustíveis fósseis e queima de biomassa, e seus produtos – NH_4^+ e NO_3^- - retornam para o solo e águas superficiais, ou quando há lixiviação e percolação de N, principalmente como NO_3^- , em solos cultivados (IPCC, 2006).

As emissões de óxido nitroso ocorrem, também, naturalmente, sendo os oceanos e solos as principais fontes (Bouwman e Boumans, 2002a).

A emissão global de gases não- CO_2 nas atividades agrícolas representou 10-12% das emissões antropogênicas totais de GEE em 2005, ou seja, 5120 - 6116 $\text{MtCO}_2\text{eq/ano}$ (Denman et al., 2007 e US-EPA, 2006 *apud* IPCC, 2007). As emissões de óxido nitroso são as maiores fontes de GEE na agricultura, 38% das emissões agrícolas são representadas por N_2O (US-EPA, 2006 *apud* IPCC, 2007). Essas emissões representaram 58% das emissões antropogênicas totais de óxido nitroso (IPCC, 2007).

Somadas às emissões de CH_4 , as emissões de óxido nitroso aumentaram em 17% de 1990 a 2005, ou seja, 58 $\text{MtCO}_2\text{eq/ano}$. Três fontes representam 88% do aumento dessas emissões: queima de biomassa (N_2O e CH_4), fermentação dos ruminantes (CH_4) e emissões de N_2O do solo (US-EPA, 2006 *apud* IPCC, 2007).

Há ainda a perspectiva de que até 2030 as emissões de N_2O aumentem em 35-60% devido ao uso de fertilizantes nitrogenados e produção de esterco (FAO, 2003 *apud* IPCC, 2007).

As emissões de NO (óxido nítrico) também são consideradas para cálculo das emissões totais de óxido nitroso, pois na atmosfera, NO é oxidado em N_2O (Bouwman e Boumans, 2002a).

A atual discussão em torno das emissões de óxido nitroso em cultivo de biomassa é se essas emissões podem ser tão significantes que poderiam até mesmo cancelar os benefícios das emissões de GEE evitadas pelo uso de biocombustíveis em substituição aos combustíveis fósseis (Crutzen et al., 2007 e 2008). Essa discussão ganha importância ao passo que de todos os GWP (potencial de aquecimento global) de gases relacionados ao setor agrícola, nenhum é mais

fracamente quantificado do que a geração de N₂O, principalmente para agricultura na zona tropical (Buresh e Austin, 1988; Bronson et al., 1997 *apud* Robertson e Grace, 2004).

2.2 Metodologias utilizadas para cálculo das emissões de N₂O devido às práticas agrícolas

A fertilização com nitrogênio causa emissão de N₂O nos campos agrícolas que é altamente variável. Em geral, assume-se que a quantidade emitida é uma porcentagem da entrada de nitrogênio fertilizante mineral fixada ou nitrogênio biologicamente fixado (Crutzen et al., 2008).

A metodologia do IPCC (2006) para cálculo das emissões de óxido nitroso oferece fatores de emissão padrão baseados em revisão de diversas literaturas. Macedo et al. (2008) calcularam as emissões de N₂O com base na metodologia do IPCC (2006) e utilizaram, para o balanço das emissões de GEE, um fator de emissão igual a 1,325% que, de acordo com Wang et al. (2007b), corresponde aos seguintes valores padrão: 0,01, referente ao uso de N de fertilizante mineral, orgânico e resíduos agrícolas, N mineralizado de solo mineral como resultado da perda de carbono do solo (representado as emissões diretas de N₂O); 0,01, da volatilização do N e re-deposição; 0,0075, da lixiviação e percolação; 0,1 da taxa de volatilização de fertilizante sintético; e 0,3 da taxa de lixiviação e percolação de nitrogênio (representando as emissões indiretas de N₂O) – (1% + 1% x 10% + 0,75% x 30%).

2.2.1 Algumas referências utilizadas pelo IPCC

Os dados do IPCC (2006) são derivados de uma série de estudos, entre eles o de Sawamoto et al. (2005) que argumenta que a metodologia utilizada pelo IPCC (1997 e 2000) superestimava as emissões indiretas de N₂O, sendo o fator de emissão de volatilização depois da descarga na superfície da água (EF_{5g}) o fator superestimado na equação de cálculo das emissões indiretas utilizada pelo IPCC. Em 1997 e 2000 o IPCC considerava esse valor igual a 0,015 (com taxa de incerteza entre 0,003 e 0,06). Os autores reuniram resultados de 14 estudos e observaram que a maioria dos trabalhos apresentou o fator (N₂O-N/NO₃⁻) menor que 0,015. A partir destes estudos,

os autores obtiveram um fator de emissão significativamente menor, ou seja, 0,0024 e, recalculando as emissões indiretas com esse fator, chegaram à emissão de 1,6 a 0,8 TgN/ano.

Quanto às emissões diretas de óxido nitroso, o fator de emissão é derivado de estudos que reúnem dados de medições feitas em diversos estudos. O fator de emissão, ou as emissões globais de óxido nitroso, é resultado de modelos computacionais, ou equações estatísticas utilizando os dados das medições. Medições de óxido nitroso e óxido nítrico foram feitas considerando variáveis como, taxa de aplicação de N, tipo de biomassa cultivada, conteúdo de carbono orgânico no solo, pH do solo, textura, gerenciamento do cultivo, entre outras. Assim, os estudos observaram as emissões de NO e N₂O em função dessas variáveis a fim de conhecer quais mais influenciam essas emissões. A partir destas informações, os estudos chegam às emissões globais de óxido nitroso.

Os estudos considerados foram o de Bouwman e Boumans (2002a e 2002b) que em um primeiro estudo reuniram dados relacionados às variáveis emissões de NO e N₂O com outras variáveis conforme exposto anteriormente, e no segundo estudo utilizaram as informações do primeiro para modelagem das emissões anuais globais de óxido nitroso em campos fertilizados. Também foi considerado o estudo de Bouwman e Stehfest (2006) que segue basicamente a mesma metodologia dos estudos previamente citados, mas incluindo também dados de emissões de NO e N₂O em solos com cobertura natural. Para as emissões de N₂O devido à aplicação de resíduos no campo, o estudo de Novoa e Tejeda (2006) foi considerado e baseou em dados de literatura revisada.

2.2.2 Metodologia aplicada por Crutzen

Para Crutzen et al. (2007 e 2008) a quantidade de nitrogênio emitida como N₂O está entre 3% - 5%. Este valor é resultado da subtração das emissões de óxido nitroso na fase pré-industrial (10,2 TgN₂O-N/ano) da atual concentração desse gás na atmosfera (15,8 TgN₂O-N/ano), ou seja, 5,6 TgN₂O-N/ano é a emissão antropogênica global de N₂O, com uma taxa de incerteza entre 0-0,9 TgN₂O-N/ano por causa do decréscimo das emissões naturais de N₂O devido aos 30% do desmatamento global (Prather et al., 2001; Klein Goldewijk, 2001 *apud* Crutzen et al., 2007).

Considerando esta incerteza, as emissões variam de 5,6-6,5 TgN₂O-N/ano. Deste valor os autores subtraíram ainda a fonte industrial (0,7-1,3 TgN₂O-N/ano), resultando que as emissões antropogênicas de óxido nitroso estão entre 4,3-5,8 TgN₂O-N/ano, ou seja, 3,3-4,6% das emissões das novas fonte antropogênicas de nitrogênio de 127 TgN/ano no início dos anos 1990. A partir desta lógica, os autores assumiram que o fator de emissão de óxido nitroso nos campos agrícolas está entre 3-5%.

Aparentemente não há outra referência que esteja na mesma linha que a estimativa feita por Crutzen et al. (2007 e 2008). Sobre essa estimativa, Gallagher (2008) faz algumas considerações:

“i) a atribuição das emissões de óxido nitroso de solos cultivados usa um excesso de cálculo que é altamente suscetível aos valores assumidos de fluxos individuais de solos não cultivados; ii) a comparação com a estimativa do IPCC é inapropriada desde que compara emissões totais do solo com emissões diretas na estimativa do IPCC. As taxas de emissões totais do solo do IPCC atualmente tem um insignificante superposição com a taxa de valores derivados por Crutzen et al.; iii) o artigo assume uma eficiência de 40% de fertilizante nitrogenado por todos os grupos, o que não é apropriado; v) a análise ignora a alocação de co-produtos, que é assumida para parcialmente compensar as emissões de GEE de todos os outros estágios da produção do biocombustível”.

Mais recentemente, Smeets et al.(2009) publicaram um estudo sobre a contribuição das emissões de óxido nitroso no balanço das emissões de GEE dos biocombustíveis de produção convencional. Os autores apresentaram incertezas relacionadas às emissões de óxido nitroso pela aplicação de fertilizantes e que essas incertezas estão relacionadas aos modelos estatísticos, além disto, as emissões de N₂O variam de acordo com a aplicação de N em cada cultivo agrícola e com o clima. Sobre as estimativas de Crutzen et al. (2007 e 2008), os autores observam que a maior desvantagem é a metodologia considerar as emissões de N₂O dos sistemas de produção de animais e que esse sistema não está relacionado à produção de biomassa para biocombustíveis.

Devido à polêmica do assunto, o balanço das emissões de GEE apresentado por Macedo et al. (2008), que utiliza o fator do IPCC para emissões de óxido nitroso, será comparado com um

novo balanço utilizando todos os dados de emissões de GEE no ciclo de vida do etanol brasileiro assumidos por Macedo et al, com exceção das emissões devido à aplicação da uréia (fertilizante nitrogenado).

2.3 Comparação de resultados por diferentes metodologias

Macedo et al. (2008) consideraram os fatores de emissão do IPCC para quantificação das emissões de GEE resultantes da aplicação de fertilizantes nitrogenados para cultivo da cana de açúcar no Brasil. Macedo et al. (2008) têm igualmente considerado as emissões de óxido nitroso devido ao nitrogênio não capturado pela cana de açúcar e devido à queima da cana de açúcar no campo. No caso de óxido nitroso emitido pela planta, os autores consideraram a quantidade de nitrogênio aplicada como uréia e usaram o fator de emissão adotado pelo IPCC (2006).

No caso do etanol produzido da cana de açúcar a conclusão de Crutzen et al. (2008) é que a razão entre emissões de GEE (em CO₂eq) devido ao óxido nitroso (Meq) e as emissões de dióxido de carbono devido à substituição (M) estaria na faixa de 0,5-0,9 (Crutzen et al., 2007 e 2008).

Vale mencionar também que os resultados apresentados por Crutzen et al. (2008) a respeito do etanol de cana de açúcar são os melhores entre todos os biocombustíveis considerados. No entanto, os autores desenvolveram suas análises baseados na informação de aplicação de nitrogênio que correspondem a testes realizados na Tanzânia (7,3 gN/kg de cana de açúcar, base de matéria seca) (Isa et al., 2005 *apud* Crutzen et al., 2008). Este parâmetro deveria ser verificado com as praticas brasileiras de fertilização.

A Tabela 2.1 apresenta uma estimativa do uso de nitrogênio por kg de cana de açúcar, de acordo com Macedo et al. (2008). Um aspecto importante da produção de cana de açúcar no Brasil é que o nitrogênio é aplicado como fertilizante industrial, como vinhaça e como torta de filtro, sendo a vinhaça um sub-produto da destilação do etanol e torta de filtro um sub-produto do clareamento do caldo.

Tabela 2.1 Uso de nitrogênio no cultivo da cana de açúcar – gramas de nitrogênio por kg de cana de açúcar

	g/kg
Nitrogênio aplicado como fertilizante	0,80
Nitrogênio aplicado como vinhaça	0,44 ^a
Nitrogênio aplicado como torta de filtro	0,21 ^b
Total	1,45

Fonte: Macedo et al. (2008)

Notas: ^a Considerando o uso de vinhaça igual a 140 m³/ha, que o conteúdo de nitrogênio é de 0,36 kg/m³ de vinhaça aplicada em 77% da área de canavial e uma produtividade média de 87,1 TC/ha (Macedo et al., 2008).

^b Considerando o uso por ha de 5 toneladas de torta de filtro com um conteúdo de nitrogênio de 12,5 kg/t de torta e que a mesma é aplicada em 30% da área; a produtividade média é 87,1 TC/ha (Macedo et al., 2008).

Assim, a fertilização sob condições brasileiras foi calculada como 4,83-5,18 gN/kg de cana de açúcar, base seca⁹.

De acordo com Macedo et al. (2008), as emissões de óxido nitroso devido à aplicação de N como fertilizante e resíduos são equivalentes a 8,9 kgCO₂/TC, ou seja, 4,6 gCO₂/MJ, ou 72% das emissões do solo calculadas (ver Tabela 1.2). Supondo que a emissão de óxido nitroso varie de 3% a 5% do nitrogênio aplicado (e não 1,325%), as emissões de óxido nitroso aumentariam para 10,4 ou 17,4 gCO₂eq/MJ, respectivamente. O impacto no resultado final do balanço de GEE seria o seguinte: emissões do solo aumentariam para 12,18 ou 19,12 gCO₂eq/MJ, respectivamente, e o total de emissões de GEE, considerando os créditos, seria de 18,18 ou 25,12 gCO₂eq/MJ. A Figura 2.1, a seguir, ilustra a participação das emissões de óxido nitroso, considerando as diferentes metodologias, nas emissões totais de GEE no ciclo de vida do etanol brasileiro.

⁹ Sem levar em conta o fato de que o nitrogênio é aplicado majoritariamente como uréia e considerando os dados apresentados na Tabela 2.1.

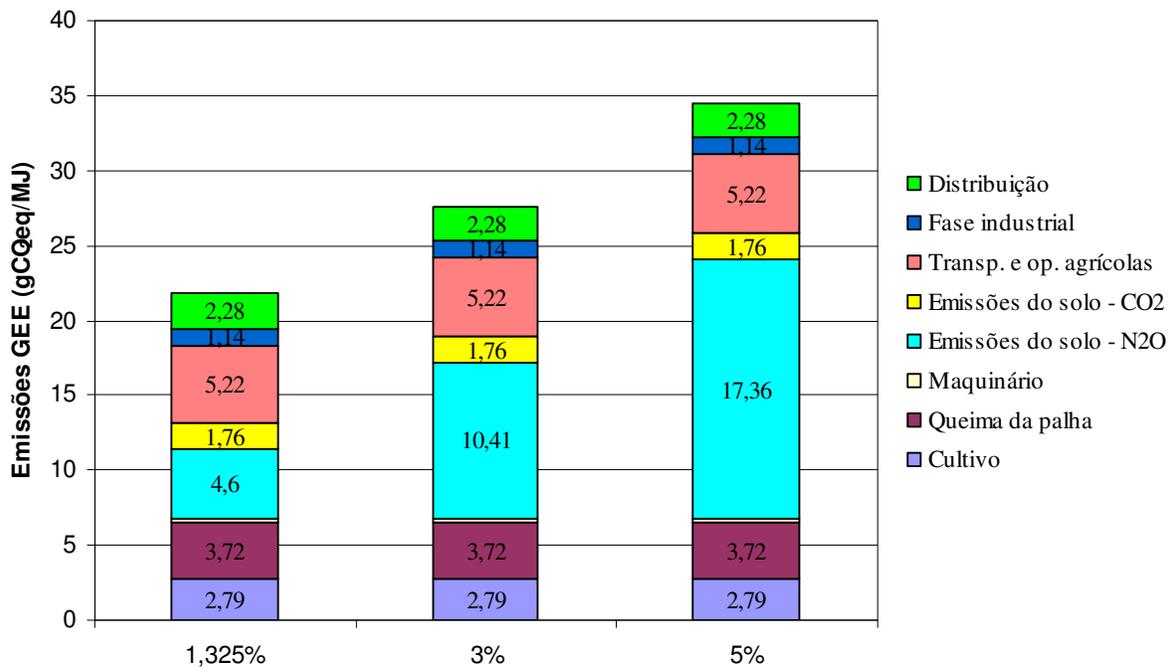


Figura 2.1 Emissão de N₂O no ciclo de vida do etanol, considerando diferentes metodologias

Alternativamente, se Crutzen et al. (2007 e 2008) tivessem desenvolvido suas análises baseadas nos parâmetros apresentados por Macedo et al. (2008), exceto a porcentagem de nitrogênio emitida como óxido nitroso, o resultado da razão (Meq/M) estaria entre 0,12-0,20, e não 0,5-0,9, como publicado.

Por não haver estudos na mesma linha que o de Crutzen et al. (2007 e 2008) e por várias incertezas relacionadas a esse estudo terem sido levantadas, os balanços apresentados neste capítulo foram feitos assumindo que apenas 1,325% do nitrogênio fertilizante aplicado na lavoura seja emitido como N₂O, conforme adotado por Macedo et al. (2008).

2.4 Influência da colheita mecanizada na absorção de nitrogênio pela planta

Outro importante aspecto é que com o término da queima da cana de açúcar para colheita manual¹⁰, mais palha será deixada no campo, reduzindo a necessidade de fertilização mineral (BERTONCINI, 2008).

¹⁰ Protocolo firmado pelo Governo do Estado e a União da Indústria da Cana de açúcar (ÚNICA) antecipa para 2014

Neste sentido, três aspectos devem ser considerados para cálculos das emissões de GEE: i) emissão de N devido à mineralização de resíduos do cultivo deixados no campo (Bouwman e Boumans, 2002a; Novoa e Tejeda, 2006); ii) emissões de amônia, que podem aumentar dependendo da prática de aplicação de fertilizante nitrogenado; e, iii) emissões evitadas de N₂O devido ao término da queima da cana de açúcar pré-colheita.

De acordo com Macedo et al. (2008), as emissões de óxido nitroso resultante do processo de queima pré-colheita foi de 1,8 kgCO₂ eq/TC e o fator de emissão de N₂O referente à palha não queimada é de 0,028 kgCO₂ eq/kg de palha deixada no campo, considerando que o conteúdo de nitrogênio da palha é de 0,5%.

e 2017 o fim da queima, respectivamente, nas áreas mecanizáveis e não mecanizáveis. A Lei 11.941/2002 estabelece como prazos para erradicação da queima 2021 (áreas mecanizáveis) e 2031 (áreas não mecanizáveis).

Capítulo 3

Balancos energéticos e de emissões de GEE

O objetivo de realizar os balanços apresentados neste capítulo é verificar as vantagens, quanto às emissões de gases de efeito estufa e ao consumo energético ao longo da cadeia produtiva, da substituição da gasolina por etanol derivado da cana de açúcar. Para isto, considera-se a energia embutida em máquinas, equipamentos, prédios e nos insumos agrícolas e industriais. Além das emissões de GEE associadas ao uso de energia no ciclo de vida do etanol, são observadas também as emissões associadas ao uso do solo, ou seja, as emissões de óxido nitroso pela aplicação de fertilizantes nitrogenados (assunto abordado mais detalhadamente no Capítulo 2 deste trabalho), as emissões de GEE associadas à queima da pré-colheita da cana de açúcar e as emissões de dióxido de carbono devido à aplicação de cal e uréia.

A análise é do tipo do poço às rodas por abranger todas as etapas do ciclo de vida do etanol: cultivo da cana de açúcar, transporte da biomassa até as usinas, produção do etanol e distribuição final. A exemplo do balanço das emissões de GEE realizado por Macedo et al. (2008), para as emissões da combustão do etanol foram consideradas somente as emissões de dióxido de carbono, sendo estas assumidas iguais a zero porque são reabsorvidas pela cana durante o crescimento. Os dados refletem a safra de 2005/2006.

Quanto à fronteira espacial, são feitas duas análises: i) produção e uso do etanol de cana de açúcar no Brasil; e ii) produção no Brasil e uso na Europa.

Os dados de consumo energético e de emissões de GEE – relacionados tanto ao uso de combustíveis fósseis quanto a emissões do solo – nas etapas agrícola e industrial foram extraídos do estudo de Macedo et al. (2008), e os dados para etapa de distribuição do etanol são de Seabra (2008).

As emissões de GEE relacionadas à mudança do uso do solo devido à expansão da cana de açúcar são apresentadas no próximo capítulo e apenas para o estado de São Paulo. Os dados de estoque de carbono no solo encontrados na literatura são referentes ao solo Latossolo, Argissolo e Quartzarênio e a dificuldade encontrada para saber exatamente a classe de solo onde houve a expansão da cana de açúcar em cada estado são os motivos para não calcular as emissões de GEE devido à expansão da cana de açúcar em cada estado para então somá-las aos balanços das emissões de GEE do etanol produzido nos estados analisados neste trabalho.

Dados de emissões da queima da biomassa apresentados por Macedo et al (2008) são referentes às emissões de CH₄ e N₂O para a queima da cana de açúcar e é uma média da área queimada em toda a região Centro-Sul. Considerando que os estados da região Centro-Sul apresentam percentuais diferentes para colheita manual e colheita mecanizada, neste trabalho optou-se por calcular, com base no dado apresentado por Macedo et al. (2008) e no relatório da Conab (2008), as emissões de GEE associadas à queima da cana de acordo com os percentuais de cana colhida sem queima em cada estado. A hipótese é a de que cana colhida manualmente passa pela queima pré-colheita.

Desta maneira, as reduções das emissões de GEE – quando a gasolina é substituída pelo etanol – são apresentadas para os estados da região Centro-Sul onde a produção de cana e etanol são significativas (São Paulo, Minas Gerais, Paraná, Goiás, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul). Para isto, as emissões de GEE levantadas por Macedo et al. (2008) e Seabra (2008) foram recalculadas considerando as respectivas produtividades de cana e de etanol em cada um desses estados.

Os dados utilizados para os balanços de energia e das emissões de GEE apresentados neste capítulo estão no Anexo I deste trabalho.

Para alocação de co-produtos, este estudo considera hipóteses diferentes das apresentadas por Macedo et al. (2008). Discutem-se, a seguir, as hipóteses utilizadas.

3.1 Alocação dos co-produtos

Uma importante discussão metodológica a respeito de balanço de energia e das emissões de GEE é a de como fazer alocação entre produtos e co-produtos. Metodologias são escolhidas de acordo com as restrições de dados, a fim de evitar grande complexidade ou apenas por causa de interesses específicos.

Conforme mencionado no Capítulo 1, os créditos considerados no caso da produção de etanol de cana de açúcar são atribuídos ao uso de bagaço excedente como combustível em outros ramos industriais, substituindo óleo combustível para gerar vapor, e devido à produção de eletricidade excedente que é vendida para o setor elétrico.

Macedo et al. (2008) consideraram que de 5-10% do total de bagaço disponível nas usinas seria vendido como combustível. Isto costumava ser prática comum para algumas usinas de cana de açúcar no estado de São Paulo, mas tem sido reduzida ao passo que as indústrias têm outras opções de combustível fornecido e as usinas têm usado todo o bagaço. Neste sentido, é importante considerar o impacto das hipóteses usadas por Macedo et al. (2008) sobre o resultado final. Uma análise sensitiva, das emissões evitadas pelo uso de etanol de cana de açúcar em substituição à gasolina considerando os dados do estudo de Macedo et al. (2008) e as diferentes hipóteses para alocação dos créditos dos co-produtos, pode ser verificada no Anexo II deste trabalho.

Quanto à produção de eletricidade excedente, Macedo et al. (2008) e Seabra (2008) consideraram que em média 10 kWh/t de cana de açúcar como eletricidade excedente tem sido

vendida para rede de eletricidade. Este cenário é representativo das médias atuais no estado de São Paulo e poderia ser significativamente expandido nos próximos anos.

Há duas preocupações sobre as hipóteses usadas por Macedo et al. (2008): primeiro, foi considerado que as emissões evitadas devido à geração de eletricidade excedente poderiam ser estimadas com base na média de fatores de emissão para geração de energia elétrica em 2005 (579 tCO₂eq/GWh). Esta é uma hipótese discutível já que a produção de eletricidade a partir do bagaço impactaria as emissões no sistema elétrico brasileiro, e não no mundo inteiro.

Recentemente mais de 20 usinas brasileiras têm apresentado Documentos de Plano de Projetos (DPP) para a UNFCCC (Convenção Quadro das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas) a fim de conseguir créditos de emissões evitadas de GEE no contexto do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL); emissões evitadas seriam atribuídas à produção de eletricidade a partir de biomassa (bagaço da cana de açúcar). A metodologia utilizada para estimar emissões evitadas foi a AM0015 (co-geração baseada em bagaço conectada à uma rede elétrica) que desde novembro de 2005 foi substituída pela metodologia mais usual ACM6 (rede conectada à eletricidade de resíduos de biomassas)¹¹ (Fennhann, 2006). Devido à grande importância das usinas de energia hidrelétrica no Brasil, as emissões evitadas calculadas são menores do que em outros países (por exemplo, Índia e China). No caso da maioria dos projetos MDL sobre produção de eletricidade excedente a partir do bagaço da cana de açúcar o fator de emissão foi estimado como 268 tCO₂/GWh.

¹¹ De acordo com a metodologia AM0015, o fator de emissão é calculado com uma margem combinada consistente com a combinação de fatores de margem de operação (OM) e margem de construção (BM). A linha de base do fator de emissão de eletricidade é calculada através de uma fórmula de média ponderada, sendo o peso 50% e 50% para OM e BM. A partir de 2006, para projetos de co-geração no estado de São Paulo, o fator de emissão OM foi estimado em 0,4310 tCO₂/MWh enquanto o fator de emissão BM foi estimado em 0,1045 tCO₂/MWh. Assim, por falta de peso, o fator de emissão estimado seria 0,268 tCO₂/MWh, ou seja, cerca de 65-75% do fator de emissão de uma turbina a gás convencional de ciclo combinado. Em comparação com países que tem o volume de geração de eletricidade com usinas termelétricas baseadas em carvão (fator de emissão em uma faixa de 800-1.100 tCO₂/MWh), está é uma desvantagem clara.

Deste modo, Macedo et al. (2008) usaram um fator de emissão duas vezes maior do que o fator aceito geralmente para projetos MDL. Conforme apresentado abaixo, o impacto no resultado de emissões evitadas de GEE devido à produção de etanol de cana de açúcar é menor porque a atual produção de eletricidade é muito pequena com relação ao potencial existente.

Outra importante discussão a respeito das hipóteses consideradas por Macedo et al. (2008) é que é controverso considerar emissões evitadas pela produção de eletricidade a partir de bagaço residual de cana de açúcar como créditos da produção de etanol. À respeito, poderia ser questionado o fato de algumas usinas ter conseguido créditos MDL pela produção de eletricidade excedente e os benefícios das emissões evitadas seriam quantificados duas vezes.

Baseado nestas informações, esta análise considera que não há créditos pelo uso de bagaço excedente em outras indústrias, e os créditos gerados pela venda de eletricidade excedente foram considerados assumindo que o fator de emissão pela geração de eletricidade a partir do bagaço é de 268 tCO₂/GWh.

Foi mantido o método de alocação do consumo energético e das emissões de GEE entre produto e co-produto (eletricidade excedente) usado por Macedo et al. (2008), ou seja, o de substituição.

3.2 Uso de B3

Os balanços de energia e das emissões de GEE da cadeia produtiva do etanol brasileiro realizado por Macedo et al (2008) e Seabra (2008) consideram o uso de diesel nas etapas agrícolas (operação agrícolas e transporte da cana até as usinas) e na etapa de distribuição final do etanol. No entanto, com a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira¹², este trabalho reavalia o balanço das emissões de GEE do etanol considerando o uso de B3 (3% de biodiesel e 97% de diesel) na cadeia produtiva do etanol brasileiro. Para isto, foi utilizado a ACV

¹² O biodiesel foi introduzido na matriz energética brasileira através da Lei nº 11097, de 13 de janeiro de 2005, onde fica estabelecida a obrigatoriedade de adição de um percentual mínimo de biodiesel ao diesel (ANP; 2009).

do biodiesel de soja produzido e consumido no Canadá (CHEMINFO et al., 2008b)¹³, cujos dados são do modelo computacional GHGenius e o método para alocação entre produtos e co-produtos é o de massa.

Para o balanço energético, foram mantidos os dados de Macedo et al. (2008) e Seabra (2008) referentes ao consumo de diesel na cadeia produtiva do etanol já que os dados de consumo energético na cadeia produtiva do biodiesel de soja apresentados pelo Cheminfo et al. (2008b) não estão separados em consumo energético de fontes fósseis e de fontes renováveis. Assim, não é viável efetuar o balanço energético para comparação com os dados de Macedo et al (2008), que calcularam o balanço energético como sendo a razão entre a soma de energia produzida no processo e a soma da energia apenas dos insumos fósseis.

De acordo com ANP (Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis), a soja tem sido a matéria-prima mais utilizada para a produção de biodiesel no Brasil, por este motivo os dados referentes à cadeia produtiva do biodiesel de soja foram os adotados neste trabalho para o balanço das emissões de GEE da cadeia produtiva do etanol.

3.3 Balanço Energético

As diferenças entre os balanços de energia da cadeia produtiva do etanol em cada estado analisado neste trabalho: i) às produtividades, da cana e do etanol, nestes estados; ii) às hipóteses adotadas para alocação entre produto e co-produtos e, iii) ao percentual da área com cana colhida mecanicamente. A Figura 3.1, a seguir, apresenta o consumo energético em cada etapa da cadeia produtiva do etanol derivado da cana em cada estado da região Centro-Sul onde a produção do etanol é significativa.

¹³ Panichelli et al (2008) realizaram um estudo de ACV do biodiesel de soja produzido na Argentina. Os autores abordam as emissões associadas à mudança do uso do solo considerando que a soja expandiu, entre outras áreas, em áreas de floresta. Como essas emissões não são apresentadas separadamente no estudo e podem não representar a realidade brasileira de produção de soja, optou-se por não utilizar esse estudo.

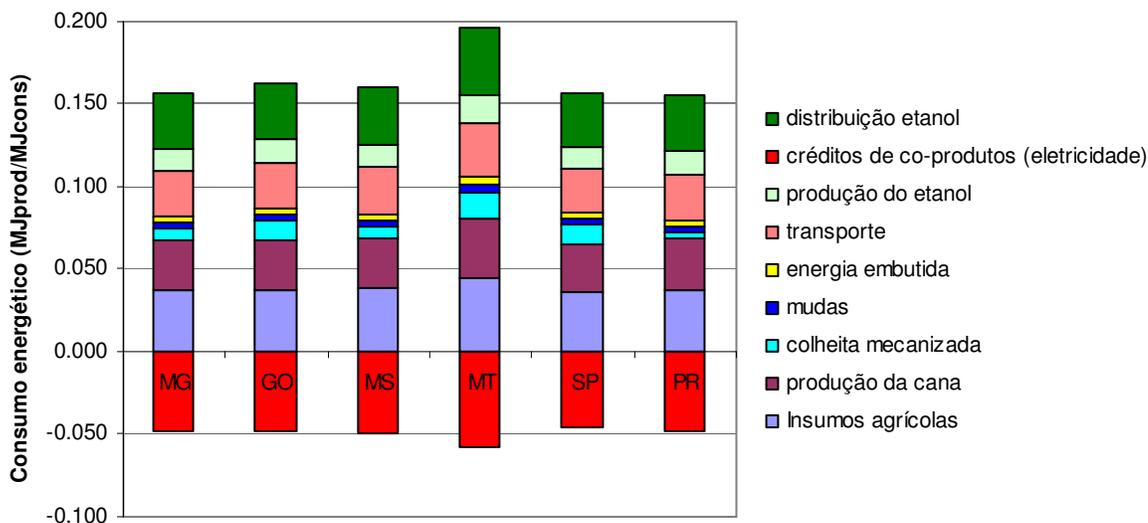


Figura 3.1 Consumo energético na cadeia produtiva do etanol consumido no Brasil

Na Figura 3.1 acima, o consumo energético em insumos agrícolas é referente ao consumo de energia para a produção de fertilizantes, herbicidas, inseticidas e cal utilizados no cultivo da cana.

O consumo de diesel na prática de colheita mecanizada foi apresentado separado do consumo de diesel nas operações agrícolas para melhor acompanhamento do impacto da prática adotada para colheita da cana no balanço energético.

Pode ser observado que o consumo de diesel na cadeia produtiva do etanol representa quase todo o consumo de energia fóssil do balanço energético. Neste sentido, melhorias para redução do consumo desse combustível pode contribuir significativamente para aumentar a atratividade do etanol de cana de açúcar.

Uma melhoria possível e considerada por Seabra (2008) em um cenário para 2020, no caso do consumo de diesel na etapa de distribuição final, é a distribuição de 20% do etanol por dutos e 80% por caminhões. De acordo com o autor, o consumo energético nesta etapa passaria de 58,3 MJ/TC para 52,2 MJ/TC, considerando dados de produção na região Centro-Sul.

Outra melhoria possível, e discutida no Capítulo 5 deste trabalho, é a substituição de caminhões movidos a diesel por caminhões com motores a etanol para o transporte da cana até as usinas e distribuição final do etanol.

Os balanços energéticos do etanol de cana em cada um desses estados são apresentados na Figura 3.2 abaixo.

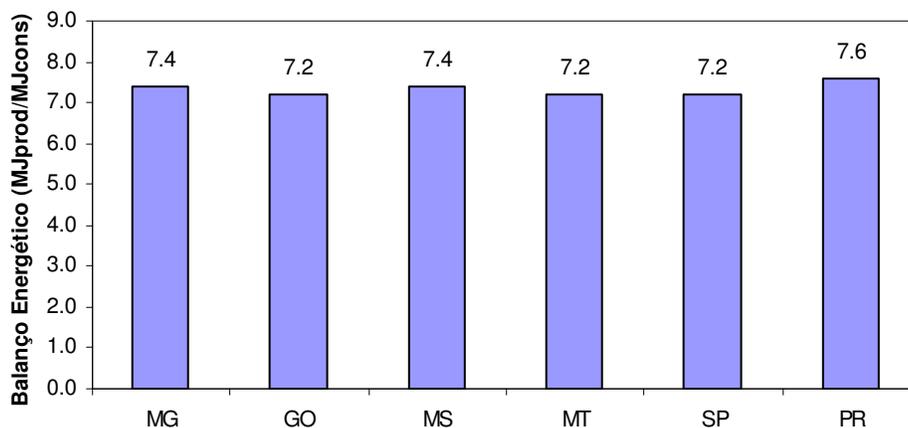


Figura 3.2 Balanço energético do etanol de cana consumido no Brasil

Etanol de cana de açúcar produzido no Paraná apresenta o melhor balanço de energia porque a colheita mecanizada na safra de 2007/2008 no estado é menor que nos demais estados da região Centro-Sul (10,4 %), além disto, o estado do Paraná tem a segunda maior produtividade agrícola da região.

O balanço de energia do etanol produzido em Minas Gerais é resultado da produtividade industrial no estado (81,49 l/TC) – maior que nos demais estados analisados, com exceção de Goiás (82,49 l/TC) – influenciada pela maior quantidade de ATR (Açúcar Total Recuperável) na cana¹⁴ produzida naquela região.

¹⁴ De acordo com o relatório da Conab (2008), o ATR é uma forma de medir o rendimento industrial do caldo de cana e pode indicar quais estados possuem as melhores condições, ambientais e climáticas, para a produção da cana. O ATR “representa a quantidade de matéria solúvel que pode se transformar em sacarose no caldo da cana, é a matéria-prima básica do processo de fabricação dos produtos finais” (Conab, 2008).

Em Mato Grosso do Sul a prática de colheita mecanizada também é pequena (20%), comparada aos outros estados da região Centro-Sul, e a produtividade agrícola é a terceira maior da região, o que justifica o resultado do balanço energético para o etanol de cana nesse estado.

Nota-se que, embora os créditos do bagaço excedente não tenham sido considerados nesta análise, o balanço de energia do etanol em Paraná resultou maior que o balanço energético utilizado como referência (7,5). O resultado da razão entre energia produzida e consumida na cadeia produtiva do etanol em Paraná, em comparação ao caso de referência, pode ser justificada pelo menor consumo de diesel na atividade de colheita mecanizada – Macedo et al. (2008) consideraram que a colheita mecanizada da cana de açúcar era feita em 50% da área cultivada com essa biomassa na safra de 2005/2006.

3.3.1 Balanço energético considerando o uso do etanol no exterior

A fim de avaliar o balanço energético quando o etanol é exportado para consumo em países europeus é necessário considerar o uso de energia para transportar etanol do Brasil até o local de uso final. Esta análise foi feita considerando as seguintes hipóteses:

- Em primeiro lugar, é necessário considerar o consumo energético para transportar etanol das usinas até o porto. Isto foi feito considerando a mesma metodologia usada por Seabra (2008) para a etapa de distribuição, mas corrigindo a distância média que não é mais 337 km, mas as distâncias de um ponto até o porto mais próximo. Estas distâncias foram estimadas a partir do CANASAT (Mapeamento da cana via imagens de satélite de observação da Terra)¹⁵, que traça a distância em linha reta. Considerando que a trajetória das usinas até os portos não é uma linha reta, somou-se mais 30% da distância¹⁶. A Figura 3.3, a seguir, apresenta as linhas traçadas para estimativa das distâncias dos estados do Centro-Sul até o porto de Santos.

¹⁵ Acessado em www.dsr.inpe.br/mapdsr/frame.jsp

¹⁶ Valor arbitrário.

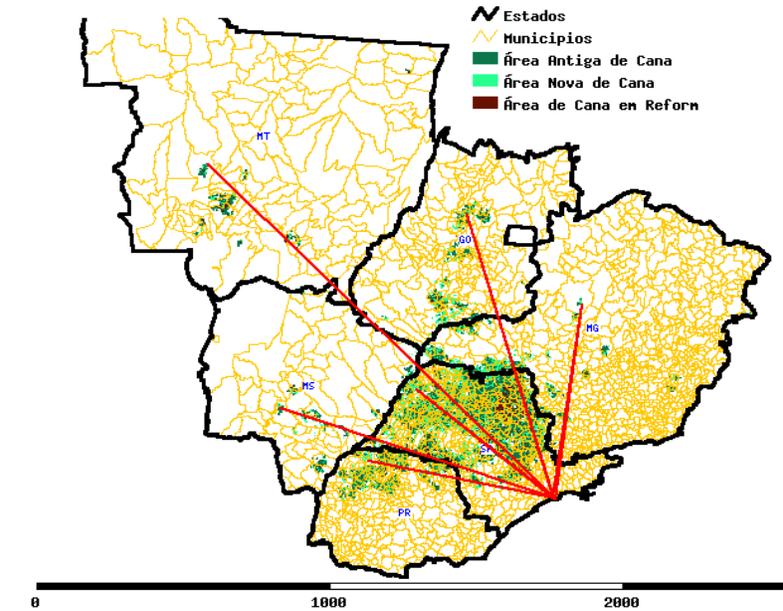


Figura 3.3 Avaliação da distância até o Porto de Santos

Fonte: CANASAT

Assim, o consumo energético para o transporte do etanol até os portos foi avaliado a partir da equação 3.1 abaixo.

$$CET = (CE/337) * CEE \quad (MJ/MJ) \quad (3.1)$$

Onde: CET é o consumo energético na etapa de distribuição até o porto em cada estado analisado; CE é a distância percorrida, em cada estado, por caminhões para o transporte do etanol até os portos; e CEE é o consumo energético para distribuição do etanol em cada estado.

O consumo de energia para o transporte até os portos, bem como as distâncias consideradas, é apresentado na Tabela 3.1 a seguir.

Tabela 3.1 Consumo energético e distâncias para transporte do etanol até os portos

Estados	Distância em linha reta (km)	Correção (+30%) (km)	Distância corrigida (km)	Consumo energético (MJ/MJ)
MG	1366,32	409,90	1776,22	0,18
GO	2673,63	802,09	3475,72	0,35
MS	1973,16	591,95	2565,11	0,26
MT	1660,65	498,19	2158,84	0,26
SP	603,66	181,10	784,76	0,08
PR	529,48	158,84	688,32	0,07

• Em segundo lugar, o consumo energético para transportar o etanol do Brasil (diferentes portos) até a Europa (Rotterdam) por navios deveria ser avaliado¹⁷. Foi considerado que a capacidade de carga (CC) do navio é 300.000 toneladas (aproximadamente 380 mil litros de etanol). O consumo específico de combustível (CE) de navegação foi avaliado da equação (3.2) (GaiB4, 2005 *apud* Langer, 2006).

$$CE = (0,0911) * (CC)^{-0,4026} \text{ [kg combustível/t.km]} \quad (3.2)^{18}$$

O que leva a 0,568 t combustível/(t.km), ou 551 l combustível/(t.km). Conseqüentemente, consumo de combustível seria aproximadamente 1,7 mil toneladas de óleo combustível para uma viagem com capacidade máxima.

É considerado que o óleo combustível tem o mesmo PCI que o óleo combustível residual, ou seja, PCI = 40,2 MJ/kg. Na Tabela 3.2, a seguir, estão o consumo de energia para exportação e as distâncias consideradas. Na seqüência, na Figura 3.4, é apresentado o consumo de energia na cadeia produtiva do etanol brasileiro consumido na Europa.

¹⁷ As distâncias entre os portos foram extraídas do site: www.dataloy.com

¹⁸ Equação válida para navios com capacidade de carga entre 10.000 t e 300.000 toneladas.

Tabela 3.2 Distâncias e consumo energético para exportação do etanol

Portos	Distância (km)	Consumo energético ($MJ_{\text{fóssil}}/MJ_{\text{renovável}}$)
Santos - Rotterdam	8817,32	0,0080
Paranaguá - Rotterdam	9058,67	0,0080

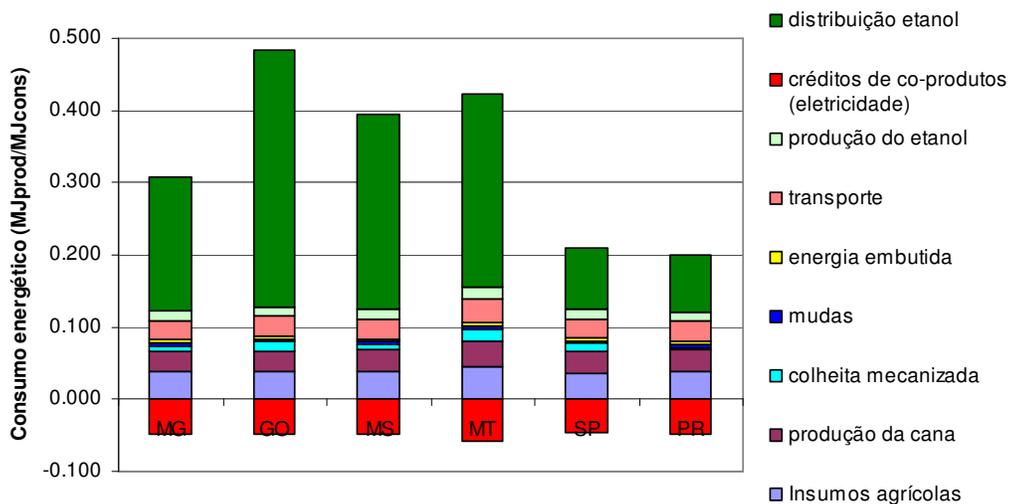


Figura 3.4 Consumo de energia fóssil na cadeia produtiva do etanol brasileiro consumido na Europa

No caso do uso do etanol brasileiro na Europa, se destaca o consumo de energia na etapa de distribuição do etanol produzido em Goiás, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso e Minas Gerais.

Na Figura 3.5, a seguir, são apresentados os balanços de energia do etanol produzido nestes estados.

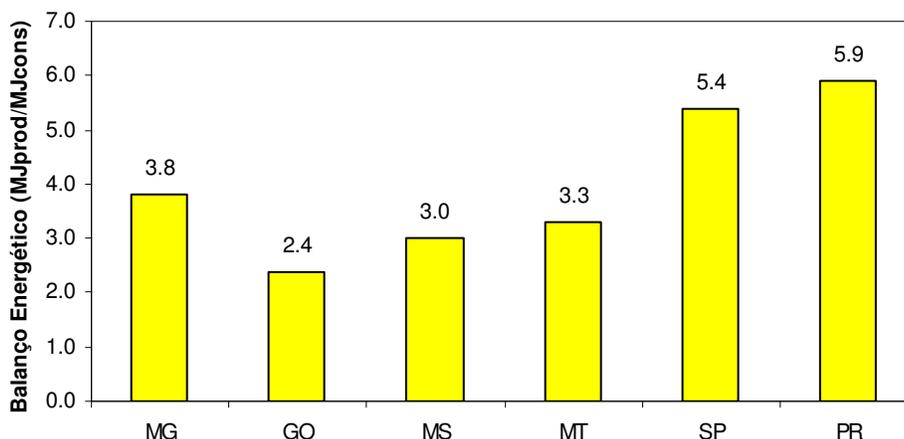


Figura 3.5 Balanço Energético do etanol brasileiro consumido na Europa

O balanço energético do etanol produzido no Paraná é resultado do menor consumo de diesel nas operações de colheita mecanizada e de transporte do etanol até o porto. As produtividades, agrícola e industrial, do estado também influenciam o balanço.

Embora menos atraentes que os balanços energéticos do etanol produzido e consumido no Brasil, os balanços energéticos do etanol brasileiro consumido na Europa resultaram melhores que os balanços energéticos de etanol derivado de outras biomassas (ver Figura 1.5 no Capítulo 1).

Os balanços podem ser mais favoráveis se o etanol de cana for transportado até os portos por dutos.

Do mesmo modo que para o balanço energético do etanol produzido e consumido no Brasil, no Capítulo 5 deste trabalho é feita uma análise do impacto do uso de caminhões movidos a etanol no balanço energético do etanol brasileiro exportado para Europa.

3.4 Balanço das emissões de gases de efeito estufa

Para avaliar as emissões de gases de efeito estufa evitadas pela substituição da gasolina por etanol é necessário obter dados das emissões do completo ciclo de vida da gasolina e o fator de substituição entre a gasolina e etanol para análise da eficiência relativa do motor quando da substituição.

Quanto às emissões do ciclo de vida da gasolina, há algumas divergências dependendo da fonte de informação. Macedo et al. (2008) e Seabra (2008) consideraram 22,3 gC/MJ de combustível, ou seja, 81,8 gCO₂/MJ como emissões de GEE do ciclo da gasolina. Este parâmetro foi adotado pelo IPCC (2006) e considera emissões diretas (ou seja, emissões da combustão da gasolina – 69,3 gCO₂eq/MJ). Cheminfo (2008a) considerou ser 86,72 gCO₂eq/MJ as emissões totais do ciclo de vida da gasolina, sendo 64,72 gCO₂eq/MJ as emissões da queima do combustível (ver Tabela 1.3, Capítulo 1). Por outro lado, no Decreto Alemão de Sustentabilidade 85 gCO₂eq/MJ foi adotado como valor de referência para a gasolina.

Neste trabalho, em um primeiro momento, é adotado o valor do IPCC (2006) para o balanço das emissões de GEE do etanol produzido e usado no Brasil.

Na análise das emissões evitadas pelo uso do etanol na Europa é considerado o fator de emissão 85 gCO₂/MJ para satisfazer as normas européias.

O segundo parâmetro a ser considerado é o fator de substituição entre etanol e gasolina. Este fator depende do poder calorífico de ambos os combustíveis e também da eficiência dos motores movidos à gasolina pura e a uma mistura gasolina-etanol. Como resultado dos quase 30 anos de experiência com motores a etanol, o fator de substituição no Brasil reflete um aumento de eficiência quando misturas etanol-gasolina são usadas¹⁹. De acordo com Macedo et al. (2008), o fator de substituição da gasolina pura por E25 (25% etanol anidro e 75% gasolina pura, como usada no Brasil), considerando o aumento de eficiência, é 1,25 L etanol anidro/1 L gasolina.

¹⁹ Etanol tem maior octanagem do que a gasolina pura e, conseqüentemente, o motor poderia ser designado para razão de compressão maior. Um motor com maior razão de compressão é mais eficiente.

Neste caso, a eficiência relativa (ver equação 1, Capítulo 1) é a relação entre o fator de substituição quando não há variação de eficiência (1,42) e o fator de substituição quando há aumento da eficiência (1,25).

No caso de uso do etanol em outros países, onde o etanol substituiria a gasolina em mistura com etanol até 10%, faz sentido considerar o fator de substituição 1,42 L etanol = 1 L gasolina (conforme apresentado no Capítulo 1 deste trabalho, como neste caso o fator de substituição é a relação entre os PCIs dos combustíveis analisados, não há variação de eficiência e, assim, a eficiência relativa é igual a 1). O fator de emissão do etanol contabilizando as emissões de GEE devido ao transporte para exportação também deve ser analisado.

As emissões de GEE na etapa de distribuição do etanol foram calculadas considerando as mesmas hipóteses utilizadas para o cálculo do consumo energético nessa etapa.

Para calcular as emissões totais de GEE do biodiesel (B3) foram utilizados os dados da cadeia produtiva do diesel e do biodiesel de soja, cujos fatores de emissão de GEE em cada etapa dos ciclos de vida são apresentados na Tabela 3.3 abaixo.

Tabela 3.3 Fatores de emissão de GEE nos ciclos de vida do diesel e do Biodiesel

gCO ₂ eq/MJ	Diesel	Biodiesel (100%)
Insumos agrícolas	6,56	21,61
Transporte da matéria-prima	0,95	2,93
Produção do combustível	8,32	12,20
Outras emissões	2,36	65,38
Emissões deslocadas	0,00	-79,27
Emissões da distribuição	0,61	1,37
Emissões da combustão	70,30	1,75
Total	89,08	25,97

Fonte: Cheminfo et al.(2008b)

As emissões de GEE nas etapas de operações agrícolas, transporte da matéria-prima e distribuição do etanol foram calculadas corrigindo as emissões totais da cadeia produtiva do diesel, que passa a ser 87,19 gCO₂eq/MJ (B3).

O fator de substituição do diesel por B3 foi assumido igual a 1, ou seja, 1L de biodiesel (B3) = 1L de diesel. Este fator de substituição foi calculado considerando o poder calorífico inferior (PCI) dos combustíveis. De acordo com o Ministério de Minas e Energia, o poder calorífico inferior do biodiesel (B3) é considerado o mesmo do diesel (PATUSCO, comunicação pessoal).

Na Figura 3.6, abaixo, são apresentadas as emissões de GEE em cada etapa da cadeia produtiva do etanol, considerando o uso de B3 em substituição ao diesel.

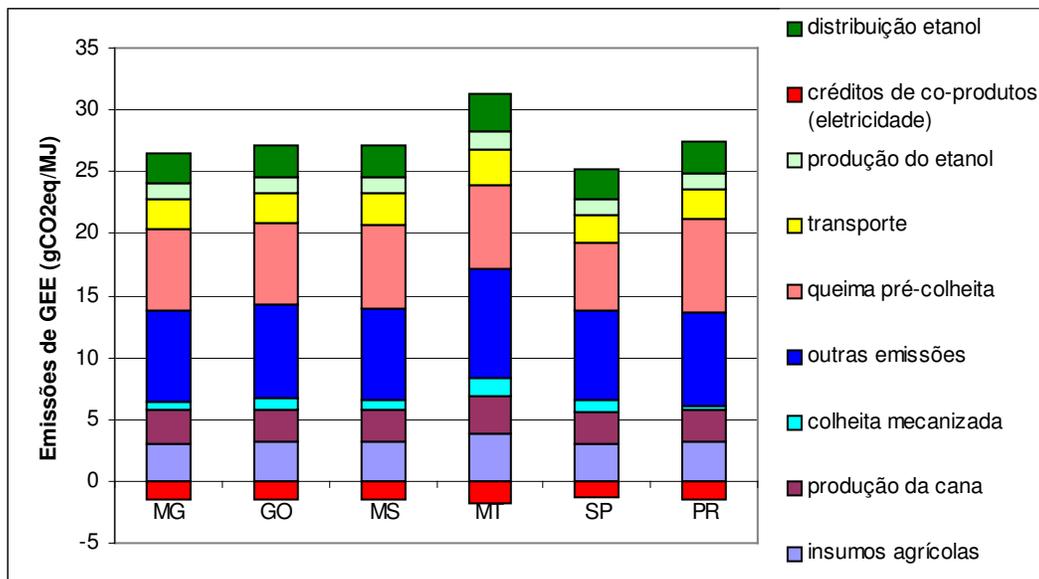


Figura 3.6 Emissões de GEE em cada etapa da cadeia produtiva do etanol produzido e usado no Brasil

As emissões de GEE que não estão relacionadas ao uso de combustíveis fósseis na cadeia produtiva do etanol são apresentadas como outras emissões e emissões da queima pré-colheita da cana de açúcar. “Outras emissões” são as emissões de óxido nitroso associadas à aplicação de fertilizantes nitrogenados e dióxido de carbono devido à aplicação de uréia e cal.

“Outras emissões” somadas às emissões de GEE associadas à prática de queima pré-colheita representam, em média, 54% das emissões de GEE do ciclo de vida do etanol de cana produzido e usado no Brasil. Obviamente, nos estados onde a colheita mecanizada foi maior, as emissões de GEE associadas à queima pré-colheita resultaram menores. “Outras emissões”, assim como as emissões de GEE associadas à energia necessária para a produção dos insumos agrícolas, resultaram maiores onde as produtividades são menores, já que foi considerado que a mesma quantidade de insumos agrícolas foi aplicada em cada estado analisado.

Nota-se que a colheita mecanizada reduz as emissões totais de GEE da cadeia produtiva do etanol mesmo com o aumento do consumo de B3 para esta prática. As emissões de GEE associadas ao uso de B3, considerando que a colheita mecanizada seja feita em toda a área cultivada com cana, é três vezes menor que as emissões de GEE associadas à queima da biomassa em toda a área cultivada com cana.

As emissões de GEE associadas ao uso de biodiesel (B3) representam, em média, 33% das emissões totais de GEE na cadeia produtiva do etanol de cana produzido e consumido no Brasil. O uso do biodiesel (B3) em substituição ao diesel reduziu, em média, apenas 1% das emissões de GEE. As emissões de GEE evitadas pelo uso do etanol em substituição à gasolina em cada estado analisado, são apresentadas na Figura 3.7 abaixo.

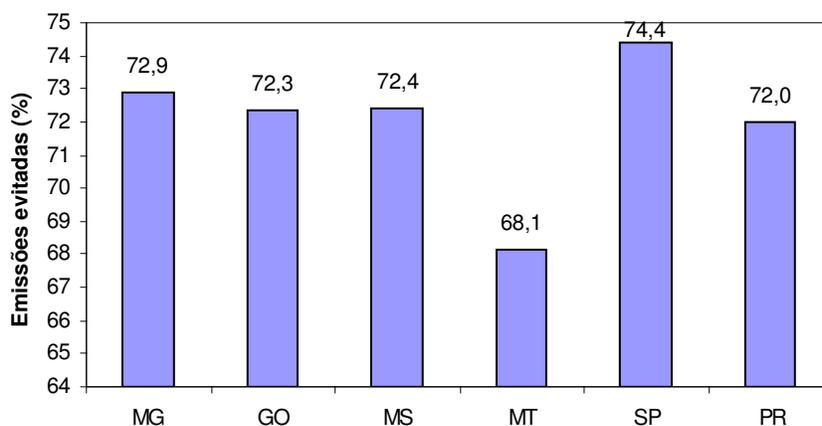


Figura 3.7 Emissões de GEE evitadas pelo uso de etanol no Brasil

No estado de Mato Grosso as emissões evitadas resultaram menores porque a produtividade, da cana e do etanol, neste estado é menor que nos demais estados analisados (com exceção de Paraná que apresenta menor produtividade industrial).

Embora no estado de São Paulo a área cultivada com cana colhida mecanicamente seja quase a mesma de Mato Grosso (32,8%), a produtividade agrícola em São Paulo é a maior entre os estados analisados.

3.4.1 Balanço das emissões de GEE considerando o uso do etanol no exterior

Para calcular as emissões de GEE na etapa de distribuição do etanol para a Europa foram adotadas as mesmas hipóteses consideradas para análise do consumo energético.

O óleo combustível, utilizado nos navios, tem o mesmo fator de emissão que o óleo combustível residual, ou seja, fator de emissão = 21,1 tC/TJ (IPCC, 2006).

Emissões de GEE foram calculadas de acordo com o consumo energético por 1000 litros de etanol transportado e usando o fator de emissão do óleo combustível residual. Os fatores de emissão da etapa de distribuição do etanol são apresentados na Tabela 3.4 a seguir.

As emissões de GEE devido à distribuição na Europa foram avaliadas considerando distâncias equivalentes, as mesmas do transporte e mesmo fator de emissão utilizado por Cheminfo et al. (2008a), no caso de distribuição de etanol de milho e trigo no Canadá.

As emissões de GEE na cadeia produtiva do etanol brasileiro consumido na Europa são apresentadas na Figura 4.5 a seguir.

Tabela 3.4 Fator de emissão para exportação do etanol (gCO₂eq/MJ)

Estado	Distribuição até os portos	Portos	Exportação	Distribuição na Europa	Total
MG	13,16		0,62	1,45	15,23
GO	25,95		0,62	1,45	28,00
MS	19,40	Santos - Rotterdam	0,62	1,45	21,47
MT	19,38		0,62	1,45	21,45
SP	5,66		0,62	1,45	7,73
PR	5,20	Paranaguá - Rotterdam	0,62	1,45	7,25

Nos estados de Goiás, Mato Grosso do Sul e Mato Grosso, as emissões de GEE da distribuição do etanol representam, respectivamente, 49%, 42% e 39% das emissões totais de GEE da cadeia produtiva do etanol de cana brasileiro consumido na Europa. Essas emissões são maiores nestes estados devido à distância percorrida pelo caminhão até o Porto de Santos.

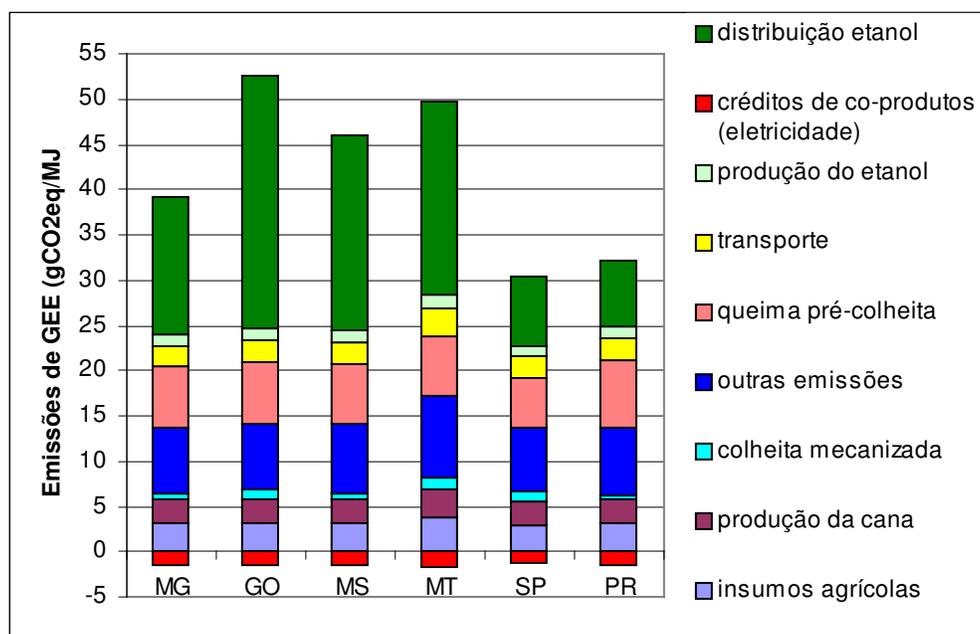


Figura 3.7 Emissões de GEE em cada etapa da cadeia produtiva do etanol brasileiro consumido na Europa

“Outras emissões”, apresentadas na Figura 3.7, indicam as emissões de GEE devido à queima pré-colheita da cana, às emissões de N₂O associadas à aplicação de fertilizantes nitrogenados e às emissões de CO₂ devido à aplicação de cal e uréia para cultivo da cana. Nota-se que essas emissões de GEE são maiores em estados com menor produtividade e maior prática de queima pré-colheita da cana.

Emissões de GEE representadas como “colheita mecanizada” indicam as emissões devido ao consumo de B3 para esta operação.

As emissões de GEE evitadas pelo uso de etanol brasileiro em substituição à gasolina na Europa são apresentadas na Figura 3.8 a seguir.

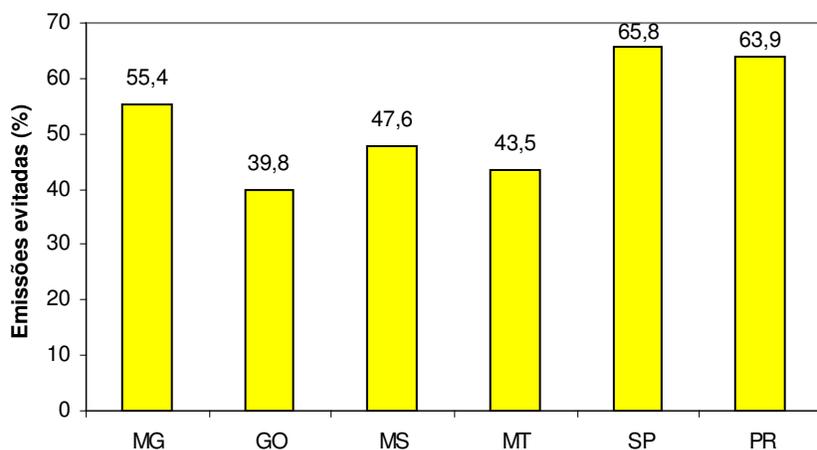


Figura 3.8 Emissões de GEE evitadas pelo uso de etanol brasileiro em substituição à gasolina na Europa

Capítulo 4

Emissões de GEE associadas à expansão da cana-de-açúcar

Conforme apresentado no Capítulo 1 deste trabalho, uma das principais incertezas em análises do ciclo de vida de biocombustíveis é a avaliação das emissões de carbono associadas à mudança do uso do solo (LUC, em Inglês). Quando o aumento da produção da biomassa acontece através do aumento da área cultivada, há mudança do uso do solo²⁰ e as emissões de GEE resultantes (positivas ou negativas) devem ser consideradas no balanço das emissões de GEE da cadeia produtiva, neste caso, do etanol derivado da cana de açúcar produzido em condições brasileiras.

Uma das principais polêmicas em âmbito internacional sobre a sustentabilidade dos biocombustíveis está associada à (potencial) mudança do uso do solo. Neste sentido, o Relatório Cramer, para avaliação da sustentabilidade da produção da biomassa, apresenta três impactos potenciais que devem ser especificamente considerados quando da mudança do uso do solo: emissões de GEE, competição com alimentos e sobre a biodiversidade (CRAMER, 2007).

As emissões de GEE devido aos impactos diretos da mudança do uso do solo (DLUC) dependem de quatro fatores: i) da produtividade agrícola; ii) da ocupação de áreas nas quais a produção de biomassa é uma atividade adicional (i.e., não substitui outras atividades agrícolas);

²⁰ De acordo com o IPCC (2006), as emissões ou absorções antropogênicas de GEE devido à mudança do uso do solo ocorrem em terras gerenciadas, definidas como aquelas onde há intervenções humanas.

iii) da ocupação de áreas nas quais a produção de biomassa substitui atividades agrícolas; e iv) da ocupação de áreas causando desmatamento.

Discutem-se, também, as chamadas emissões de GEE associadas aos impactos indiretos da mudança do uso do solo (ILUC). Impactos indiretos da mudança do uso do solo acontecem quando a expansão de uma cultura (no caso, cana de açúcar) induz o deslocamento de outras atividades agrícolas. O caso mais crítico, do ponto de vista das emissões de GEE, é quando o deslocamento é induzido para áreas nas quais há vegetação nativa, resultando, indiretamente, desmatamento.

As emissões de GEE devido à mudança do uso do solo são referentes às alterações do estoque de carbono, causando emissões de carbono (do solo, da biomassa aérea e subterrânea, e da matéria orgânica morta) e de CH₄, CO, NO_x e N₂O associados à queima da biomassa. Na metodologia indicada pelo IPCC, as emissões de CO₂ devido à queima da biomassa agrícola não precisam ser reportadas porque se estima que serão reabsorvidas pela vegetação durante o crescimento da próxima safra (IPCC, 2006).

Este capítulo é destinado a avaliar a forma como ocorreu a expansão do cultivo da cana de açúcar no Brasil, na safra de 2007/2008, para produção de etanol combustível. Especificamente, no caso do estado de São Paulo, a avaliação visa analisar a ocorrência da mudança do uso do solo, as variações de estoque de carbono e o impacto das emissões de GEE no balanço das emissões da cadeia produtiva do etanol de cana.

4.1 Mudança direta do uso do solo

Alguns estudos publicados (e.g., WALTER et al.; 2008b; NASSAR et al.; 2008 e CONAB; 2008) associam o aumento da área cultivada com cana de açúcar e mudança do uso do solo. Os resultados indicam que a região Centro-Sul do país continua sendo, de longe, a maior produtora de cana de açúcar e é também onde ocorre a maior expansão das áreas de cultivo. Nos últimos anos, uma expansão menos expressiva ocorreu na região Nordeste.

De acordo com Nassar et al. (2008), a área cultivada com cana de açúcar, em 2008, foi de 8,7 milhões de hectares, sendo 85% na região Centro-Sul e 14,7% na região Nordeste. O aumento da produção de cana de açúcar tem ocorrido nessas duas regiões nos últimos quatro anos (majoritariamente na primeira região, como já mencionado).

Na região Centro-Sul, desde muitos anos São Paulo é o maior produtor de cana de açúcar, seguido pelos estados do Paraná, Minas Gerais e Goiás (WALTER et al; 2008b e NASSAR et al; 2008). A expansão da área de cultivo também tem ocorrido nesses estados, com importância decrescente na ordem em que os estados foram mencionados. Já na região Nordeste, os estados do Maranhão e Piauí são os que têm a maior expansão de cana de açúcar (CONAB; 2008). Na Figura 4.1, abaixo, é mostrada a expansão da cana de açúcar na safra de 2007/2008, nos estados da região Centro-Sul. A base de dados utilizada (CONAB, 2008), permite a caracterização de quais foram as culturas substituídas pela cana de açúcar.

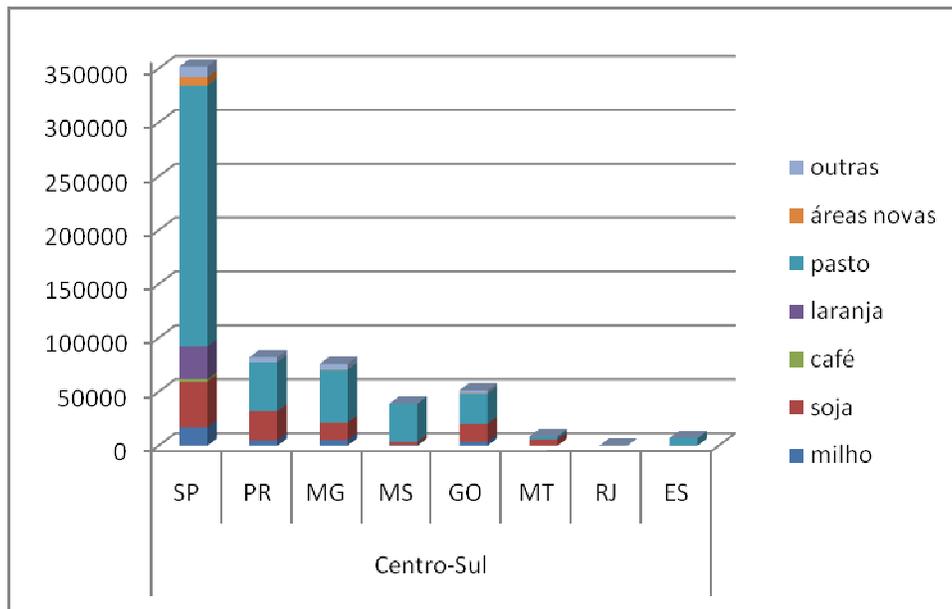


Figura 4.1 Expansão da cana de açúcar na região Centro-Sul brasileira (ha)

Fonte: CONAB (2008)

A expansão da cana de açúcar ocorreu majoritariamente em áreas antes ocupadas por pastagens, seguida pela ocupação de áreas agrícolas e, com uma pequena parcela, em novas áreas, coberta com vegetação nativa (IBGE *apud* NASSAR et al.; 2008 e CONAB; 2008). No

entanto, cabe citar que imagens de satélites, utilizadas no estudo de Nassar et al. (2008), para analisar as áreas substituídas por cana, indicam que a expansão (nos anos de 2007 e 2008) foi maior em áreas agrícolas do que em áreas de pastagem. Nassar et al. (2008) comentam que os métodos empregados pelos autores na quantificação das áreas deslocadas (imagens de satélites, procedimentos estatísticos e informações de licenciamento ambiental) possuem vantagens e desvantagens; embora haja divergência entre os resultados em função do procedimento adotado, é evidente que a tendência tem sido a expansão da cana em áreas de pastagem. A conclusão é respaldada pelo fato de que essas terras são mais baratas do que as terras ocupadas com outras culturas e o investimento inicial significativamente menor do que o de limpeza e preparo de áreas ocupadas com vegetação nativa.

O relatório da CONAB (2008) divulga, em hectares, as culturas substituídas por cana de açúcar na safra de 2007/2008 e, por esta razão, seus dados são utilizados neste trabalho para quantificar as emissões de GEE.

Com relação à competição com a produção de alimentos, Nassar et al. (2008) e Walter et al. (2008b) assumem que não há razão para se acreditar que a recente expansão da cana de açúcar impactou negativamente a produção de alimentos, já que não houve redução da produção das culturas agrícolas cujas áreas foram deslocadas. Quanto à pecuária, constata-se que nos últimos anos houve aumento do número de cabeças de gado por hectare, diminuindo a necessidade de áreas (WALTER et al., 2008b).

Por outro lado, novas áreas (áreas antes não utilizadas para fins agropecuários), embora sejam essas uma pequena fração do total, têm sido afetadas pelo aumento da produção da cana de açúcar (CONAB; 2008), afetando, conseqüentemente, a biodiversidade local.

4.2 Mudança indireta do uso do solo

Há muitas incertezas relativas aos impactos indiretos da mudança do uso do solo. As incertezas dizem respeito aos dados, definições e metodologias (NASSAR et al.; 2008).

Em âmbito internacional há especulação de que a expansão da cana, mesmo em São Paulo, pode induzir deslocamento de atividades agrícolas para a região Amazônica e o Cerrado, causando desmatamento. Nassar et al. (2008) afirmam que a expansão das áreas de pastagem e com cultivo de grãos (sobretudo soja) na região Amazônica tem sido maior do que a expansão da cana de açúcar na região Centro-Sul. Também é importante observar que o desmatamento nas duas regiões é anterior ao crescimento do cultivo da cana, para a produção de etanol.

As emissões de GEE associadas aos impactos indiretos da mudança do uso do solo não são abordadas neste trabalho.

4.3 Metodologia adotada para estimar emissões de GEE devido à mudança do uso do solo

De acordo com o IPCC (2006), as emissões de GEE relacionadas às mudanças do uso do solo ocorrem de cinco maneiras: i) através da mudança do conteúdo de carbono na biomassa área²¹, consideradas as vegetações que antes existiam e que depois passaram a existir; ii) através do estoque de carbono no solo; iii) através da mudança do estoque de carbono na biomassa subterrânea²²; iv) através de emissões não-CO₂, resultantes da queima da biomassa; e v) através de emissões da decomposição da matéria orgânica morta²³, composta por vegetação e húmus.

4.3.1 Metodologia para quantificação das emissões de GEE associadas à DLUC

Neste trabalho, as emissões de GEE referentes à mudança do uso do solo são calculadas seguindo a metodologia do IPCC (2006) para inventários de emissões, que indica três maneiras

²¹ Biomassa aérea é definida pelo IPCC (2006) como toda biomassa contida na vegetação, acima do solo, ou seja, tocos, galhos, cascas, sementes e folhas.

²² Biomassa subterrânea é toda biomassa contida na raiz da vegetação.

²³ Matéria orgânica morta é a biomassa sobre o solo e que pode se decompor rapidamente, com emissões para a atmosfera, ou pode tardar meses, anos ou até mesmo décadas para se decompor. A intervenção humana, através da mudança do uso do solo, afeta o estoque de carbono da matéria orgânica morta porque afeta a taxa de decomposição (IPCC, 2006).

distintas de cálculo das emissões devido ao LUC. Os procedimentos estão associados à qualidade dos dados e à precisão dos resultados:

- *Tier 1*: as emissões de carbono podem ser calculadas a partir de informações genéricas, obtendo-se resultados menos precisos;

- *Tier 2*: o procedimento corresponde ao emprego de fatores de emissão/absorção de GEE que indicam condições específicas do país; e

- *Tier 3*: o procedimento corresponde ao emprego de fatores de emissão/absorção de GEE que indicam condições específicas de uma região.

Evidentemente, quanto maior o nível de *Tier* adotado, menores serão as incertezas, mas maior a necessidade de dados.

As metodologias apresentadas pelo IPCC (2006) podem ser usadas na estimativa das emissões de GEE referente a diferentes formas como a mudança do uso do solo ocorre, ou seja, desmatamento, áreas agrícolas substituindo áreas agrícolas, áreas agrícolas substituindo áreas de pastagem, áreas de pastagem substituindo florestas, entre outras.

Na metodologia mais genérica (*Tier 1*) assume-se que tanto as emissões da matéria orgânica morta quanto da biomassa subterrânea são iguais a zero, já que o estoque de carbono varia muito e são específicos de cada região. Assim, somente os casos que correspondem aos itens i), ii) e iv), citados anteriormente, podem ser analisados com o emprego dessa metodologia. Uma combinação de metodologias (*Tiers*) pode ser empregada na estimativa das emissões.

Além da metodologia genérica, que pode ser aplicada quando houver mudança do estoque de carbono em qualquer substrato (biomassa aérea, subterrânea, carbono no solo), o IPCC (2006) apresenta diretrizes distintas para a mudança do uso do solo em cada tipo de vegetação. Para emissões não CO₂ resultantes da queima, uma equação específica deve ser utilizada.

De acordo com a metodologia genérica, as emissões decorrentes da mudança do uso do solo são a somatória da variação do estoque de carbono em cada categoria de uso do solo analisada, conforme equação 4.1 a seguir:

$$\Delta C_{AFOLU} = \Delta C_{TF} + \Delta C_{TA} + \Delta C_{TG} + \Delta C_{TAI} + \Delta C_{TS} + \Delta C_{OT} \text{ (tC/ha)} \quad (4.1)$$

Sendo: ΔC a variação do estoque de carbono; AFOLU o uso de terra agrícola, florestal e outras (sigla em inglês); TF são terras florestais; TA, terras agrícolas; TG, terras com grama; TAI, terras alagadas; TS assentamentos; e OT são outras terras.

A variação do estoque de carbono em cada uma dessas categorias é a soma da variação do estoque de carbono em cada substrato, conforme equação 4.2, a seguir:

$$\Delta C = \Delta C_{BA} + \Delta C_{BS} + \Delta C_{MM} + \Delta C_{LI} + \Delta C_{SO} + \Delta C_{PMC} \text{ (tC/ha)} \quad (4.2)$$

Sendo: ΔC a mudança do estoque de carbono em cada categoria; ΔC_{BA} , variação do estoque de carbono na biomassa aérea; ΔC_{BS} , variação do estoque de carbono na biomassa subterrânea; ΔC_{MM} , variação do estoque de carbono na matéria morta; ΔC_{LI} , variação do estoque de carbono em húmus; ΔC_{SO} , variação do estoque de carbono no solo; e ΔC_{PMC} , variação do estoque de carbono de produtos da madeira colhida.

Seguindo a metodologia do IPCC (2006), a mudança do estoque de carbono na biomassa aérea somente é estimada para culturas não anuais, que podem acumular quantidade significativa de carbono ao longo de sua vida, diferente das anuais, que, por serem renovadas a cada ano, não acumulam carbono em longo prazo.

Conforme apresentado anteriormente, o cálculo da mudança do estoque de carbono em cada substrato pode ser feito de uma única maneira, seguindo a metodologia genérica, ou com base de dados específica para cada categoria de mudança do uso do solo. A metodologia genérica apresenta duas maneiras para realização do cálculo: i) baseada no processo, que estima o balanço

de adição e remoção de estoque de carbono; e ii) baseada em estoque, que estima a diferença em estoque de carbono em dois pontos do tempo.

O cálculo baseado em processo é conhecido como Método de Ganho e Perda (ver equação 4.3) e foi a adotada neste trabalho para o cálculo da variação do estoque de carbono.

$$\Delta C = \Delta C_G - \Delta C_P \text{ (tC/ha)} \quad (4.3)$$

Sendo: G ganho anual de carbono (ou seja, o estoque de carbono na biomassa introduzida na área) e P, a perda anual de carbono (ou o estoque de carbono na biomassa substituída). Assim, uma variação positiva do estoque de carbono representa aumento do estoque de carbono no solo, e uma variação negativa representa perda de carbono no solo (conseqüentemente, emissões de C para a atmosfera).

Quando utilizado este método, a mudança do estoque de carbono resultante da equação acima deve ser dividida por 20 – tempo padrão, em anos, que o IPCC (2006) assume como sendo o tempo em que o solo permanecerá com o cultivo depois que ocorreu a mudança do uso do solo.

4.4 Emissões de GEE resultantes da expansão da cana de açúcar no Brasil

Neste trabalho, as emissões resultantes da matéria orgânica morta e biomassa subterrânea são assumidas iguais a zero, seguindo a metodologia *Tier 1*, mas as emissões referentes à mudança de estoque de carbono no solo e na biomassa aérea foram calculadas seguindo a *Tier 2*, pois foram adotados dados específicos para as condições brasileiras e para as biomassas analisadas.

Emissões não-CO₂ da queima da cana foram apresentadas no capítulo anterior e a queima da biomassa substituída por cana não foram analisadas neste trabalho.

Na Tabela 4.1, abaixo, são apresentados os dados de estoque de carbono no solo (camada de 0-40 cm de solo) e na biomassa aérea, utilizados para estimar as emissões de GEE causadas pela expansão da cana de açúcar.

Tabela 4.1 Estoque de carbono no solo e na biomassa de acordo com a classe de solo e profundidade do solo (tC/ha)

Tipo de uso do solo	Estoque de C (0-20cm)	Estoque de C (0-40cm)	Classe de solo
Milho com PD	40 ^(a)	-	Latossolo
Milho com PC	-	77 ^(b)	Latossolo
Milho com PD e rotação com soja	-	84 ^(b)	Latossolo
Soja com PD	53 ^(c)	-	Latossolo
Soja com PC	-	77 ^(b)	Latossolo
Soja com PD e rotação com milho	-	84 ^(b)	Latossolo
Café (C no solo + C biomassa) melhor	-	59,98 + 32,25 ^(e)	Latossolo/ Argissolo
Café (C no solo + C biomassa) pior	-	57,79 ^(d) + 32,25 ^(e)	Latossolo/ Argissolo
Laranja (C no solo + C biomassa) melhor	-	59,98 ^(d) + 37,06 ^(e)	Latossolo/ Argissolo
Laranja (C no solo + C biomassa) pior	-	57,79 ^(d) + 37,06 ^(e)	Latossolo/ Argissolo
Pasto Natural	56 ^(f)	-	Latossolo
Pasto Degradado	41 ^(a)	-	Latossolo
Pasto com fertilização	-	88 ^(b)	Latossolo
Pasto sem fertilização	-	73 ^(b)	Latossolo
Cerradão (C no solo + C biomassa)	53 ^(g) + 33,5 ^(h)	100 ⁽ⁱ⁾ + 152,93 ⁽ⁱ⁾	Latossolo
Cerradão (C no solo + C biomassa)	-	70,9 ⁽ⁱ⁾ + 28,67 ^(j)	Quartzarênio
Campo Limpo (C no solo + C biomassa)	72 ^(g) + 8,4 ^(l)	36,2 ⁽ⁱ⁾ + 33,75 ^(j)	Latossolo
Campo Limpo (C no solo + C biomassa)	-	24,6 ⁽ⁱ⁾ + 15,39 ^(j)	Quartzarênio
Cerrado Comum (C no solo + C biomassa)	46 ^(g) + 25,5 ^(l)	-	Latossolo
Cana (com queima)	36 ^(m)	86 ⁽ⁿ⁾	Latossolo
Cana (com queima)	-	36,9 ⁽ⁿ⁾	Quartzarênio
Cana (mecanizada)	51 ^(m)	99,5 ⁽ⁿ⁾	Latossolo
Cana (mecanizada)	-	41,7 ⁽ⁿ⁾	Quartzarênio

Fontes: (a) *d'Andréa et al. (2004)*; (b) *Jantália et al. (2006)*; (c) *Campos (2006)*; (d) *Auler et al. (2008)* e *Fidalski et al. (2007)*; (e) *Ronquin (2007)*; (f) *Jantália et al. (2005) apud Amaral et al. (2008)*; (g) *Lardy et al. (2002)*; (h) *Estimativa VTB apud Amaral et al. (2008)*; (i) *Goedert (1997) apud Walter et al. (2009)*; (j) *MCT et al. (2004)*; (l) *Ottmar et al. (2001)*; (m) *Amaral et al. (2008) apud Macedo e Seabra (2008)*; (n) *De Luca et al. (2008)*.

É possível observar que o estoque de carbono varia de acordo com a prática agrícola adotada e com a classe de solo em que a biomassa é cultivada. Os estoques de carbono são maiores quando há melhor manejo (isto é, fertilização, rotação de culturas, plantio direto e manejo de diferentes biomassas nas entrelinhas). Para as classes de solos, nota-se que o solo argiloso tem maior quantidade de carbono e o contrário acontece em solo arenoso²⁴.

Conforme citado anteriormente, para cultivos anuais a variação do estoque de carbono na biomassa aérea é considerada nula e, por esta razão, não foram coletados dados de estoque de carbono na biomassa aérea das culturas consideradas.

De acordo com a Conab (2008), a expansão da cana de açúcar não ocorreu na região amazônica. Estoques de carbono referentes à vegetação típica de cerrado foram utilizados para calcular a mudança de estoque de carbono em áreas novas convertidas para cultivo da cana de açúcar.

Na publicação Conab (2008) não há distinção entre as áreas de pastagem degradadas, com manejo, e pasto natural.

O mesmo estoque de carbono no solo cultivado com laranja (0-40cm) foi considerado para o solo cultivado com café (0-40cm), já que as referências revisadas não têm essa informação. Na Tabela 1, o cultivo de laranja mais adequado é para cultivo em faixas com manejo de grama (Humidícula) e solo enterrado nas entrelinhas, e o indicado como pior é para cultivo convencional da laranja, com manejo de baixa cobertura do solo através da aplicação de herbicida pós emergente e solo rodado nas entrelinhas.

Quanto aos diferentes tipos de manejo das culturas – plantio direto (PD) ou convencional (PC) – Jantália et al. (2006) expõe que quando é usado o arado de disco (manejo convencional) “*observa-se um grande impacto na estrutura física do solo e diminuição do teor de matéria orgânica*” e que, para que isto seja evitado, os agricultores vêm adotando a prática de plantio

²⁴ De acordo com De Luca et al. (2002), Latossolo é uma classe de solo argiloso e Quartzarênio e Argissolo pertencem à classe de solo arenoso.

direto (PD). Isto pode explicar o maior estoque de carbono no solo quando o cultivo de milho e soja é feito com o plantio direto (ver Tabela 4.1).

Neste trabalho, para o estoque de carbono na biomassa aérea dos diferentes tipos de Cerrado foi considerada a hipótese de que o maior estoque de carbono ocorre quando a biomassa cresce em solo Latossolo e menor estoque de carbono ocorre quando a biomassa cresce em solo Quartzarênio (ver coluna de estoque de carbono 0-40cm na Tabela 4.1).

O maior estoque de carbono em solo cultivado com cana de açúcar, sem a prática de queima pré colheita, comparado ao solo com cana queimada para colheita, é devido à palha deixada no campo que, além de proteger o solo, contribui para o aumento do estoque de carbono quando é incorporada ao solo através do processo de decomposição (De Luca et al., 2008).

Devido à dificuldade encontrada em se obter informações das classes de solo onde houve a expansão da cana de açúcar, bem como do estoque de carbono para cada biomassa deslocada em cada classe de solo, neste trabalho optou-se pela realização de três análises, que têm diferentes hipóteses. As análises são apresentadas nos próximos itens.

4.4.1 Análise das emissões de GEE associadas à substituição de diferentes biomassas por cana de açúcar

Nesta análise foi considerada a expansão da cana em solo Latossolo e Argissolo. Quatro hipóteses foram consideradas:

- Expansão da cana de açúcar em áreas com menor estoque de carbono, ou seja, substituindo pastagem sem fertilização, plantio convencional de soja e milho, cultivo de café e laranja que tinham plantio convencional e uso de herbicidas nas entrelinhas, e Cerrado do tipo Campo Limpo. Considerou-se, em uma primeira análise, a cana com a prática de colheita mecanizada em 32,8% da área de expansão e, para comparação, fez-se uma análise considerando que plantio de cana com colheita 100% mecanizada passou a ocupar essas áreas.

- Expansão da cana em áreas com maior estoque de carbono – substituindo pastagem com fertilização, plantio direto de soja e milho, cultivo de café e laranja com plantio direto e melhor manejo nas entrelinhas, e Cerrado do tipo Cerradão. Da mesma forma, considerou-se tanto o manejo da cana com 32,8% de colheita mecanizada quanto o manejo da cana 100% mecanizada.

Consideradas essas hipóteses, as emissões de GEE associadas à mudança direta do estoque de carbono são a soma ponderada das emissões de carbono em cada categoria de mudança do uso do solo, considerados os dados de expansão divulgados pela Conab (2008). Na Figura 4.1, abaixo, são apresentadas as emissões de GEE devido à expansão da cana em áreas com diferentes biomassas e formas de manejo. Os dados de biomassas substituídas pela expansão da cana no estado de São Paulo são apresentados no Anexo III deste trabalho.

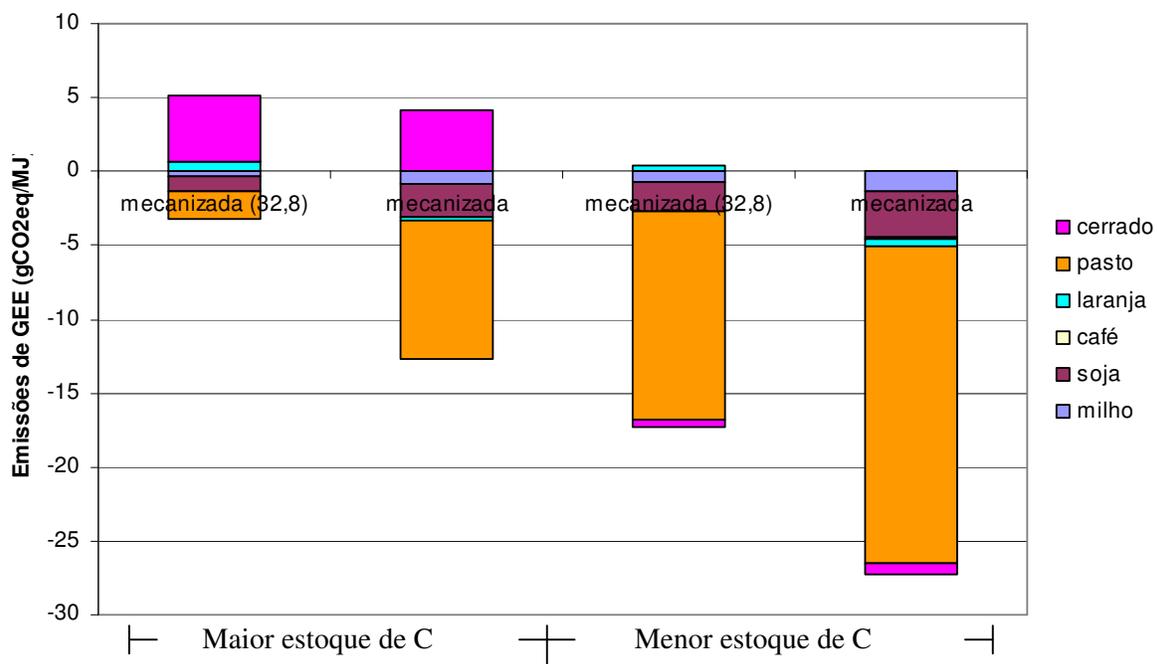


Figura 4.1 Emissões de GEE devido à expansão da cana em áreas com diferentes biomassas

Embora a expansão da cana em áreas novas (neste trabalho, consideradas áreas com Cerrado) seja uma parcela pequena (2,23%) do total, as emissões de GEE representadas por essa expansão são significativas, podendo prejudicar o balanço das emissões de GEE do etanol. Essa é

a situação quando se considera que a colheita da cana é feita com a queima pré colheita em 67,2% da área expandida.

Quando se considera a prática de colheita mecanizada da cana em toda a área expandida, as emissões de GEE favorecem o balanço das emissões de GEE da cadeia produtiva do etanol. Isto acontece porque as emissões representadas pela expansão em Cerradão são compensadas pelas emissões negativas (ou seja, absorção de carbono no solo) representadas pela expansão da cana nas demais áreas (milho, soja, café, laranja e pasto).

Considerando que as novas áreas nas quais houve a expansão da cana sejam de Cerrado do tipo Campo Limpo (que possui menor estoque de carbono no solo e na biomassa aérea), as emissões de GEE representadas por essa mudança do uso do solo são negativas, favorecendo ainda mais o balanço das emissões de GEE no ciclo de vida do etanol de cana, mesmo quando se considera que a prática de colheita da cana é realizada com a queima pré colheita em 67,2% dessas áreas.

Nota-se, também, que a expansão da cana de açúcar com pouca colheita mecânica (32,8%), substituindo o cultivo de laranja (com melhor ou pior manejo) e café (com melhor manejo), implica redução do estoque de carbono no solo. No cenário imaginado, essas emissões de GEE foram compensadas pelas emissões evitadas devido ao aumento do estoque de carbono nas demais áreas (exceto Cerradão). Quando o cultivo de laranja é substituído por cana colhida mecanicamente, o estoque de carbono na área passa a ser maior do que antes.

As áreas de pastagem sem fertilização possuem menor estoque de carbono no solo do que as áreas cultivadas com cana. Esse fato, somado à maior expansão da cana (em 2007/2008) nestas áreas (68,8% do total), justifica as emissões negativas de GEE devido à expansão da cana (32,8% colhida mecanicamente) em áreas com menor estoque de carbono.

Áreas ocupadas com soja representam 12% do total das áreas onde houve expansão da cana, o que justifica a parcela das emissões de GEE evitadas pela expansão da cana nessas áreas.

Na Tabela 4.2 são apresentados os fatores de emissão de GEE calculados, considerados os cenários de expansão do cultivo da cana no estado de São Paulo anteriormente apresentados.

Tabela 4.2 Fator de emissão de GEE da expansão da cana de açúcar – média ponderada

Manejos substituídos	Colheita da cana-de-açúcar	Emissões de GEE (gCO ₂ eq/MJ)
Maior estoque de C	32,8% mecanizada	1,86
	100% mecanizada	-8,53
Menor estoque de C	32,8% mecanizada	-16,90
	100% mecanizada	-27,29

A expansão da cana de açúcar em áreas referidas pela Conab (2008) como ocupadas anteriormente por “outras” culturas não foi considerada na estimativa das emissões de GEE, por duas razões: i) essas áreas representavam uma porcentagem pequena comparada às demais áreas convertidas; ii) não há informações claras de quais culturas foram substituídas e em que proporção.

Para a verificação do impacto das emissões de GEE devido à expansão da cana (em 2007/2008) no balanço das emissões de GEE do etanol, foram considerados somente os fatores de emissão associados à expansão da cana com cultivo parcialmente mecanizado (32,8% mecanizada), pois o balanço das emissões de GEE do ciclo de vida do etanol produzido no estado de São Paulo foi calculado considerando esse percentual. Na Figura 4.2, a seguir, é apresentada a representatividade das emissões de GEE associadas à expansão da cana de açúcar, no balanço das emissões de GEE do etanol produzido no estado de São Paulo, em áreas com maior e com menor estoque de carbono. O balanço das emissões de GEE do etanol, produzido no estado de São Paulo, pode ser 25,7 gCO₂eq/MJ quando as emissões da mudança direta do uso do solo associadas à expansão da cana em áreas com maior estoque de carbono são consideradas, ou 6,9 gCO₂eq/MJ quando se considera que a expansão da cana ocorreu em áreas com menor estoque de carbono. Conforme apresentado anteriormente, se as emissões de GEE devido à expansão da cana não são consideradas, o balanço das emissões de GEE do etanol produzido em São Paulo é de 23,81 gCO₂eq/MJ.

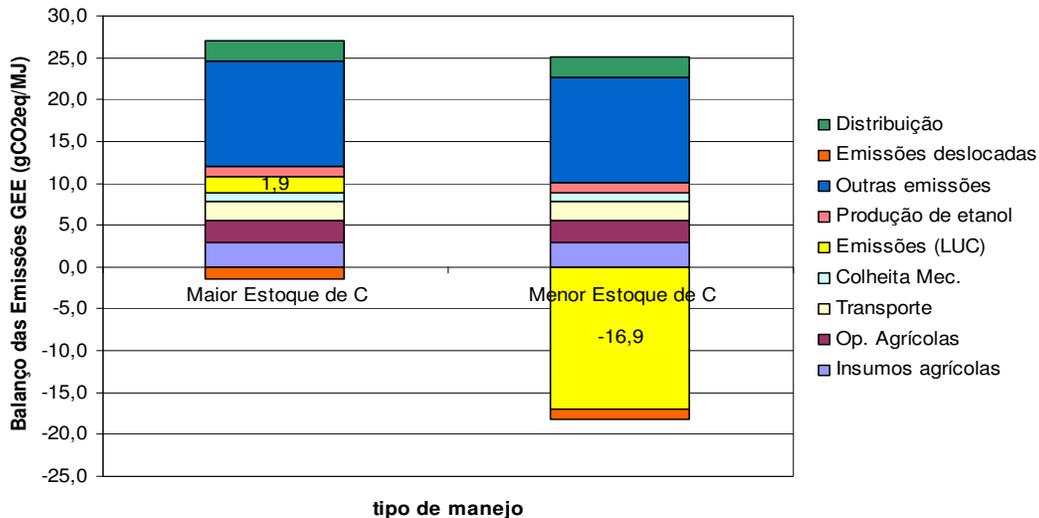


Figura 4.2 Participação das emissões de GEE associadas à expansão da cana no balanço das emissões de GEE do etanol produzido no estado de São Paulo

Conforme apresentado na Figura 4.3 abaixo, as emissões de GEE evitadas pelo uso do etanol de cana produzido no estado de São Paulo, são maiores se a cana expande em áreas com menor estoque de carbono (92,7%). O contrário acontece caso a cana tenha expandido em áreas com maior estoque de carbono, mas não a ponto de prejudicar drasticamente os resultados de emissões evitadas de GEE (73,0%). Conforme apresentado no capítulo anterior, se as emissões de mudança direta do uso do solo não são consideradas, 74,4% das emissões de GEE são evitadas pelo uso de etanol produzido no estado de São Paulo em substituição à gasolina.

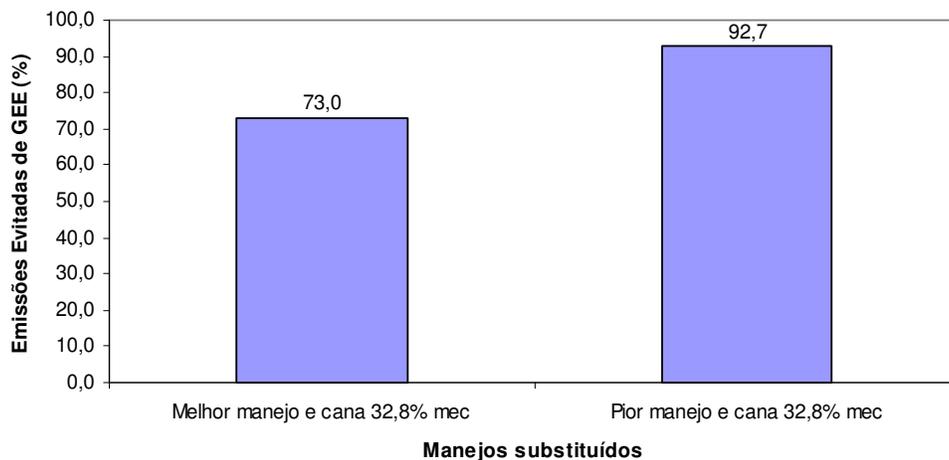


Figura 4.3 Emissões de GEE evitadas considerando a substituição de diferentes biomassas e diferentes manejos

4.4.2 Análise das emissões de GEE associadas à expansão em áreas de pastagem

Considerando que a expansão da cana ocorra somente em áreas ocupadas com pasto em Latossolo, as emissões de GEE associadas à mudança direta do estoque de carbono foram calculadas utilizando quatro hipóteses:

- Expansão da cana de açúcar com queima pré-colheita (32,8% da cana colhida manualmente) em áreas ocupadas com pasto sem fertilização (situação 1);
- Expansão da cana com 100% de colheita mecanizada em áreas ocupadas com pasto sem fertilização (situação 2);
- Expansão da cana com queima pré-colheita (32,8% da cana colhida manualmente) em áreas ocupadas com pasto fertilizado (situação 3);
- Expansão da cana com 100% de colheita mecanizada em áreas ocupadas com pasto fertilizado (situação 4).

Na Tabela 4.3 abaixo estão os fatores de emissão de GEE associados à expansão da cana de acordo com as hipóteses apresentadas.

Tabela 4.3 Fatores de emissão de GEE associados à expansão da cana em áreas de pasto e solo Latossolo

Hipóteses	Emissões de GEE (gCO ₂ eq/MJ)
Situação 1	-20,53
Situação 2	-31,21
Situação 3	-2,86
Situação 4	-13,54

A expansão da cana de açúcar, com a prática de colheita mecanizada em 32,8% ou toda a área antes ocupada com pasto (com ou sem fertilização) resulta em emissões negativas de gases de efeito estufa – considerando a produtividade da cana e do etanol no estado de São Paulo. Obviamente, as maiores emissões evitadas acontecem se cana com colheita 100% mecanizada substituir pasto sem fertilização e as menores emissões evitadas acontecem se a cana com 32,8% de colheita mecanizada substituir áreas de pasto fertilizado.

A Figura 4.4, a seguir, apresenta a participação das emissões de GEE associadas à expansão da cana (32,8% mecanizada) em áreas de pasto fertilizado e de pasto sem fertilização no balanço das emissões de GEE do ciclo de vida do etanol produzido no estado de São Paulo.

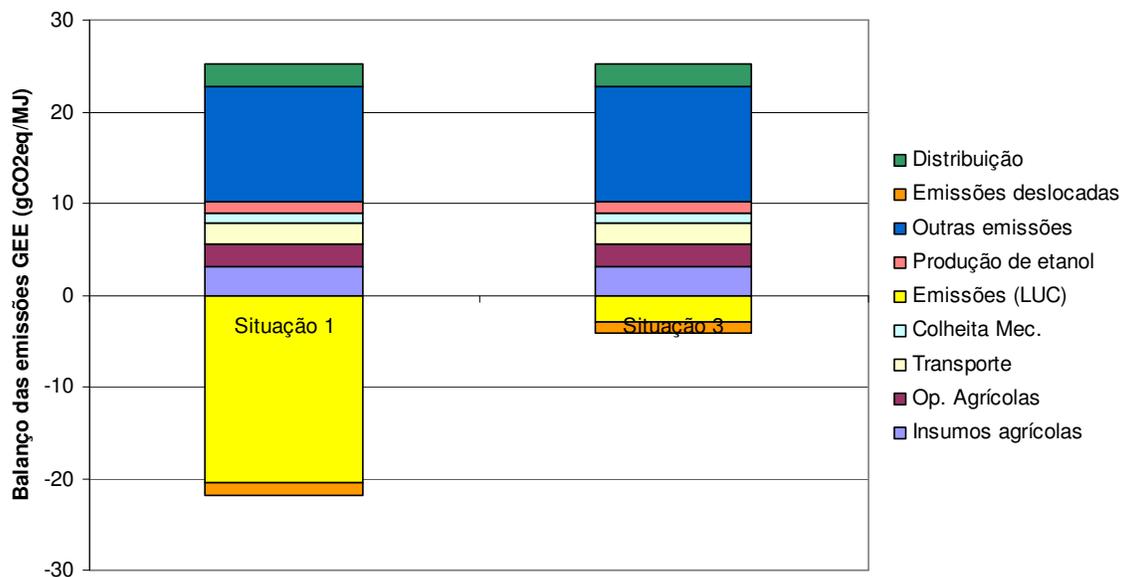


Figura 4.4 Participação das emissões de GEE da expansão da cana em áreas de pasto no balanço de emissões de GEE

As emissões negativas de GEE associadas à expansão da cana (32,8% mecanizada) crescendo em áreas de pasto não fertilizado (em solo Latossolo) quase anulam as emissões de GEE na etapa agrícola da cadeia produtiva do etanol produzido no estado de São Paulo, ou seja, as emissões de GEE na etapa agrícola do etanol passariam de 21,5 gCO₂eq/MJ (sem emissões associadas à expansão) para 0,99 gCO₂eq/MJ.

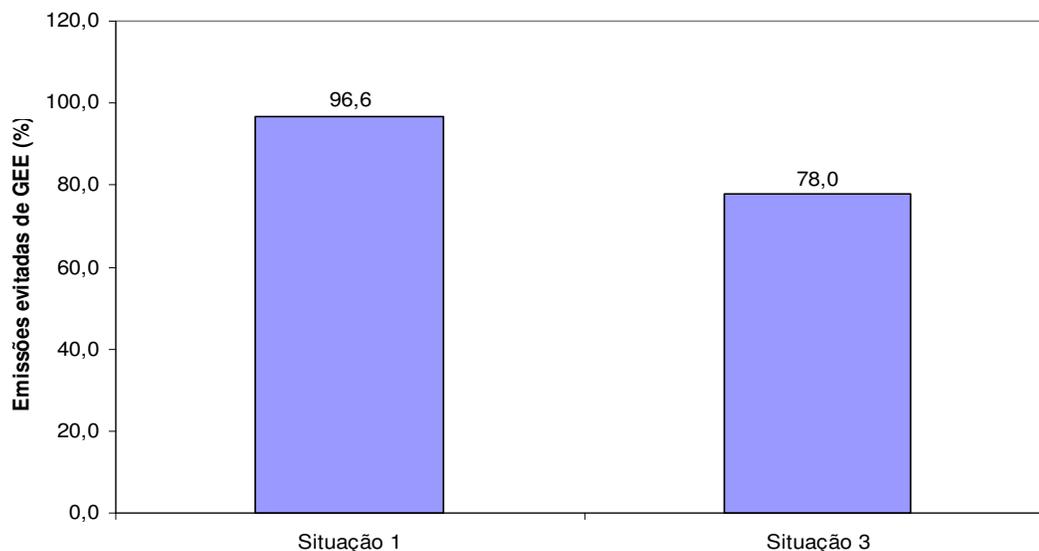


Figura 4.5 Emissões de GEE evitadas considerando expansão em áreas de pastagem

Em uma situação parecida, mas com a expansão em áreas de pasto fertilizado, as emissões de GEE na etapa agrícola reduziriam de 21,5 para 18,6 gCO₂eq/MJ. As emissões totais da cadeia produtiva do etanol produzido no estado de São Paulo reduziriam de 23,8 gCO₂eq/MJ para 3,3 gCO₂eq/MJ (situação 1) ou 20,9 gCO₂eq/MJ (situação 3). As emissões de GEE evitadas, quando estes dois casos são considerados, são apresentados na Figura 4.5 acima.

4.4.3 Análise das emissões de GEE associadas à expansão em áreas de Cerrado

Neste caso, foi considerada a expansão da cana de açúcar em áreas de Cerrado tanto em solo Latossolo quanto em solo Quartzarênio. Oito hipóteses foram consideradas, quatro para expansão em Latossolo e quatro para expansão em Quartzarênio.

- Expansão da cana, com colheita manual (manejo com queima pré-colheita em 32,8% da área) em áreas de Cerrado do tipo Campo Limpo – Latossolo (situação 1) e Quartzarênio (situação 2);
- Expansão da cana, com prática de colheita totalmente mecanizada em áreas de Cerrado do tipo Campo Limpo – Latossolo (situação 3) e Quartzarênio (situação 4);

- Expansão da cana, com colheita manual (32,8% mecanizada) em áreas de Cerrado do tipo Cerradão – Latossolo (situação 5) e Quartzarênio (situação 6);

- Expansão da cana, com prática de colheita totalmente mecanizada em áreas de Cerrado do tipo Cerradão – Latossolo (situação 7) e Quartzarênio (Situação 8).

A Tabela 4.4 apresenta os fatores de emissões de GEE referentes a cada uma dessas hipóteses.

Tabela 4.4 Fatores de emissões de GEE associados substituição de Cerrado por cana

Hipóteses	Emissões de GEE (gCO ₂ eq/MJ)
Situação 1	-24,12
Situação 2	1,78
Situação 3	-34,80
Situação 4	-2,01
Situação 5	192,21
Situação 6	71,95
Situação 7	181,53
Situação 8	68,16

É possível observar que se a cana de açúcar cresce em área de Cerrado do tipo Campo Limpo e solo Latossolo, as emissões de GEE são significativamente negativas. O contrário acontece se a cana cresce em solo Latossolo substituindo Cerradão.

O estoque de carbono em solo Quartzarênio cultivado com cana (com ou sem queima) é aproximadamente duas vezes menor do que o estoque de carbono em solo Latossolo cultivado com cana (com ou sem queima). A diferença entre o estoque de carbono nesses dois tipos de solo com Cerrado (Campo Limpo ou Cerradão) é menor, mas significativa. A Figura 4.6 a seguir mostra a participação das emissões de GEE associadas à expansão no balanço das emissões de GEE da cadeia produtiva do etanol no estado de São Paulo.

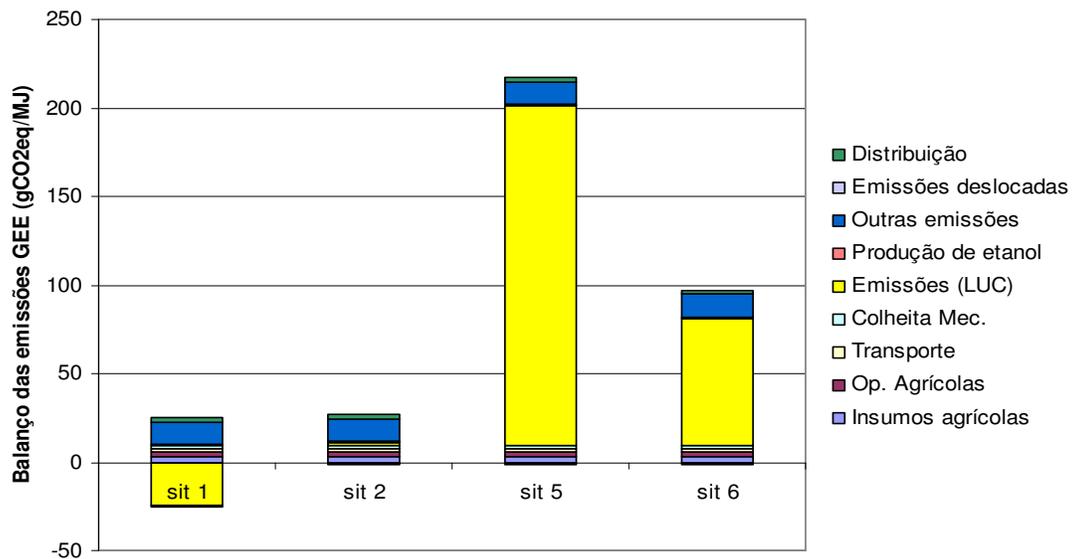


Figura 4.6 Participação das emissões de GEE da expansão da cana em áreas de Cerrado no balanço de emissões de GEE

Considerando que a cana de açúcar (32,8% mecanizada) cresça em área de Cerrado do tipo Campo Limpo em solo Latossolo, as emissões de GEE seriam negativas, ou seja, a área passaria a armazenar maior quantidade de carbono no solo. Nesse caso, as emissões de GEE devido à expansão da cana neutralizariam todas as emissões de GEE da etapa agrícola, da etapa industrial e da etapa de distribuição do etanol. O balanço das emissões de GEE passaria de 23,8 gCO₂eq/MJ (quando não são consideradas as emissões de expansão da cana) para -0,31 gCO₂eq/MJ.

Para os demais casos onde a cana de açúcar cresça em áreas de Campo Limpo em solo Quartzarênio, ou em Cerradão (solo Quartzarênio ou Latossolo), haveria emissões significativas de GEE. A Figura 4.7 abaixo apresenta as emissões de GEE evitadas pelo uso do etanol, caso a cana cresça somente em áreas de Cerrado.

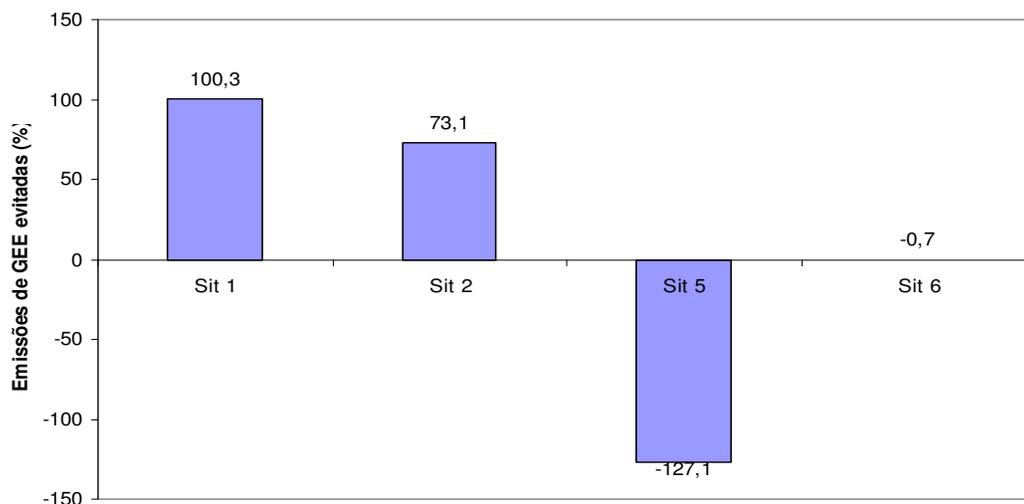


Figura 4.7 Emissões de GEE evitadas considerando a substituição de Cerrado

As emissões de GEE evitadas pelo uso de etanol em substituição à gasolina quando é considerado que a expansão da cana de açúcar para produção do etanol ocorre em áreas de Cerrado pode ser muito positiva (como na situação 1) ou muito negativa (como na situação 5).

Mesmo que as emissões de GEE evitadas sejam positivas quando se considera a expansão da cana em Campo Limpo em solo Quartzarênio, essas emissões são significativamente menores do que a expansão da cana em Campo Limpo em solo Latossolo, o que indica que é fundamental conhecer, além do estoque de carbono na biomassa substituída e no solo destas, as características do solo onde houve a expansão da cana.

4.4.4 Análise das emissões de GEE associadas à expansão da cana – estoque de carbono na camada de solo de 0-20 cm

Macedo e Seabra (2008) analisaram as emissões de GEE associadas à expansão da cana tendo como referência dados de estoque de carbono no solo em até 20 cm de profundidade.

Optou-se, então, por analisar as emissões de GEE considerando os mesmos dados, de estoque de carbono no solo, adotados por Macedo e Seabra (2008) para verificar a diferença das emissões de GEE quando profundidades diferentes de solo são avaliadas. Esta análise foi feita

considerando os dados do relatório da Conab (2008) para expansão da cana de açúcar. Os dados de estoque de carbono são referentes ao solo Latossolo.

Como os dados de estoque de carbono em solo cultivados com café e laranja não são apresentados nas referências utilizadas por Macedo e Seabra (2008), foi considerado que tanto o estoque de carbono no solo quanto na biomassa aérea dessas culturas são as mesmas do Cerrado Comum²⁵.

Foram feitas análises considerando a expansão da cana (32,8% mecanizada e 100% mecanizada) substituindo milho e soja cultivados com plantio direto, pasto 30% natural e 70% degradado (conforme adotado por Macedo e Seabra (2008)), laranja e café com estoque de carbono similar ao Cerrado Comum e Cerrado tipo Campo Limpo. Outras duas análises considerando as mesmas hipóteses, mas sendo a área de Cerrado coberta por vegetação encontrada em Cerradão também foram realizadas. A Figura 4.8, a seguir, apresenta as emissões de GEE calculadas para cada hipótese.

Da mesma forma que as análises anteriores, com faixa de solo de 0-40cm, as análises de estoque de carbono em faixa de solo de 0-20cm foram calculadas considerando as produtividades, agrícola e industrial, do etanol produzido no estado de São Paulo.

²⁵ De acordo com Lardy et al. (2001), o Cerrado Comum apresenta vegetação arbústea e escassa, enquanto o Cerradão apresenta árvores altas, mais densas, maior variedade de espécies e se assemelha a uma floresta.

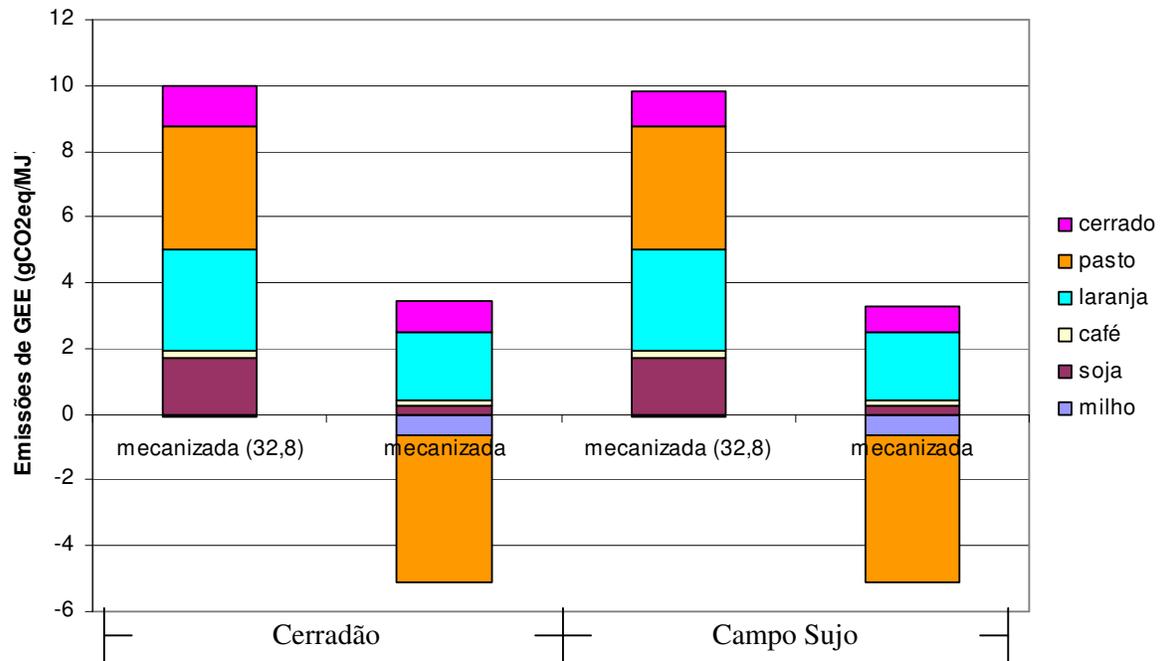


Figura 4.8 Emissões de GEE associadas à expansão da cana em diferentes áreas (0-20cm de profundidade)

As emissões de GEE associadas à expansão da cana em áreas de Cerrado foram positivas em todos os casos, mesmo no caso da expansão da cana em Cerrado do tipo Campo Limpo – que possui menor estoque de carbono. Isto acontece porque o estoque de carbono no solo com Cerrado Campo Limpo é menor quando uma profundidade maior de solo é considerada (40cm) e o contrário acontece com o estoque de carbono no solo com cana, ou seja, o estoque de carbono é maior quando uma camada mais profunda do solo é analisada.

Além disto, o estoque de carbono no solo com Campo Limpo (na camada de 0-20cm) é maior que o estoque de carbono na mesma profundidade de solo com Cerradão, o que justifica a pouca diferença entre as emissões de GEE associadas à expansão da cana em Campo Limpo e a expansão da cana em Cerradão.

Assim como no caso da cana de açúcar, o estoque de carbono no solo cultivados com soja (plantio direto) e pasto (com ou sem fertilização) é maior quanto maior a profundidade da camada de solo analisados.

A Figura 4.9, a seguir, mostra as emissões de GEE associadas à expansão da cana em áreas antes cobertas com diferentes biomassas, considerando o estoque de carbono no solo em uma faixa de 0-20cm de profundidade.

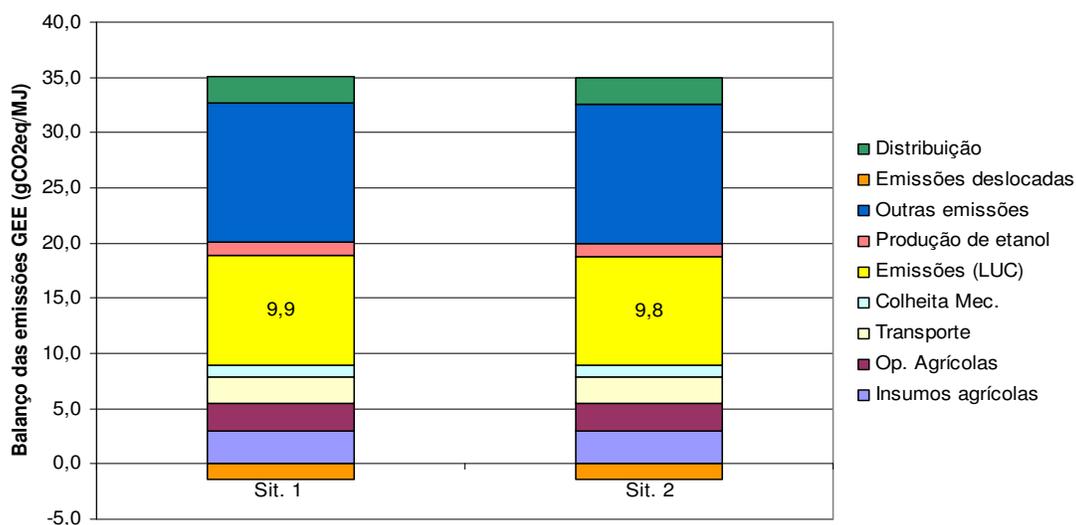


Figura 4.9 Fator de emissão de GEE referentes à expansão da cana (faixa de 0-20cm)

A situação 1, na Figura 4.9, indica que “novas áreas” ocupadas com cana de açúcar eram áreas ocupadas com Cerradão, e na situação 2, essas áreas eram ocupadas por Campo Limpo. Nota-se que nas duas situações as emissões de GEE não associadas ao uso de energia na cadeia produtiva são maiores que as emissões de GEE associadas ao uso de energia. A Figura 4.10, a seguir, apresenta as emissões de GEE evitadas pelo uso de etanol em substituição à gasolina.

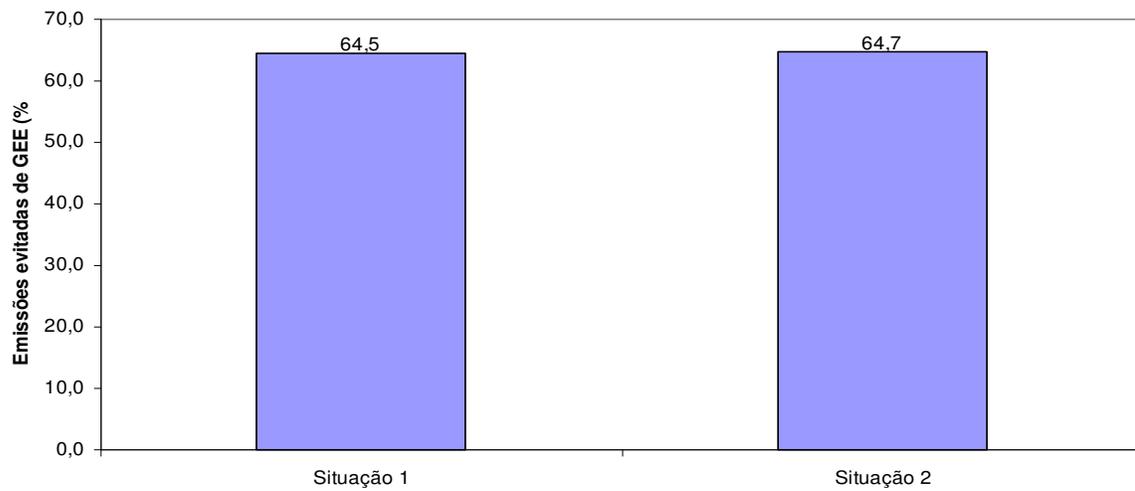


Figura 4.10 Emissões de GEE evitadas, considerando as emissões da expansão (0-20cm)

Capítulo 5

Uso de etanol em substituição ao diesel

O uso de diesel representa em média 63% do consumo energético e 31% das emissões totais de gases de efeito estufa da cadeia produtiva do etanol derivado da cana de açúcar produzido e usado no Brasil – desconsiderando o crédito da eletricidade excedente na cadeia produtiva. No caso da exportação para a Europa o consumo de B3 na etapa de transporte do etanol por caminhões até os portos pode representar até 19% das emissões totais de GEE da cadeia produtiva desse biocombustível (ver Capítulo 3). Dentro deste contexto, melhorias para a redução do consumo de diesel (biodiesel - B3) no ciclo de vida do etanol podem aumentar a atratividade do etanol produzido nas condições brasileiras.

A Scania tem desenvolvido motores ciclo diesel com algumas adaptações para que caminhões e ônibus possam ser abastecidos com etanol. Do ponto de vista do consumo energético e das emissões de GEE, essa tecnologia é uma alternativa para favorecer os balanços de energia e das emissões de GEE da cadeia produtiva do etanol brasileiro. Assim, neste capítulo, é realizada uma análise dos balanços energéticos e das emissões de GEE da cadeia produtiva do etanol derivado da cana de açúcar produzido no Brasil considerando que o uso do etanol seja feito em substituição ao biodiesel (B3).

Quanto à viabilidade econômica, há a necessidade de uma análise do preço do biodiesel (B3) na bomba, do preço do etanol para o produtor e do custo de oportunidade para o produtor de etanol deixar de lucrar com a venda do etanol para uso em substituição diesel. Além disto, o custo

do caminhão com motor adaptado, do aditivo utilizado e a oportunidade de venda do caminhão com este motor, comparados ao caminhão com motor sem adaptações, deveria ser analisado. Este trabalho não faz análise de viabilidade econômica.

Antes de adentrar com maior ênfase na análise deste capítulo, a seguir, as características do motor ciclo diesel desenvolvido pela Scania para utilizar etanol são apresentadas.

5.1 Motor ciclo diesel desenvolvido para uso de etanol

A Scania tem desenvolvido um motor para que veículos pesados possam ser abastecidos com etanol combustível. O motor, ciclo diesel, tem sido testado em ônibus urbanos na Europa, Ásia e em São Paulo, através do projeto BEST (BioEtanol para o Transporte Sustentável)²⁶. O motor diesel adaptado para uso de etanol está disponível e tecnicamente viável (MOREIRA et al., 2008).

Para caminhões, a Scania tem testado com êxito o mesmo motor, mas na sua terceira geração (BERGQVIST, 2009). A diferença dos motores, com relação à geração, está na taxa de compressão – antes de 22:1 e agora de 28:1, enquanto no motor convencional a diesel essa taxa é de 18:1 – injeção eletrônica, injetores com maior capacidade volumétrica e a saída, que passou de 230 para 270HP (MOREIRA et al., 2008). Além destas, no motor de terceira geração o torque aumentou de 1050 para 1200 Nm e os cilindros foram reduzidos de 6 para 5 (BERGQVIST, 2009).

O etanol aditivado (ETAMAX D) é o etanol com 5% de um aditivo que permite a auto-ignição do combustível no motor adaptado, já que o etanol não tem propriedade de auto-ignição (MOREIRA et al., 2008).

²⁶ O projeto BEST, iniciativa da União Européia e coordenada pela prefeitura de Estocolmo (Suécia), tem sido desenvolvido no Brasil, desde 2007, através de uma parceria do CENBIO (Centro Nacional de Referência em Biomassa, localizado na Universidade de São Paulo) com a Scania, BAFF/SEKAB (fornecedora do aditivo), Petrobrás, Copersucar e Empresa Metropolitana de São Paulo (EMTU/SP) (Moreira et al., 2008).

5.2 Balanço energético do etanol brasileiro com uso de etanol nas etapas de transporte e distribuição

As etapas de transporte e distribuição do etanol produzido e usado no Brasil representam, em média, 39% do consumo total de energia no ciclo de vida do etanol, considerando o uso de diesel.

Para analisar o impacto do uso do etanol em substituição ao diesel nestas etapas, considerou-se o consumo de energia no ciclo de vida do diesel – 0,2347 MJ/MJ (Cheminfo, 2008b) – e o consumo energético no ciclo de vida do etanol derivado da cana quando o etanol é utilizado na etapa de transporte da cana até a usina e sem considerar a etapa de distribuição (já que o caminhão seria abastecido na usina). A razão entre o consumo de energia na cadeia produtiva do etanol e o consumo de energia na cadeia produtiva do diesel é o fator utilizado para o cálculo de substituição do diesel por etanol nas etapas de transporte e distribuição.

Conforme justificado no Capítulo 3, o balanço energético foi calculado considerando o consumo de diesel (e não de biodiesel – B3) devido à impossibilidade de separar o consumo de energia fóssil do consumo de energia renovável no ciclo de vida do biodiesel de soja utilizado como referência – Cheminfo et al. (2008b).

A Figura 5.1, a seguir, apresenta o consumo de energia em cada etapa do ciclo de vida do etanol produzido e usado no Brasil, considerando o uso de etanol nas etapas de transporte da cana e distribuição do etanol.

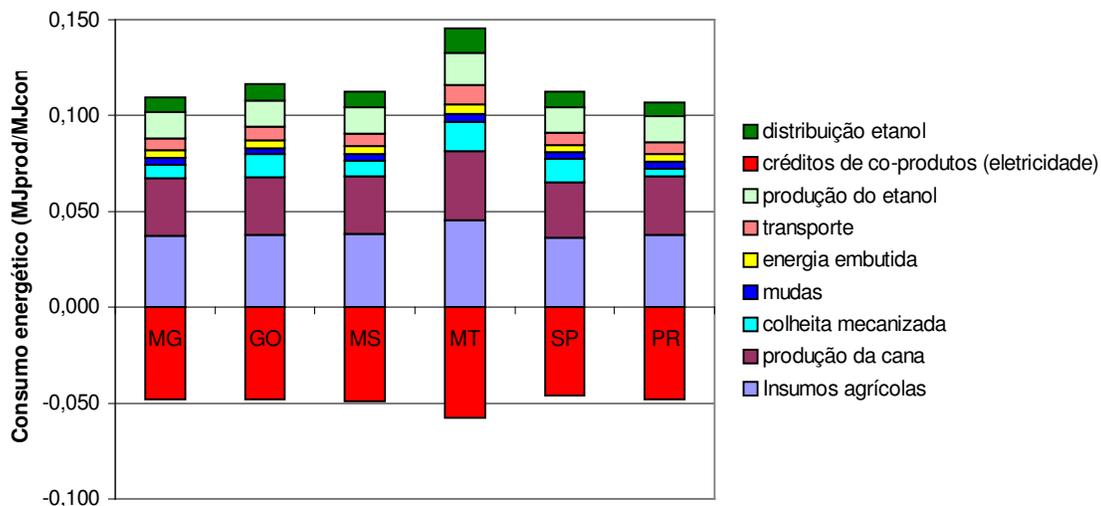


Figura 5.1 Consumo energético do etanol com uso de etanol no transporte e distribuição

O consumo energético das etapas de transporte e distribuição do etanol passou a representar 14% do consumo total de energia no ciclo de vida, ou seja, o consumo energético nestas etapas reduziria quase pela metade e o balanço de energia do etanol teria melhora significativa. Na Figura 5.2, abaixo, são mostrados os balanços de energia para cada estado analisado neste trabalho.

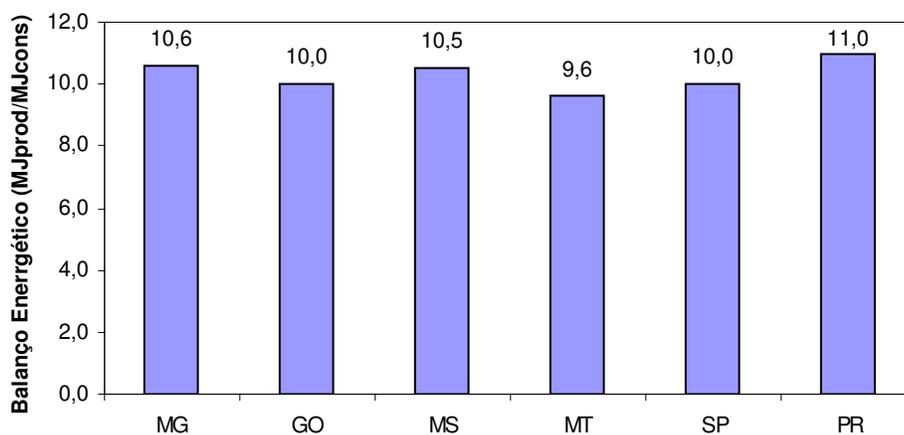


Figura 5.2 Balanço Energético do etanol com uso de etanol no transporte e distribuição

O balanço energético ficaria, em média, 41% melhor. Considerando que os caminhões utilizados para transporte da cana e distribuição do etanol têm, em cada estado analisado, a mesma eficiência e percorrem a mesma distância, a diferença do consumo energético nestas etapas entre um estado e outro é relativa à produtividade.

Estados onde a prática de colheita mecanizada é pequena e as produtividades são maiores, terão melhor balanço energético que estados onde a colheita mecanizada é adotada, relativamente, em maior área e as produtividades são menores – caso de Mato Grosso, por exemplo.

5.2.1 Balanço Energético do etanol brasileiro exportado para a Europa com uso de etanol nas etapas de transporte e distribuição

No caso em que o etanol brasileiro é exportado para a Europa, o consumo de diesel nestas etapas é, em média, 74% para os estados de Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso do Sul e Mato Grosso, considerando que estes estados utilizam o Porto de Santos para a exportação do etanol. Nos estados de São Paulo e Paraná, esse percentual é menor (53%), mas ainda significativo (ver Capítulo 3).

Com o uso de etanol para o transporte da cana e distribuição, o consumo energético nestas etapas representaria 19% (média para os estados de Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso do Sul e Mato Grosso), ou seja, o consumo energético nestas etapas seria quatro vezes menor, aproximadamente. Na Figura 5.3, a seguir, os consumos de energia em cada operação da cadeia produtiva do etanol brasileiro usado na Europa são apresentados.

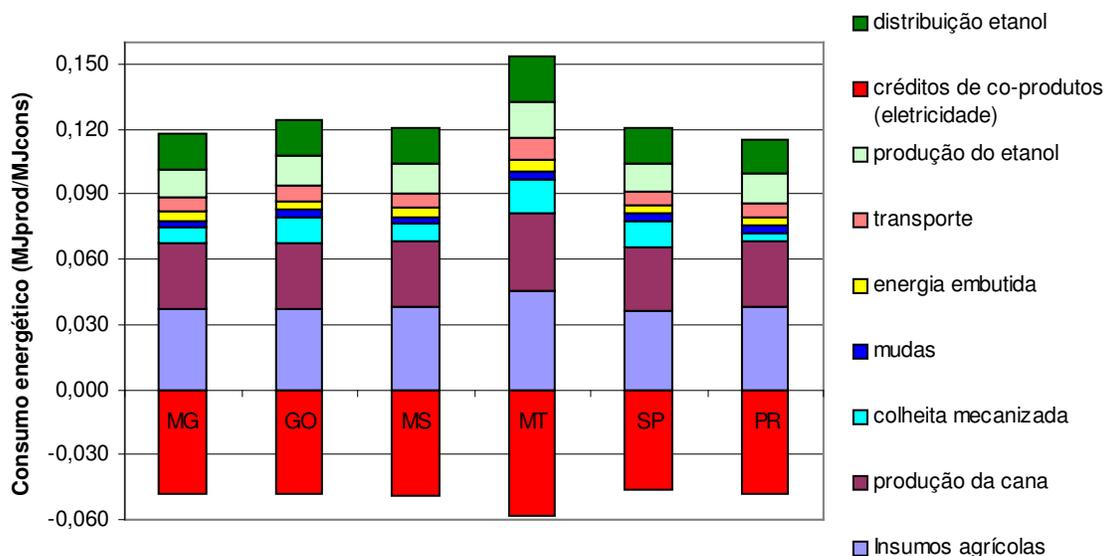


Figura 5.3 Consumo energético do etanol brasileiro exportado para a Europa, considerando o uso de etanol no caminhão

Da mesma forma que os balanços energéticos apresentados anteriormente, a variação dos resultados apresentados na Figura 5.4 está relacionada às produtividades, agrícola e industrial, de cada estado e à prática de colheita adotada para a cana.

Na Figura 5.4, os balanços energéticos de cada estado podem ser observados.

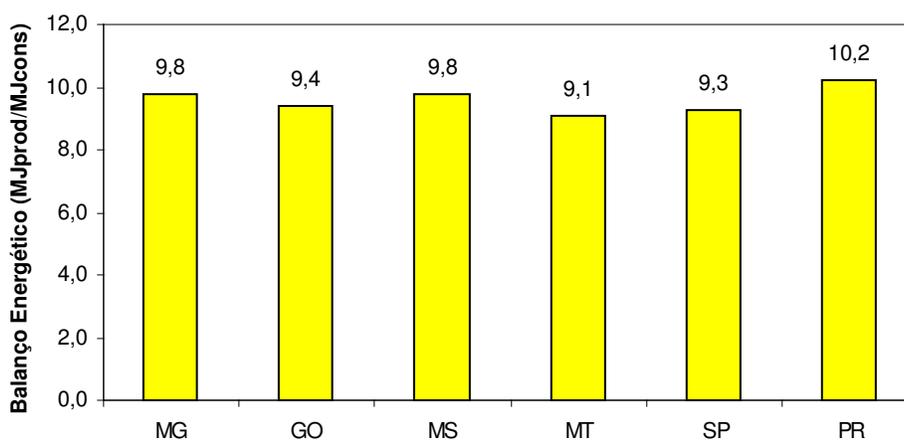


Figura 5.4 Balanço energético do etanol brasileiro, consumido na Europa, com uso de etanol nas etapas de transporte e distribuição

5.3 Balanço das emissões de GEE do etanol brasileiro com uso de etanol nas etapas de transporte e distribuição

As emissões de GEE associadas ao consumo de B3 nas etapas de transporte e distribuição representam, em média, 18% das emissões totais de GEE da cadeia produtiva do etanol produzido e usado no Brasil.

Para o cálculo das emissões de GEE associadas ao uso do etanol em substituição ao B3, as emissões de GEE nas etapas onde poderia ser feita essa substituição foram corrigidas considerando as emissões totais de GEE na cadeia produtiva do etanol com uso de etanol na etapa de transporte (a etapa de distribuição não tem emissões de GEE porque o caminhão seria abastecido na usina) em vez das emissões de totais de GEE da cadeia produtiva do B3.

As emissões de GEE em cada etapa do ciclo de vida do etanol são apresentadas na Figura 5.5 abaixo.

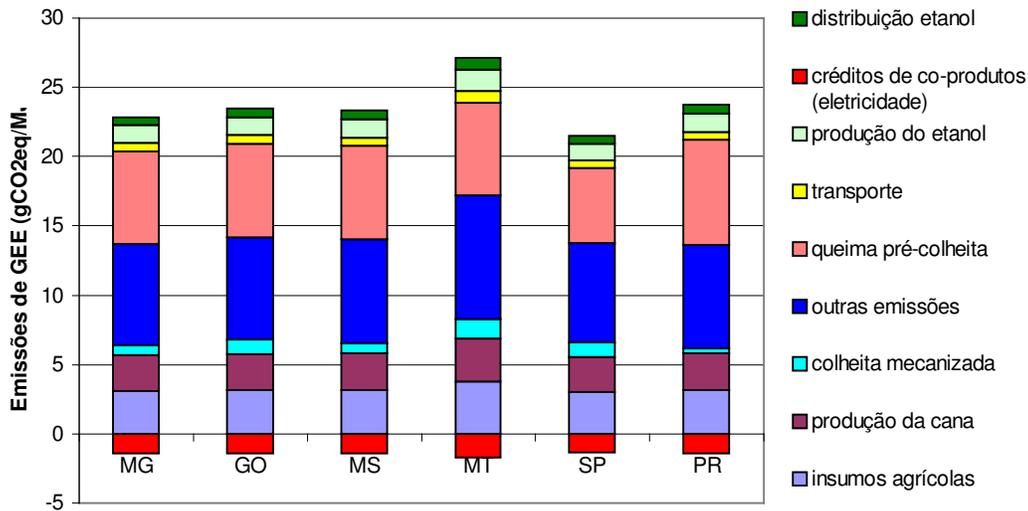


Figura 5.5 Emissões de GEE em cada etapa do ciclo de vida do etanol com uso de etanol no transporte e distribuição

As emissões de GEE nas etapas de transporte e distribuição, quando é feito o uso de etanol em vez de diesel, passa a representar, em média, 5% das emissões totais de GEE da cadeia produtiva do etanol produzido e usado no Brasil, ou seja, nestas etapas, houve uma redução de 70% nas emissões de GEE.

De acordo com Valázquez (2008), o ônibus do Projeto BEST testado em São Paulo, consome 60% mais combustível do que o motor usando diesel, conseqüentemente, o fator de substituição seria 1,60L etanol =1L de diesel – equivalente à relação entre os PCIs do diesel e etanol anidro (BEN, 2006). Assim, o fator de substituição indica que não há alteração de eficiência do motor quando da substituição entre combustíveis.

A seguir, as emissões de GEE evitadas pelo uso de etanol no Brasil, com o uso de etanol nas etapas de transporte e distribuição, são apresentadas na Figura 5.6.

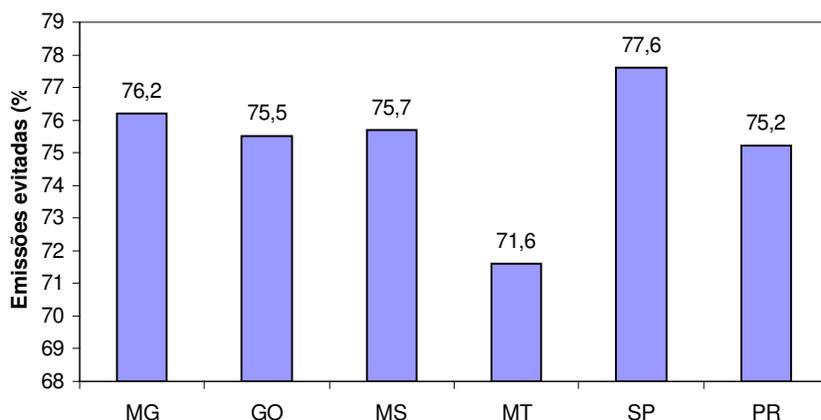


Figura 5.6 Emissões de GEE evitadas pelo uso de etanol com o uso de etanol nas etapas de transporte e distribuição

Assim como no balanço energético, a variação dos resultados apresentados está relacionada à prática de colheita da cana adotada em cada estado e às produtividades – agrícola e industrial.

5.3.1 Balanço das emissões de GEE do etanol brasileiro exportado para a Europa com uso de etanol nas etapas de transporte e distribuição

Quando o etanol brasileiro é exportado para a Europa há uma significativa emissão de GEE na etapa de transporte do etanol até os portos, se for considerado que este transporte é feito por caminhão movido a biodiesel (B3). As emissões de GEE nesta etapa são 41% das emissões totais de GEE do ciclo de vida do etanol brasileiro consumido na Europa (média dos estados de Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso do Sul e Mato Grosso). Nos estados de São Paulo e Paraná essas emissões são menores devido à menor distância percorrida pelo caminhão, mas são significativas (em média 17%).

Considerando as emissões de GEE na etapa de transporte da cana até as usinas, essas emissões passam a representar 46% e 25% das emissões de GEE do etanol brasileiro consumido na Europa.

A Figura 5.7, abaixo, ilustra participação de cada etapa nas emissões totais de GEE da cadeia produtiva do etanol produzido no Brasil e usado na Europa quando o diesel é substituído por etanol nas etapas de transporte da cana e distribuição do etanol.

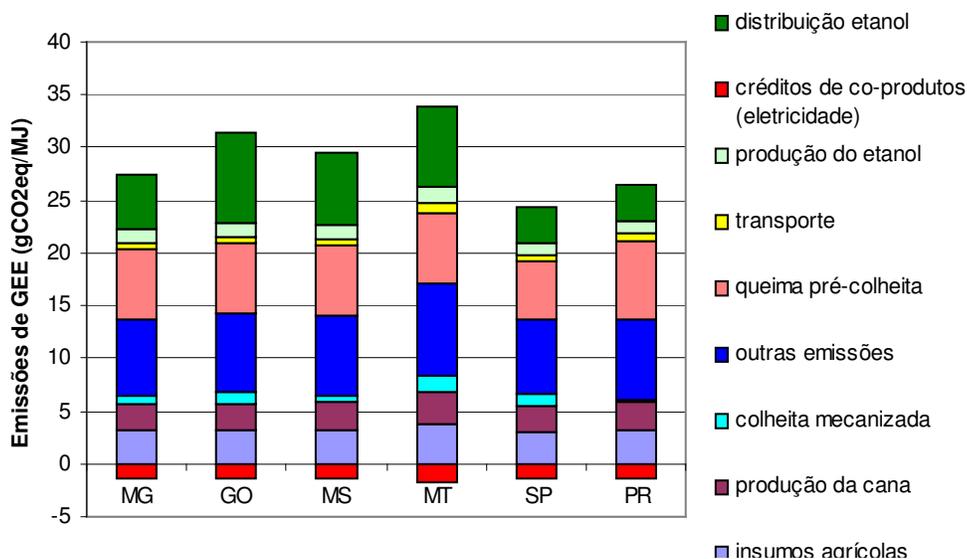


Figura 5.7 Emissões de GEE em cada etapa da cadeia produtiva do etanol brasileiro consumido na Europa considerando o uso de etanol no transporte e distribuição

As emissões de GEE nestas etapas seriam de 18% (média de Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso do Sul e Mato Grosso) e 7% (média de São Paulo e Paraná) do total das emissões de GEE da cadeia produtiva do etanol brasileiro.

As emissões de GEE evitadas neste caso é apresentado para cada estado na Figura 5.8 a seguir.

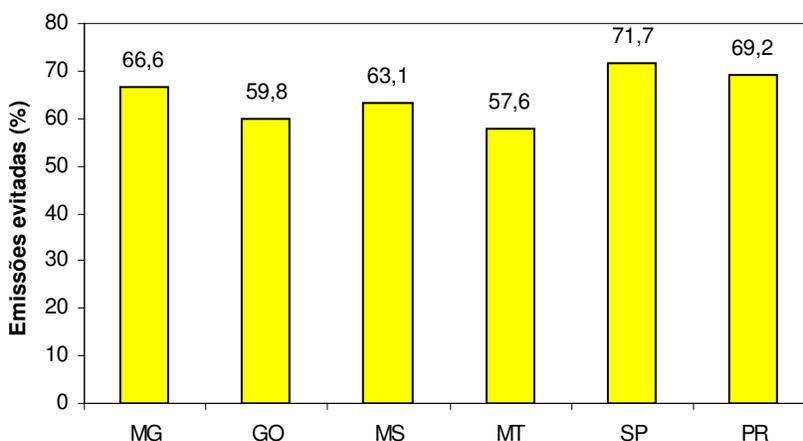


Figura 5.8 Emissões de GEE evitadas pelo uso de etanol quando o uso de etanol é feito nas etapas de transporte e distribuição

Nota-se que nos estados de Goiás, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul as emissões de GEE evitadas são, em média 34% maiores do que quando o biodiesel (B3) é usado nas etapas de distribuição e transporte. Isto acontece porque a distância percorrida para o transporte do etanol produzido nestes estados é maior que nos demais estados (ver Tabela 3.1, Capítulo 3).

5.4 Balanço energético do etanol brasileiro com uso de etanol em substituição ao diesel em sua cadeia produtiva

Esta análise é feita considerando que o etanol derivado da cana produzido no Brasil seria usado em todas as etapas da sua cadeia produtiva do etanol onde há o consumo de diesel.

Cabe ressaltar, no entanto, que esta análise é apenas um exercício, já que a tecnologia para uso de etanol em máquinas agrícolas não está atualmente desenvolvida e, conseqüentemente não está comercialmente disponível. Neste contexto, a Fiat prevê lançar no Brasil máquinas agrícolas com motores a etanol até 2010²⁷ (SAMORA, 2008).

A metodologia utilizada para calcular o balanço energético da cadeia produtiva do etanol em todas as etapas em que o diesel é utilizado atualmente é a mesma citada no item 5.2 acima. No entanto, para calcular o fator de multiplicação, é considerado o consumo total de energia na cadeia produtiva do etanol quando o diesel é substituído em todas as etapas (exceto na de distribuição que passa a não existir porque as máquinas e caminhões seriam abastecidos na usina).

O consumo energético em cada etapa da cadeia produtiva do etanol produzido e usado no Brasil é apresentado na Figura 5.9 abaixo.

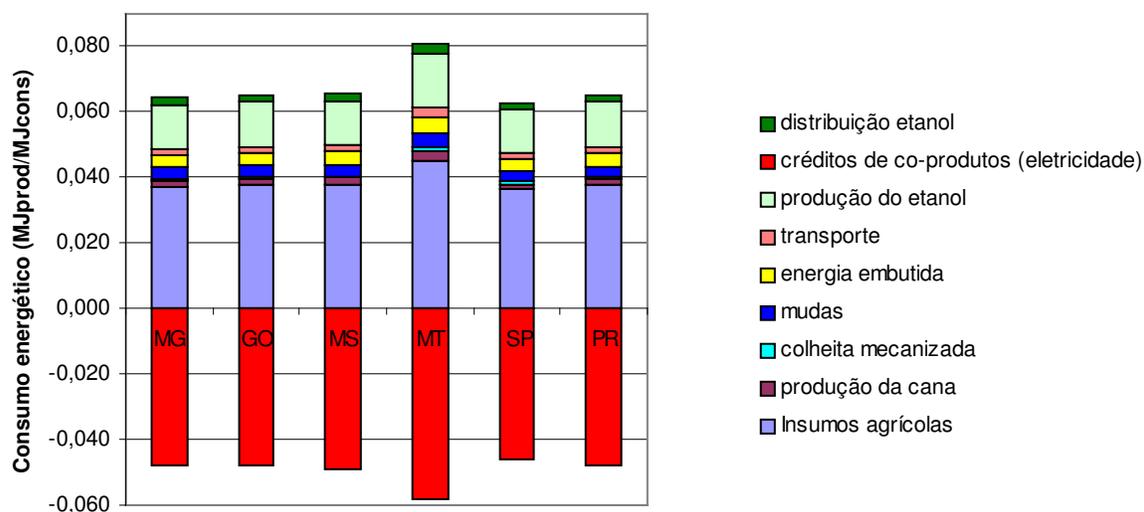


Figura 5.9 Consumo de energia em cada etapa da cadeia produtiva do etanol com uso de etanol em substituição ao diesel em todas as etapas

²⁷ O motor será diferente do motor desenvolvido pela Scania porque não será usado aditivo. De acordo com o Samora (2008), o motor usará diesel para a combustão do etanol, mas os dois combustíveis – diesel e etanol – serão armazenados em tanques diferentes, o diesel será usado somente para a ignição depois a combustão será do etanol.

Neste cenário, a soma do consumo energético de todas as etapas em que o etanol passaria a ser usado representa, em média, 10% de todo o consumo de energia no ciclo de vida do etanol produzido e usado no Brasil e seria, em média, nove vezes menor que a soma do consumo de energia nas demais etapas. A Figura 5.10, abaixo, apresenta uma comparação do balanço energético dos estados de Goiás, Mato Grosso do Sul e Mato Grosso, considerando o cenário atual (uso de diesel), o cenário em que diesel é substituído por etanol nas etapas de transporte e distribuição e o cenário em que todo diesel utilizado na cadeia produtiva do etanol seria substituído por etanol.

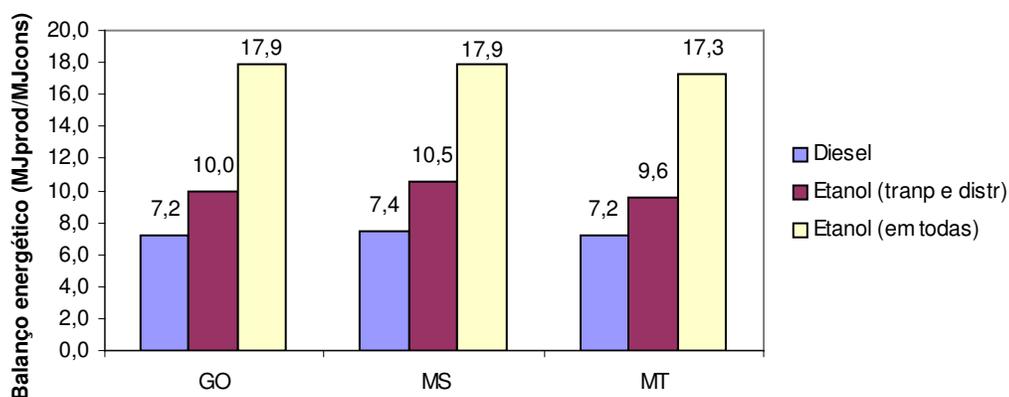


Figura 5.10 Comparação dos balanços energéticos do etanol produzido e consumido em Goiás, Mato Grosso do Sul e Mato Grosso

Na Figura 5.11, a seguir, são apresentados a comparação dos balanços energéticos do etanol produzido em Minas Gerais, São Paulo e Paraná.

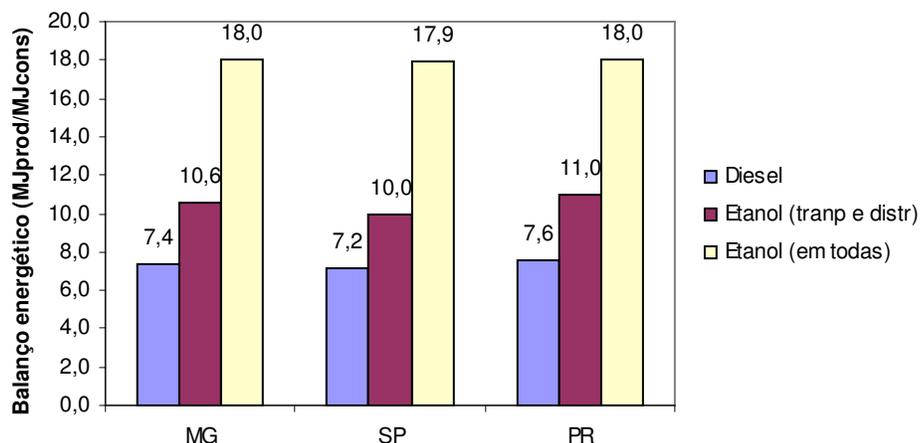


Figura 5.11 Comparação dos balanços energéticos do etanol produzido e consumido em Minas Gerais, São Paulo e Paraná

5.4.1 Balanço energético do etanol brasileiro exportado para a Europa com uso de etanol em substituição ao diesel em sua cadeia produtiva

Como o consumo total de energia na cadeia produtiva do etanol brasileiro consumido na Europa é maior que do etanol produzido e usado no Brasil, o consumo energético do etanol nas etapas em que o diesel era o combustível usado são ainda menos significativas que as apresentadas no item anterior.

A comparação dos balanços energéticos do etanol consumido na Europa produzido em Goiás, Mato Grosso do Sul e Mato Grosso é apresentada na Figura 5.12, a seguir.

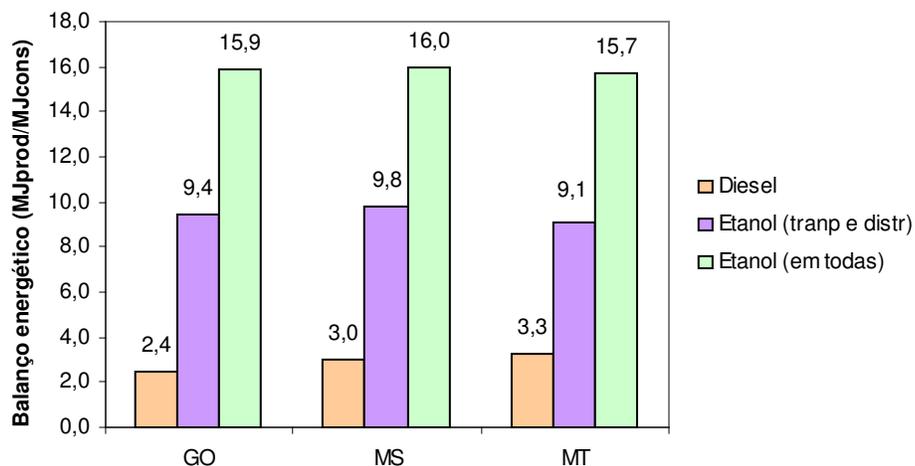


Figura 5.12 Comparação dos balanços energéticos do etanol usado na Europa e produzido em Goiás, Mato Grosso do Sul e Mato Grosso

A Figura 5.13, abaixo, mostra os balanços de energia do etanol consumido na Europa e produzido em Minas Gerais, São Paulo e Paraná.

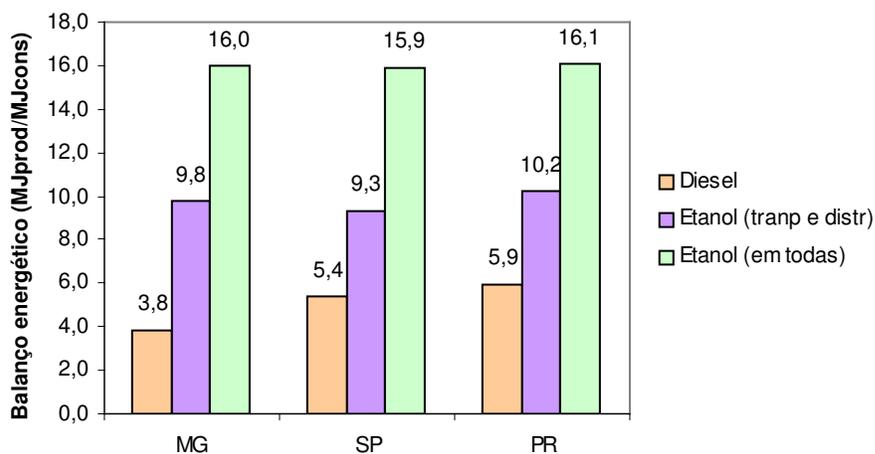


Figura 5.13 Comparação dos balanços energéticos do etanol usado na Europa e produzido em Minas Gerais, São Paulo e Paraná

5.5 Balanço das emissões de GEE do ciclo de vida do etanol brasileiro com uso de etanol em substituição do diesel em sua cadeia produtiva

As emissões de GEE nas operações de cultivo da cana e colheita mecanizada são, em média, 13% das emissões totais de GEE do ciclo de vida do etanol produzido e usado na Brasil no cenário atual, ou seja, com o uso de biodiesel (B3). Considerando que as emissões totais da cadeia produtiva do etanol são, em média, três vezes menores que as emissões de GEE da cadeia produtiva do biodiesel de soja (B3), o uso de etanol em substituição ao B3 poderia aumentar a atratividade das emissões de GEE evitadas quando o uso de etanol é feito em substituição à gasolina.

Nas Figuras 5.14 e 5.15, a seguir, são apresentados as emissões de GEE evitadas considerando uso de diesel, biodiesel (B3) e etanol no ciclo de vida do etanol brasileiro usado no país e na Europa.

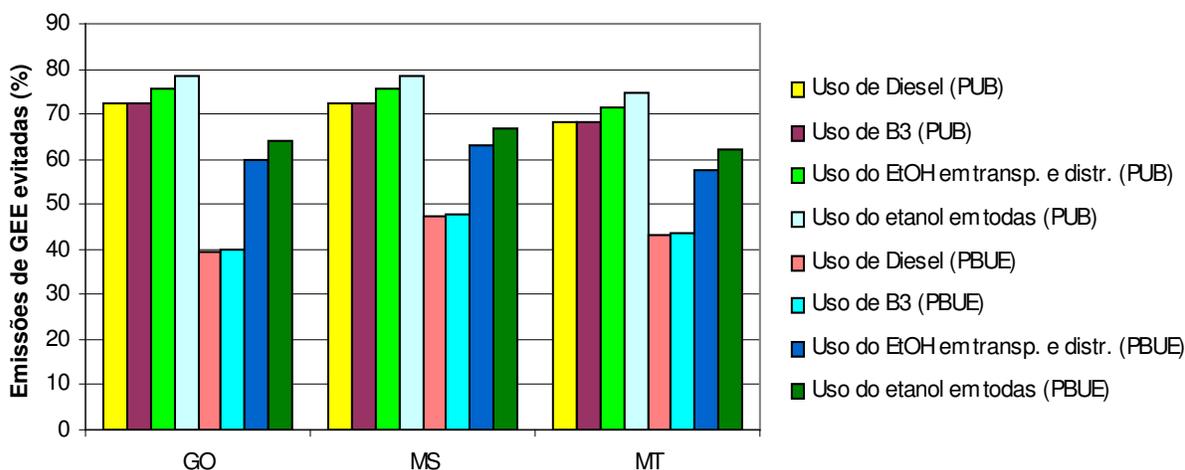


Figura 5.14 Comparação das emissões de GEE evitadas pelo uso de etanol em substituição ao diesel em Goiás, Mato Grosso do Sul e Mato Grosso

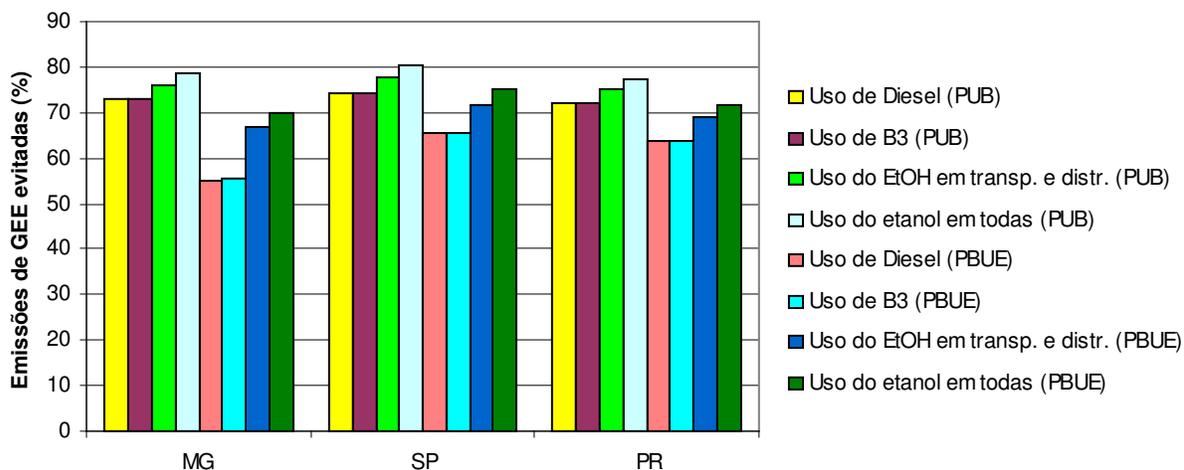


Figura 5.14 Comparação das emissões de GEE evitadas pelo uso de etanol em substituição ao diesel em Minas Gerais, São Paulo e Paraná

A vantagem do etanol derivado da cana de açúcar produzido em condições brasileiras, quanto aos balanços de energia e das emissões de gases de efeito estufa, aumenta conforme o uso deste biocombustível em sua cadeia produtiva, o que enfatiza as suas vantagens em relação aos combustíveis fósseis e até mesmo do B3 que, devido ao pequeno percentual de biodiesel adicional ao diesel, quase não traz vantagem ao balanço das emissões de GEE do ciclo de vida do etanol brasileiro.

Capítulo 6

Conclusões

6.1 Comparação entre etanol derivado de diferentes biomassas

O balanço de energia da cadeia produtiva do etanol derivado da cana de açúcar, produzido e usado no Brasil, considerando os dados apresentados por Macedo et al. (2008) para a região Centro-Sul do país, é melhor que do etanol derivado do milho, do trigo e de beterraba. As emissões de GEE no ciclo de vida do etanol brasileiro são menores que no ciclo de vida do etanol de milho e de trigo produzido em condições canadenses. Isto acontece porque as produtividades agrícola e industrial na produção do etanol brasileiro são maiores e toda energia consumida na etapa industrial deriva do uso do bagaço da cana de açúcar. Ao contrário, grande parte da produção do etanol derivado do milho e do trigo, requer o suprimento externo de eletricidade, que é gerada majoritariamente em termoelétricas.

As emissões de GEE na etapa industrial da produção do etanol de milho são aproximadamente vinte e cinco vezes maiores que as emissões de GEE na mesma etapa no caso da produção do etanol de cana, no Brasil. No caso da produção de etanol de trigo, no Canadá, as emissões de GEE na etapa industrial são quase trinta vezes maiores.

Essas conclusões estão baseadas em informação da literatura, ou seja, não tem base no trabalho desenvolvido nesta dissertação, e são aqui apresentadas na definição do contexto.

6.2 Emissões de GEE associadas à aplicação de fertilizantes nitrogenados

Na avaliação das emissões de GEE na cadeia produtiva do etanol de cana, produzido e usado no Brasil, empregando-se o IPCC (2006) como referência na estimativa das emissões associadas à aplicação de fertilizantes nitrogenados, conclui-se que sua parcela é bastante significativa – 21%. Tendo por referência as estimativas baseadas em Crutzen et al. (2007 e 2008), as emissões de GEE associadas à operação de fertilização nitrogenada da cana passam a representar entre 38 e 50% das emissões de GEE na cadeia produtiva do etanol brasileiro.

Embora críticas tenham sido apresentadas a respeito das hipóteses assumidas por Crutzen et al. (2007 e 2008), e também a respeito de sua base de dados, é evidente a relevância da aplicação de fertilizantes nitrogenados. Por um lado, é possível concluir que há necessidade de maior conhecimento científico a respeito, especificamente relativo às condições de plantio da cana no Brasil. Segundo, são necessários esforços para a redução da aplicação de fertilizantes industrializados, que tanto contribuem para o aumento das emissões de GEE na etapa de sua produção industrial, quanto na etapa agrícola de produção da cana, através das emissões de óxido nitroso.

6.3 Balanços de energia e das emissões de GEE nos estados da região Centro-Sul

Os balanços de energia do etanol de cana produzido (e consumido) nos estados de Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, mesmo que prejudicados pelas menores produtividades do que as assumidas por Macedo et al. (2008) para a região Centro-Sul, e mesmo considerando apenas a eletricidade excedente como coproduto do processo, resultaram melhores que os balanços de energia do etanol de outras biomassas.

Os resultados dos balanços energéticos são impactados pelas produtividades agrícola e industrial. Além disso, o consumo de energia associado ao uso de diesel na operação de colheita mecanizada também influencia os resultados. No entanto, o impacto do maior consumo energético na colheita mecanizada é tanto menor quanto maiores forem as produtividades (agrícola e industrial).

Além da produtividade agrícola da cana, é importante a concentração de açúcares totais recuperáveis (que está diretamente relacionada à produtividade industrial). No período considerado na análise feita neste trabalho, o ATR da cana foi maior nos estados de Goiás, Minas Gerais e São Paulo, o que pode ser interpretado como condições mais adequadas nesses estados, inclusive do ponto de vista das práticas adotadas. Por outro lado, a produtividade agrícola no Mato Grosso precisa ser aumentada para que o balanço de energia do etanol lá produzido seja melhor.

Considerada exportação do etanol brasileiro para a Europa, o balanço de energia estimado quando do seu uso é evidentemente menor (razão de energia 4,0, em média). No entanto, mesmo considerada a produção em estados mais insulares, como Goiás, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso e Minas Gerais, e o transporte de etanol por caminhão até Santos, o balanço energético ainda é melhor em relação aquele produzido a partir de milho, trigo e beterraba.

A diferença entre os balanços de energia do etanol produzido e consumido no Brasil e o etanol brasileiro consumido na Europa está relacionada somente à etapa de transporte entre a unidade industrial e o consumidor final. Neste sentido, para as hipóteses consideradas nesta dissertação, a razão de energia resultou menor para o etanol produzido em estados mais distantes dos portos.

As emissões de GEE evitadas pelo uso de etanol produzido e consumido no Brasil, em substituição à gasolina, desconsiderando emissões associadas à mudança direta do uso do solo, são maiores no caso da produção nos estados de São Paulo, Minas Gerais e Mato Grosso do Sul, considerando o uso de B3 na cadeia produtiva. As emissões de GEE evitadas são maiores quanto menor a prática da queima prévia à colheita, e maior as produtividades, agrícolas e industriais.

As emissões de GEE associadas à prática de colheita mecanizada (ou seja, devido ao consumo de diesel nesta operação) são menores que as emissões de GEE associadas à queima pré colheita, confirmando a vantagem ambiental da mecanização na colheita da cana, especialmente porque as emissões de GEE associadas à aplicação de insumos agrícolas (fertilizantes e cal), mais

as emissões da queima da cana (ou seja, as emissões de GEE não relacionadas ao uso de energia fóssil), são mais que a metade das emissões totais de GEE da cadeia produtiva do etanol de cana produzido e usado no Brasil (52% em média). Se a colheita mecanizada tivesse sido adotada em toda a área plantada nos estados do Centro-Sul, as emissões de GEE não associadas ao uso de energia fóssil teriam sido, em média, 28% das emissões totais de GEE, enquanto as emissões de GEE associadas ao consumo de B3 na colheita mecanizada representariam, em média, 13% das emissões totais de GEE no ciclo de vida do etanol produzido e usado no Brasil.

Devido ao maior consumo energético na etapa de distribuição do etanol consumido na Europa, a participação das emissões associadas ao uso de energia fóssil passou a representar a maior parcela das emissões de GEE na cadeia produtiva do etanol brasileiro – em média, 53% das emissões totais de GEE da cadeia produtiva do etanol brasileiro consumido na Europa.

O etanol produzido no estado de São Paulo e consumido na Europa é o que proporciona maior redução das emissões de GEE (65,8%), e o contrário acontece para o etanol produzido no estado de Goiás, se o mesmo for transportado até o porto em caminhões (39,8%), o que mostra que o transporte do etanol até os portos por caminhões movidos à B3 traz prejuízos com relação ao balanço energético e às emissões de GEE evitadas pelo uso de etanol em substituição à gasolina e que há a necessidade de planejamento e avaliação de outras tecnologias nesta etapa do ciclo de vida do etanol brasileiro.

6.4 Emissões de GEE associadas à expansão da cana de açúcar no Brasil

As emissões de GEE associadas à mudança direta do uso do solo devido à expansão das áreas cultivadas com cana de açúcar no estado de São Paulo são incertas. Primeiro, não há absoluta precisão sobre o uso do solo anterior ao plantio da cana.

Segundo, muitos fatores afetam a mudança do estoque de carbono no solo, e as emissões de GEE tanto podem ser muito negativas (ou seja, aumento do estoque de carbono quando a cana passa a ocupar uma dada área) quanto positivas (isto é, redução do estoque de carbono na área, com emissões de GEE). Esses fatores incluem: i) tipo de solo no qual houve a expansão (por

exemplo, solo arenoso ou argiloso); ii) práticas agrícolas adotadas na cultura original (por exemplo, plantio direto ou convencional, uso de fertilizantes em áreas de pastagem e manejo nas entrelinhas); iii) prática adotada na colheita da cana (mecanizada ou manual); iv) estoque de carbono no solo e na biomassa aérea que ocupava a área na qual a cana expandiu (o que depende da cobertura vegetal anterior); e v) e a profundidade do solo considerada na análise do estoque de carbono (o que não afeta propriamente as emissões, mas sim a avaliação).

As emissões de GEE devido à expansão da cana de açúcar no estado de São Paulo, considerados os dados da CONAB (2008), resultaram positivas quando foi considerado que a cana (32,8% mecanizada) expandiu em áreas com melhores manejos e que novas áreas correspondem a locais em que o bioma era Cerradão. Por outro lado, as emissões de GEE são estimadas negativas quando considerado que toda a área expandida com cana, em São Paulo, era antes ocupada com culturas que tinham piores manejos e as áreas novas correspondem a locais em que o bioma era Campo Limpo (ou seja, o benefício do etanol, substituindo gasolina, aumenta).

Por outro lado, se a cana tivesse expandido em áreas de pastagem e em solo argiloso, as emissões de GEE teriam sido negativas mesmo na pior situação (cana, com apenas 32,8% da área colhida mecanicamente, expandindo em pastagem plantada). Obviamente, o balanço seria ainda mais favorável ao etanol caso a colheita da cana seja toda mecanizada, e em áreas nas quais a pastagem com manejo convencional resultou em degradação do solo.

Com base no que foi exposto acima, fica evidente que as emissões de GEE associadas à expansão da cana só poderão ser quantificadas com exatidão quando houver mais dados sobre estoques de carbono associados a diferentes biomassas. Da mesma forma, é preciso informações sobre a classe de solo no qual houve a expansão da cana, e sobre as práticas agrícolas empregadas antes da cana ocupar aquela área. A falta desses dados pode levar à balanços de emissões de GEE tanto com resultados muito positivos quanto muito negativos. Neste sentido, estudos que queiram aumentar os benefícios do etanol quanto à redução das emissões de GEE podem aproveitar dados que favoreçam os resultados, assim como estudos que queiram anular esses benefícios podem

aproveitar os dados que prejudiquem o balanço das emissões de GEE do etanol de cana-de-açúcar produzido no Brasil.

6.5 Uso de etanol em substituição ao diesel na cadeia produtiva do etanol brasileiro

Os balanços de energia e das emissões de GEE do etanol derivado da cana, produzido e consumido no Brasil, são melhores quando é considerado o uso de etanol em substituição ao diesel mineral e ao B3. A razão de energia do etanol melhora 41% em relação ao caso de referência e as emissões de GEE evitadas seriam 5% maiores que as emissões evitadas quando o B3 é usado nas etapas de transporte e distribuição do etanol no Brasil.

Quando se considera o cenário mais hipotético, ou seja, de uso de etanol em substituição ao diesel em todas as etapas em que há o consumo desse combustível, a razão de energia melhoraria, em média, mais de 100%. No caso do etanol brasileiro produzido nessas condições ser consumido na Europa, a razão de energia seria, em média, mais que 300% melhor.

Melhorias também são observadas nos balanços das emissões de GEE do etanol brasileiro quando é feito o uso do etanol em substituição ao biodiesel (B3). Considerando que a tecnologia para uso de etanol em caminhões seja econômica e comercialmente disponível, o uso do etanol em sua cadeia produtiva tornaria o etanol brasileiro ainda mais atrativo tanto no Brasil quanto na Europa.

6.6 Sugestões para estudos futuros

No decorrer deste trabalho houve a necessidade de uma série informações que não foram encontradas amplamente e/ou claramente apresentadas na literatura e que seriam úteis para as análises de balanço das emissões de gases de efeito estufa do etanol derivado da cana produzido no Brasil. A partir disto, este trabalho sugere os seguintes estudos:

- Medições das emissões de óxido nitroso nas plantações de cana de açúcar devido à aplicação de fertilizantes nitrogenados;

- Neste trabalho não foram observadas as emissões de metano associadas à aplicação da vinhaça como fertilizante e essas emissões poderiam ser consideradas em estudos futuros;

- Identificação específica de todas as biomassas deslocadas pela expansão da cana de açúcar, inclusive as referidas como “outras culturas” pelo relatório do Conab (2008);

- Medições do estoque de carbono em diferentes culturas em diferentes classes de solo, assim como do estoque de carbono presente na matéria orgânica morta que ainda não se mineralizou e no húmus de cada tipo de biomassa para que as estimativas das emissões de GEE devido à mudança do uso do solo sejam feitas seguindo o método mais específico sugerido pelo IPCC (2006).

- Levantamento de dados para balanço energético e das emissões de GEE específicos para as condições da região Nordeste de produção da cana de açúcar e etanol.

Referências bibliográficas

ADUAN, R. E., VILELA, M. F., KLINK, C. A. Ciclagem de Carbono em Ecossistemas Terrestres – O Caso do Cerrado Brasileiro. **Embrapa. Documentos** (105). 2003. 30p.

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 – Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Disponível em: www.anp.gov.br

AULER, P. A. M., FIDALSKI, J., PAVAN, M. A., NEVES, C. S. V. J. Produção de laranja ‘pera’ em sistemas de preparo de solo e manejo nas entrelinhas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Vol. 32. 2008. pp. 363-374

BASTOS, V. D. Etanol, Alcoolquímica e Biorrefinarias. **Revista BNDES**. mar/set, 2007. pp. 11-13.

BERGQVIST, S. Green light for ethanol trucks. Disponível em: <http://www.scania.com/media/feature-stories/technology/green-light-for-ethanol-trucks.aspx>

BERTONCINI, E. I. **Geração de Resíduos da Indústria da Cana de açúcar**. In Workshop Projeto Diretrizes de Políticas Públicas para a Agroindústria Canaveira do Estado de São Paulo – Programa de Pesquisa em Políticas Públicas (PPPP): “Aspectos Ambientais da Cadeia do Etanol de Cana de açúcar”. 2008.

BOUWMAN, A.F., BOUMANS, L.J.M., and BATJES, N.H. Emissions of N₂O and NO from fertilised fields: Summary of available measurement data. **Global Biogeochemical Cycles**. Vol. 16(4), art. n° 1058. doi: 10.1029/2001GB001811. 2002a.

BOUWMAN, A.F., BOUMANS, L.J.M., and BATJES, N.H. Modeling global annual of N₂O and NO emissions from fertilised fields. **Global Biogeochemical Cycles**. Vol. 16(4), art. N° 1080. doi: 10.1029/2001GB001812. 2002b

CAMPOS, B.C. **Dinâmica do carbono em latossolo vermelho sob sistemas de preparo de solo e de culturas**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria. Tese(Doutorado). 2006

CANASAT – Mapeamento da cana via imagens de satélite de observação da Terra. 2008. Disponível em: www.dsr.inpe.br/mapdsr/frame.jsp

CHEMINFO, S&T, MCLEAN, H., FUGACITY TECHNOLOGY. **Sensitivity Analysis of Bioethanol LCA Models to Determine Assumptions with the Greatest Influence on Outputs**. 2008a. 168 p.

CHEMINFO, S&T, MCLEAN, H., FUGACITY TECHNOLOGY. **Sensitivity Analysis of Biodiesel LCA Models to Determine Assumptions with the Greatest Influence on Outputs**. 2008b. 170 p.

COLTRO, L. Avaliação do ciclo de vida como instrumento de gestão. Campinas: CETEA/ITAL, 2007. [on line]. 75p.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Perfil do Setor de Açúcar e Álcool no Brasil**. Brasília. 2008

CRAMER, J. et al. **Testing Framework for Sustainable Biomass** – Final report from the project group Sustainable Production of Biomass. Amsterdam. 2007

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.

CURRAN, M. A. **Environmental Life Cycle Assessment**. McGrawHill, 1996.

D'ANDREA, A.F., SILVA, M.L.N., CURI, N., GUILHERME, L.R.G. Estoque de carbono e nitrogênio e formas de nitrogênio mineral em um solo submetido a diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa agropecuária brasileira**. Vol. 39 (2). 2004

DE LUCA, F. E.; FELLER, C., CERRI, C. C., BARTHÈS, B., CHAPLOT, V., CAMPOS, D. C.; MANECHINI, C. Avaliação of the atributos físicos e estoque de carbono e nitrogênio em solos com queima e sem queima de canavial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Vol. 32 (2). 2008.

DELUCCHI, MARK A. **Lifecycle Analyses of Biofuels**. Califórnia: Institute of Transportation Studies (Relatório Técnico UCD-ITS-RR-06-08), 2006. 78 p.

DE OLIVEIRA, M. E., VAUGHAN, B. E., and RYKIEL, E.J. Jr. Ethanol as Fuel: Energy, Carbon Dioxide Balances, and Ecological Footprint. **BioScience** 55 n°7, 2005.

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

FENNHANN, J. **CDM Pipeline**. Disponível em: <http://cd4cdm.org/>

FIDALSKI, J., TORMENA, C. A., DA SILVA, A. P. Qualidade física do solo em pomar de laranja no noroeste do Paraná com manejo na cobertura permanente na entrelinha. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Vol. 31. 2007. pp. 423-433

RONQUIM, C. C. Dinâmica espaço temporal do carbono aprisionado na fitomassa dos agroecossistemas do Nordeste do Estado de São Paulo. **Embrapa. Documentos** (63). 2007. 52 p.

GALDOS, M.V. **Dinâmica do carbono do solo no agrossistema cana de açúcar. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**. Tese(Doutorado). 2007

GALLAGHER, E. The Gallagher Review of the indirect effects of biofuels production. Renewable Fuels Agency, 2008, 99 pp. Disponível em: http://www.dft.gov.uk/rfa/_db/_documents/Report_of_the_Gallagher_review.pdf.

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>

JANTALIA, C. P., VILELA, L., ALVES, B. J. R., BODDEY, R. M., URQUIAGA, S. Influência de Pastagens e Sistemas de Produção de Grãos, no Estoque de Carbono e Nitrogênio em um Latossolo Vermelho. **Embrapa, Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento** (11). Jan/2006

- 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
- LARDY, L.C., BROSSARD, M., ASSAD, M.L.L, LAURENT, J.Y. Carbon and phosphorus stocks of clayey ferrassol in Cerrado native and agroecosystems. **Agriculture Ecosystems and Environmental**. Vol.92. 2002
- LARSON, E. D. **A Review of Life-Cycle Analysis Studies on Liquid Biofuel Systems for the Transport Sector**. USA: Princeton Environmental Institute, 2006. 18p.
- MACEDO, I. C.; Leal, M. R. L. V.; and da Silva, J. E. A. R. **Balço das Emissões de Gases do Efeito Estufa na Produção e no Uso do Etanol no Brasil**. São Paulo: Secretaria Estadual de Meio Ambiente, 2004. 37p.
- 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.
- MCT et al. Emissões e remoções de dióxido de carbono por conversão de florestas e abandono de terras cultivadas. **Ministério de Ciência e Tecnologia. Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa**. 2004. 100pp.
- MOREIRA, J. R., VELÁZQUEZ, S. M. S. G., APOLINÁRIO, S. M., MELO, E. H., ELMADJIAN, P. H. **Projeto Best – Bioetanol para Transporte Sustentável**. [In: 7º](#)

NASSAR, A.M., RUDORFF, B.F.T., ANTONIAZZI, L.B., AGUIAR, D.A., BACCHI, M.R.P, ADAMI, M. Prospects of the sugarcane expansion in Brazil: impacts on direct and indirect land use changes. *In Sugarcane Ethanol: Contributions to climate change mitigation and the environment*. Wageningen Academic Publishers. The Netherlands, 2008. pp. 63-93.

NOVOA, R. And TEJEDA, H. R. Evaluation of the N₂O emissions from N in plant residues as affected by environmental and management factors. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. Vol. 75: 29-46. doi 10.1007/s10705-006-9009-y. 2006

OTTAMAR, R.D., VIHANEK, R.E., MIRANDA, H.S., SATO, M.N., ANDRADE, S.M.A. 2003. **Séries de estérefotografias para quantificar a biomassa da vegetação do cerrado no Brasil Central**. Brasília: USDA, USAID, UnB, 2001. In: Ciclagem de Carbono em Ecossistemas Terrestres – O caso do Cerrado Brasileiro. Platina, DF – Embrapa Cerrados, 2003. Disponível em: bbeletronica.cpac.embrapa.Br/2003/doc/doc_105.pdf

PANICHELLI, L., DAURIAT, A., GNANSOUNOU, E. Life cycle assessment of soybean-based biodiesel in Argentina for exportat. *Int J Life Cycle Assess*. Vol. 14. 2009. 144-159pp.

ROBERTSON, G.P. and GRACE, P.R. Greenhouse gás fluxes in tropical and temperate agriculture: the need for a full-cost accounting of global warming potentials. *Environment, Development and Sustainability*. Vol. 6. 51-63. 2004

SAMORA, R. **Fiat to launch ethanol truck engine in Brazil**. Reuters. 2008. Disponível em: <http://www.reuters.com/article/companyNews/idUSN2934520620080429>

SAWAMOTO, T., NAKAJIM A, Y., KASUYA, M., TSURUTA, H. And YAGI, K. Evaluation of emission factors for indirect N₂O emission due to nitrogen leaching in agro-ecosystems. **Geophysical Research Letters**. Vol. 32(3), doi: 10.1029/2004GL021625. 2005

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).

SEARCHINGER, T., HEIMLICH, R., HOUGHTON, R.A., DONG, F., ELOBEID, A., FABIOSA, J., TOKGOZ, S., HAYES, D. And YU, T. Use of U.S. Croplands for Biofuels Increases Greenhouse Gases Through Emissions from Land-Use Change. **Science**. Vol. 319: 1238-1239. 29/2/2008.

SMEETS, E. M. W., BOUWMAN, L. F., STEHFEST, E., DETLEF P. van V., POSTHUMA, A. Contribution of N₂O to the greenhouse gas balance of first-generation biofuels. **Global Change Biology**. Vol. 15. 2009. 1-23pp.

STEHFEST, E., and BOUWMAN, L. N₂O and NO emission from agricultural fields and soils under natural vegetation: summarizing available measurement data and modeling of global annual emissions. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**. Vol. 74: 207-228. 2006

TOLLEFSON, J. Not your father's biofuels. **Nature**. Vol. 451. 21 fev 2008. pp 880-883

UGAYA, CASSIA M. L. **Análise de Ciclo de Vida: Estudo de Caso para Materiais e Componentes Automotivos no Brasil**. Tese (Doutorado). Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2001. 157p.

UNICA. União da Indústria de Cana de Açúcar; 2007. Disponível em: www.unica.com.br.

URQUIAGA, S.; ALVES, R.J.B; BOODEY, M.R. Produção de biocombustíveis A questão do balanço energético. **Política Agrícola**. Ano XIV; nº1; 1º trimestre 2005; pp 42-46.

VELÁSQUEZ, S. M. S. G. **Bioethanol para o transporte sustentável.** In: Feira e Congresso Internacional de Energias Alternativas, Renováveis, Limpas e Co-geração. ITM Expo Feiras e Convenções. São Paulo. 2007. Disponível em: <http://cenbio.iee.usp.br/projetos/best.htm>

WALTER, A. As Mudanças Climáticas e a Questão Energética. **Revista Multiciência.** Campinas. Vol. 8. 2007. pp 29-46

WALTER, A.; ROSILLO-CALLE, F.; DOLZAN, P.; PIACENTE, E; CUNHA, K.B. Perspectives on fuel ethanol consumption and trade. **The Biomassa and Bioenergy;** ELSEVIER; 32. 2008a. pp 730-748.

WALTER, A., DOLZAN, P., QUILODRÁN, O., GARCIA, J., DA SILVA, C., PIACENTE, F., SEGERSTEDT, A. **Brazilian Bio-ethanol: A Sustainability Analysis.** Unicamp. Campinas. 2008b. 167pp.

WALTER, A., DOLZAN, P., QUILODRÁN, O., GARCIA, J., DA SILVA, C., PIACENTE, F., SEGERSTEDT, A. Sustainability Assessment of Bio-ethanol Production in Brazil Considering Land Use Change, GHG emissions and Socio-Economic Aspects. **Energy Policy.** 2009. (submetido)

WANG, M.; WU, W.; HUO, H. **Fuel-Cycle Assessment of Selected Bioethanol Production Pathways in the United States.** USA: Energy Systems Division, Argonne National Laboratory, 2006. 52p.

WANG, M.; WU, W.; HUO, H. **Life-cycle Energy and Greenhouse Gas Emission Impacts of Different Corn Ethanol Plants Types.** USA: Centre for Transportation Research, Argonne National Laboratory, 2007a. 13p.

WANG, M., WU, M., HUO, H. LIU, J. **Well-to-Wheels Energy Use and Greenhouse Gas Emission of Brazilian Sugarcane Ethanol Production Simulated by Using the GREET Model**. International Journal of Life Cycle Assessment. 2007b. 23p.

Anexo I

Dados para cálculo dos balanços de energia e das emissões de GEE

Tabela A 1.1 Consumo energético na cadeia produtiva do etanol produzido em Minas Gerais (MJ/MJ)

Etapas	Diesel (PUB)	Diesel (PBUE)	EtOH ^a (PUB)	EtOH ^a (PBUE)	EtOH ^b (PUB)	EtOH ^b (PBUE)
Insumos agrícolas	0,037	0,037	0,037	0,037	0,037	0,037
Op. Agrícolas	0,030	0,030	0,002	0,002	0,030	0,030
Colheita mecanizada	0,007	0,007	0,000	0,000	0,007	0,007
Mudas	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
Energia Embutida	0,004	0,004	0,004	0,004	0,006	0,006
Transporte	0,027	0,027	0,002	0,002	0,004	0,004
Produção do Etanol	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014
Crédito de co-produto	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048
Distribuição	0,034	0,185	0,002	0,010	0,008	0,041
Total	0,109	0,252	0,017	0,025	0,062	0,095
Etanol	1,108	1,108	1,108	1,108	1,108	1,108
Balanco	7,392	3,757	17,992	15,993	10,561	9,839

^a Uso de etanol em substituição ao diesel em todas as etapas;

^b Uso de etanol nas etapas de transporte e distribuição.

Tabela A 1.2 Consumo energético na cadeia produtiva do etanol produzido em Goiás (MJ/MJ)

Etapas	Diesel (PUB)	Diesel (PBUE)	EtOH ^a (PUB)	EtOH ^a (PBUE)	EtOH ^b (PUB)	EtOH ^b (PBUE)
Insumos agrícolas	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038
Op. Agrícolas	0,030	0,030	0,002	0,002	0,030	0,030
Colheita mecanizada	0,012	0,012	0,001	0,001	0,012	0,012
Mudas	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
Energia Embutida	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
Transporte	0,028	0,028	0,002	0,002	0,007	0,007
Produção do Etanol	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014
Crédito de co-produto	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048
Distribuição	0,034	0,356	0,002	0,010	0,009	0,017
Total	0,114	0,437	0,017	0,021	0,068	0,076
Etanol	1,116	1,116	1,116	1,116	1,116	1,116
Balanco	7,179	2,401	17,846	15,889	10,002	9,356

^a Uso de etanol em substituição ao diesel em todas as etapas;

^b Uso de etanol nas etapas de transporte e distribuição.

Tabela A 1.3 Consumo energético na cadeia produtiva do etanol produzido em Mato Grosso do Sul (MJ/MJ)

Etapas	Diesel (PUB)	Diesel (PBUE)	EtOH ^a (PUB)	EtOH ^a (PBUE)	EtOH ^b (PUB)	EtOH ^b (PBUE)
Insumos agrícolas	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038
Op. Agrícolas	0,030	0,030	0,002	0,002	0,030	0,030
Colheita mecanizada	0,008	0,008	0,000	0,000	0,008	0,008
Mudas	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
Energia Embutida	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
Transporte	0,028	0,028	0,002	0,002	0,007	0,007
Produção do Etanol	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014
Crédito de co-produto	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049
Distribuição	0,034	0,269	0,002	0,010	0,008	0,016
Total	0,111	0,345	0,017	0,025	0,064	0,072
Etanol	1,131	1,131	1,131	1,131	1,131	1,131
Balanco	7,381	2,993	17,938	15,986	10,501	9,801

^a Uso de etanol em substituição ao diesel em todas as etapas;

^b Uso de etanol nas etapas de transporte e distribuição.

Tabela A 1.4 Consumo energético na cadeia produtiva do etanol produzido em Mato Grosso (MJ/MJ)

Etapas	Diesel (PUB)	Diesel (PBUE)	EtOH ^a (PUB)	EtOH ^a (PBUE)	EtOH ^b (PUB)	EtOH ^b (PBUE)
Insumos agrícolas	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045
Op. Agrícolas	0,036	0,036	0,003	0,003	0,036	0,036
Colheita mecanizada	0,015	0,015	0,001	0,001	0,015	0,015
Mudas	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
Energia Embutida	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
Transporte	0,033	0,033	0,003	0,003	0,011	0,011
Produção do Etanol	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016
Crédito de co-produto	0,058	0,058	0,058	0,058	0,058	0,058
Distribuição	0,041	0,268	0,003	0,011	0,013	0,021
Total	0,138	0,366	0,023	0,031	0,088	0,096
Etanol	1,343	1,343	1,343	1,343	1,343	1,343
Balanco	7,148	3,306	17,259	15,705	9,617	9,115

^a Uso de etanol em substituição ao diesel em todas as etapas;

^b Uso de etanol nas etapas de transporte e distribuição.

Tabela A 1.5 Consumo energético na cadeia produtiva do etanol produzido em São Paulo (MJ/MJ)

Etapas	Diesel (PUB)	Diesel (PBUE)	EtOH ^a (PUB)	EtOH ^a (PBUE)	EtOH ^b (PUB)	EtOH ^b (PBUE)
Insumos agrícolas	0,036	0,036	0,036	0,036	0,036	0,036
Op. Agrícolas	0,029	0,029	0,002	0,002	0,029	0,029
Colheita mecanizada	0,012	0,012	0,001	0,001	0,012	0,012
Mudas	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
Energia Embutida	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
Transporte	0,027	0,027	0,002	0,002	0,007	0,007
Produção do Etanol	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013
Crédito de co-produto	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046
Distribuição	0,033	0,084	0,002	0,010	0,008	0,016
Total	0,111	0,162	0,016	0,024	0,066	0,074
Etanol	1,078	1,078	1,078	1,078	1,078	1,078
Balanco	7,157	5,393	17,919	15,886	9,998	9,332

^a Uso de etanol em substituição ao diesel em todas as etapas;

^b Uso de etanol nas etapas de transporte e distribuição.

Tabela A 1.6 Consumo energético na cadeia produtiva do etanol produzido em Paraná (MJ/MJ)

Etapas	Diesel (PUB)	Diesel (PBUE)	EtOH ^a (PUB)	EtOH ^a (PBUE)	EtOH ^b (PUB)	EtOH ^b (PBUE)
Insumos agrícolas	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038
Op. Agrícolas	0,030	0,030	0,002	0,002	0,030	0,030
Colheita mecanizada	0,004	0,004	0,000	0,000	0,004	0,004
Mudas	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
Energia Embutida	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
Transporte	0,028	0,028	0,002	0,002	0,006	0,006
Produção do Etanol	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014
Crédito de co-produto	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048
Distribuição	0,034	0,078	0,002	0,010	0,007	0,015
Total	0,107	0,151	0,017	0,025	0,059	0,067
Etanol	1,127	1,127	1,127	1,127	1,127	1,127
Balanco	7,558	5,904	18,048	16,067	10,984	10,217

^a Uso de etanol em substituição ao diesel em todas as etapas;

^b Uso de etanol nas etapas de transporte e distribuição.

Tabela A 1.7 Emissões de GEE na cadeia produtiva do etanol produzido em Minas Gerais (gCO₂eq/MJ)

Etapa	Diesel (PUB)	Diesel (PBUE)	B3 (PUB)	B3 (PBUE)	EtOH ^a (PUB)	EtOH ^a (PBUE)	EtOH ^b (PUB)	EtOH ^b (PBUE)
Insumos agrícolas	3,11	3,11	3,11	3,11	3,11	3,11	3,11	3,11
Op. Agrícolas	2,63	2,63	2,60	2,60	0,57	0,57	2,60	2,60
Colheita mec.	0,66	0,66	0,65	0,65	0,14	0,14	0,65	0,65
Outras emissões	7,36	7,36	7,36	7,36	7,36	7,36	7,36	7,36
Queima pré-colheita	6,68	6,68	6,68	6,68	6,68	6,68	6,68	6,68
Transporte	2,42	2,42	2,39	2,39	0,52	0,52	0,58	0,58
Produção do etanol	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27
Crédito de co-produto	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41
Distribuição	2,53	15,41	2,50	15,23	0,54	4,93	0,61	5,27
Total	25,25	38,13	25,14	37,87	18,77	23,16	21,44	26,10
Emissões Evitadas (%)	72,83	54,14	72,95	55,44	79,80	72,75	76,93	69,30

^a uso de etanol em substituição ao diesel em todas as etapas

^b uso de etanol nas etapas de transporte e distribuição

Tabela A 1.8 Emissões de GEE na cadeia produtiva do etanol produzido em Goiás (gCO₂eq/MJ)

Etapa	Diesel (PUB)	Diesel (PBUE)	B3 (PUB)	B3 (PBUE)	EtOH ^a (PUB)	EtOH ^a (PBUE)	EtOH ^b (PUB)	EtOH ^b (PBUE)
Insumos agrícolas	3,13	3,13	3,13	3,13	3,13	3,13	3,13	3,13
Op. Agrícolas	2,65	2,65	2,62	2,62	0,58	0,58	2,62	2,62
Colheita mec.	1,07	1,07	1,06	1,06	0,23	0,23	1,06	1,06
Outras emissões	7,41	7,41	7,41	7,41	7,41	7,41	7,41	7,41
Queima pré-colheita	6,72	6,72	6,72	6,72	6,72	6,72	6,72	6,72
Transporte	2,44	2,44	2,41	2,41	0,53	0,53	0,60	0,60
Produção do etanol	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27
Crédito de co-produto	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42
Distribuição	2,55	28,35	2,51	28,00	0,56	7,80	0,63	8,54
Total	25,83	51,63	25,71	51,20	19,01	26,26	22,02	29,93
Emissões Evitadas (%)	72,21	39,26	72,33	39,77	79,54	69,11	76,31	64,79

^a uso de etanol em substituição ao diesel em todas as etapas

^b uso de etanol nas etapas de transporte e distribuição

Tabela A 1.9 Emissões de GEE na cadeia produtiva do etanol produzido em Mato Grosso do Sul (gCO₂eq/MJ)

Etapa	Diesel (PUB)	Diesel (PBUE)	B3 (PUB)	B3 (PBUE)	EtOH ^a (PUB)	EtOH ^a (PBUE)	EtOH ^b (PUB)	EtOH ^b (PBUE)
Insumos agrícolas	3,17	3,17	3,17	3,17	3,17	3,17	3,17	3,17
Op. Agrícolas	2,69	2,69	2,65	2,65	0,59	0,59	2,65	2,65
Colheita mec.	0,69	0,69	0,68	0,68	0,15	0,15	0,68	0,68
Outras emissões	7,51	7,51	7,51	7,51	7,51	7,51	7,51	7,51
Queima pré-colheita	6,76	6,76	6,76	6,76	6,76	6,76	6,76	6,76
Transporte	2,47	2,47	2,44	2,44	0,54	0,54	0,60	0,60
Produção do etanol	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29
Crédito de co-produto	1,44	1,44	1,44	1,44	1,44	1,44	1,44	1,44
Distribuição	2,58	21,73	2,55	21,47	0,57	6,38	0,63	6,88
Total	25,73	44,88	25,62	44,54	19,14	24,95	21,87	28,11
Emissões Evitadas (%)	72,31	47,20	72,43	47,60	79,40	70,64	76,47	66,93

^a uso de etanol em substituição ao diesel em todas as etapas

^b uso de etanol nas etapas de transporte e distribuição

Tabela A 1.10 Emissões de GEE na cadeia produtiva do etanol produzido em Mato Grosso (gCO₂eq/MJ)

Etapa	Diesel (PUB)	Diesel (PBUE)	B3 (PUB)	B3 (PBUE)	EtOH ^a (PUB)	EtOH ^a (PBUE)	EtOH ^b (PUB)	EtOH ^b (PBUE)
Insumos agrícolas	3,76	3,76	3,76	3,76	3,76	3,76	3,76	3,76
Op. Agrícolas	3,19	3,19	3,15	3,15	0,80	0,80	3,15	3,15
Colheita mec.	1,37	1,37	1,35	1,35	0,34	0,34	1,35	1,35
Outras emissões	8,92	8,92	8,92	8,92	8,92	8,92	8,92	8,92
Queima pré-colheita	6,69	6,69	6,69	6,69	6,69	6,69	6,69	6,69
Transporte	2,94	2,94	2,90	2,90	0,74	0,74	0,83	0,83
Produção do etanol	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53
Crédito de co-produto	1,71	1,71	1,71	1,71	1,71	1,71	1,71	1,71
Distribuição	3,07	21,72	3,03	21,45	0,78	7,08	0,87	7,64
Total	29,76	48,41	39,62	48,05	21,87	28,16	25,40	32,17
Emissões Evitadas (%)	67,97	43,04	68,12	43,47	76,47	66,87	72,67	62,16

^a uso de etanol em substituição ao diesel em todas as etapas

^b uso de etanol nas etapas de transporte e distribuição

Tabela A 1.11 Emissões de GEE na cadeia produtiva do etanol produzido em São Paulo (gCO₂eq/MJ)

Etapa	Diesel (PUB)	Diesel (PBUE)	B3 (PUB)	B3 (PBUE)	EtOH ^a (PUB)	EtOH ^a (PBUE)	EtOH ^b (PUB)	EtOH ^b (PBUE)
Insumos agrícolas	3,02	3,02	3,02	3,02	3,02	3,02	3,02	3,02
Op. Agrícolas	2,56	2,56	2,53	2,53	0,50	0,50	2,53	2,53
Colheita mec.	1,08	1,08	1,07	1,07	0,21	0,21	1,07	1,07
Outras emissões	7,16	7,16	7,16	7,16	7,16	7,16	7,16	7,16
Queima pré-colheita	5,41	5,41	5,41	5,41	5,41	5,41	5,41	5,41
Transporte	2,36	2,36	2,33	2,33	0,46	0,46	0,53	0,53
Produção do etanol	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23
Crédito de co-produto	1,37	1,37	1,37	1,37	1,37	1,37	1,37	1,37
Distribuição	2,46	7,80	2,43	7,73	0,48	3,20	0,55	3,36
Total	23,92	29,27	23,81	29,11	17,12	19,84	20,14	22,95
Emissões Evitadas (%)	74,26	65,57	74,38	65,75	81,57	76,66	78,33	73,00

^a uso de etanol em substituição ao diesel em todas as etapas

^b uso de etanol nas etapas de transporte e distribuição

Tabela A 1.12 Emissões de GEE na cadeia produtiva do etanol produzido em Paraná (gCO₂eq/MJ)

Etapa	Diesel (PUB)	Diesel (PBUE)	B3 (PUB)	B3 (PBUE)	EtOH ^a (PUB)	EtOH ^a (PBUE)	EtOH ^b (PUB)	EtOH ^b (PBUE)
Insumos agrícolas	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16
Op. Agrícolas	2,68	2,68	2,64	2,64	0,61	0,61	2,64	2,64
Colheita mec.	0,36	0,36	0,35	0,35	0,08	0,08	0,35	0,35
Outras emissões	7,49	7,49	7,49	7,49	7,49	7,49	7,49	7,49
Queima pré-colheita	7,55	7,55	7,55	7,55	7,55	7,55	7,55	7,55
Transporte	2,47	2,47	2,43	2,43	0,56	0,56	0,61	0,61
Produção do etanol	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29
Crédito de co-produto	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43
Distribuição	2,57	7,33	2,54	7,26	0,58	3,26	0,64	3,38
Total	26,12	30,87	26,01	30,73	19,87	22,55	22,29	25,03
Emissões Evitadas (%)	71,90	63,68	72,01	63,85	76,01	73,47	78,61	70,55

^a uso de etanol em substituição ao diesel em todas as etapas

^b uso de etanol nas etapas de transporte e distribuição

Tabela A 1.13 Dados para cálculo dos balanços energéticos e das emissões de GEE (safra 2007/2008)

Estados	Prod. Agrícola (TC/ha)	ART (kg/TC)	EtOH Anidro (kgART/l)	Prod. Industrial (l/TC)	Colheita Manual (%)	Colheita Mecanizada (%)
Minas Gerais	83,2	143,4	1,7651	81,24	80,6	19,4
Goiás	81,4	145,6	1,7651	82,49	68,5	31,5
Mato Grosso Sul	84,3	138,7	1,7651	78,58	80,0	20,0
Mato Grosso	71,1	138,5	1,7651	78,47	66,7	33,3
Espírito Santo	63,1	138,2	1,7651	78,30	87,3	12,7
São Paulo	86,2	142,3	1,7651	80,62	67,2	32,8
Paraná	85,1	137,9	1,7651	78,13	89,6	10,4

Fonte: Conab (2008)

Anexo II

Diferentes hipóteses para alocação de co-produtos gerados pelo setor sucroalcooleiro

Os resultados apresentados abaixo estão baseados nos seguintes cenários de referência: uso de etanol em cada estado brasileiro onde a produção de cana é significativa, considerando um fator de substituição igual a 1/l (etanol/gasolina), emissões do etanol representativas de cada estado, usando os dados de Macedo et al. (2008) e Seabra (2008) convertidos de acordo com a produtividade da cana e do etanol em cada estado.

A primeira análise sensitiva considera uma quantidade menor de bagaço excedente vendido como combustível (5%), em comparação ao cenário considerado por Macedo et al. (2008) (10%). No limite os benefícios do uso de bagaço como combustível em substituição ao óleo combustível não são considerados (ou seja, 0%). No caso da produção de eletricidade excedente, a análise sensitiva é definida considerando o fator de emissão como sendo 268 tCO₂/GWh em vez de 579 tCO₂/GWh; no limite, nenhum crédito foi dado à produção de eletricidade excedente.

As Figuras A1.1 e A1.2 mostram os resultados das análises sensitivas a respeito dos créditos atribuídos à venda de bagaço excedente e à venda de eletricidade, respectivamente. O impacto do comércio de bagaço como combustível é maior por causa do fator de emissão de óleo combustível ser alto (95,7 kgCO₂eq/GJ). Por outro lado, o impacto de não levar em conta os créditos da produção de eletricidade excedente a partir da biomassa residual (bagaço) parece ser

menos significativa porque a produção de eletricidade excedente no caso de referência é pequeno comparado ao potencial existente (7-10%)²⁸.

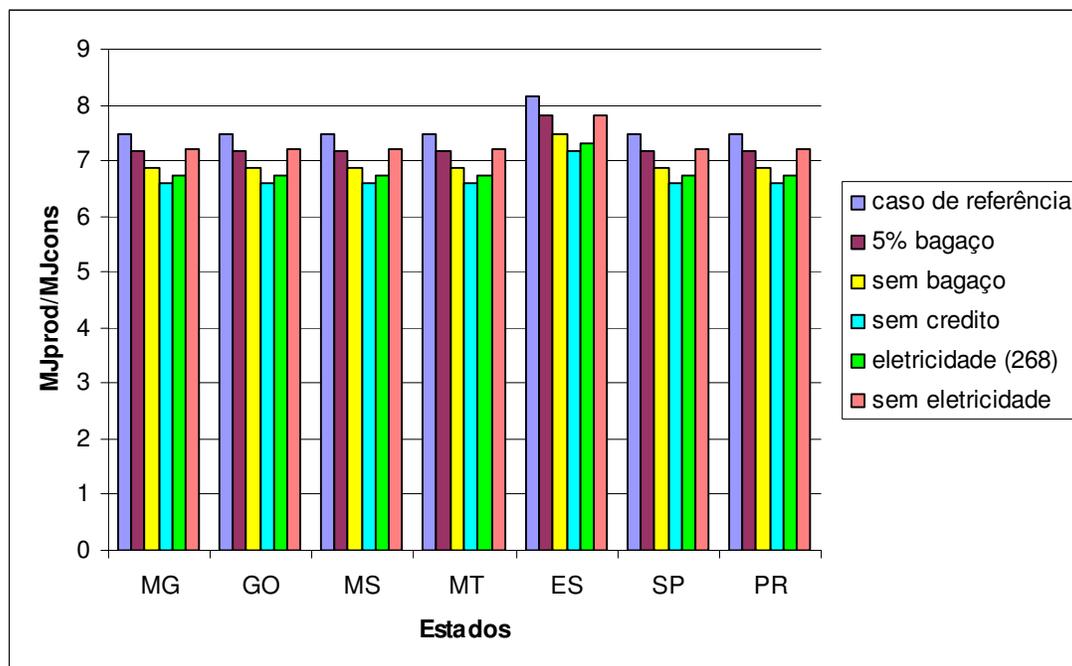


Figura A 2.1 Análise sensitiva do balanço energético do etanol considerando diferentes hipóteses para alocação de créditos dos co-produtos

²⁸ Neste caso considerando tecnologias de cogeração baseadas em ciclo a vapor, que são comerciais. Se tecnologias de cogeração baseadas em gaseificação de biomassa e o uso de ciclos combinados fossem consideradas (tecnologias que poderiam ser comercializadas somente em médio prazo) o potencial seria 20-25 vezes maior do que a atual média.

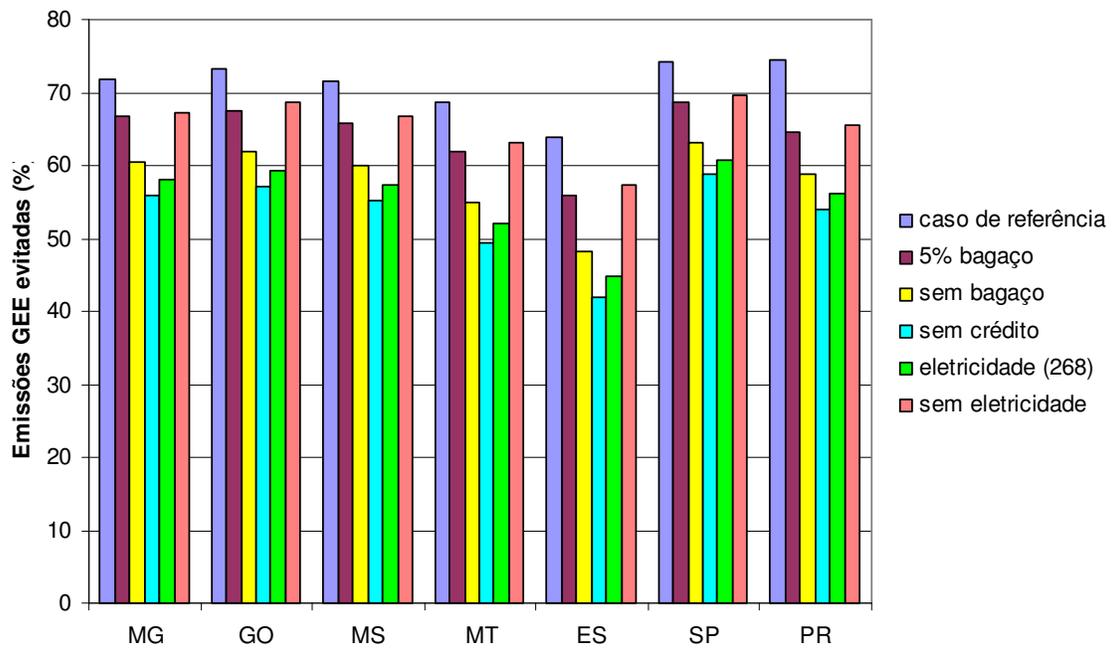


Figura A 2.2 Análise sensitiva das emissões de GEE evitadas pelo uso de etanol considerando diferentes hipóteses para alocação de créditos dos co-produtos

Anexo III

Dados de expansão da cana-de-açúcar no estado de São Paulo

Tabela A 3.1 Lavouras substituídas no estado de São Paulo pela expansão da cana (2007/2008)

Lavouras	ha	%
Milho	17.292	4,9
Soja	42.185	12,0
Café	2.284	0,6
Laranja	30.397	8,6
Pasto	242.146	68,8
Áreas novas	7.931	2,3
Outras	9.750	2,8
Total	351.984	100,0

Fonte: Conab (2008)