

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

EMIÇÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA NA
OBTENÇÃO DO ETANOL DE CANA-DE-
AÇÚCAR: UMA AVALIAÇÃO CONSIDERANDO
DIFERENTES CENÁRIOS TECNOLÓGICOS EM
MINAS GERAIS

Juan Carlos Claros Garcia

Belo Horizonte

2011

**EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA NA
OBTENÇÃO DO ETANOL DE CANA-DE-
AÇÚCAR: UMA AVALIAÇÃO CONSIDERANDO
DIFERENTES CENÁRIOS TECNOLÓGICOS EM
MINAS GERAIS**

Juan Carlos Claros Garcia

Juan Carlos Claros Garcia

**EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA NA
OBTENÇÃO DO ETANOL DE CANA-DE-
AÇÚCAR: UMA AVALIAÇÃO CONSIDERANDO
DIFERENTES CENÁRIOS TECNOLÓGICOS EM
MINAS GERAIS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Meio Ambiente

Linha de pesquisa: Avaliação, modelagem e controle da poluição atmosférica

Orientador: Prof. Dr. Eduardo von Sperling

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2011

Página com as assinaturas dos membros da banca examinadora, fornecida pelo Colegiado do Programa

Página com a ficha catográfica elaborada e fornecida pelo processamento técnico da Biblioteca EE/UFMG.

Dedico este trabalho a Eliseo e Lita, meus pais,
guerreiros que me passaram grandes valores com
os quais posso enfrentar pequenos e grandes desafios.
À minha esposa, Alessandra, que me ensinou
e me mostrou uma direção na vida.

AGRADECIMENTOS

À minha família, pelo encorajamento e apóio constantes durante a realização do doutorado.

À FAPEMIG e à CAPES, pelo apóio financeiro concedido.

Ao Prof. Eduardo Von Sperling, pela confiança depositada e pelo apóio fornecido durante a elaboração deste trabalho.

Ao Prof. Gilberto Caldeira Bandeira de Melo, pelas orientações iniciais.

À SIAMIG/SINDAÇÚCAR, pelo acolhimento, confiança depositada e facilitação do contato com as usinas pesquisadas neste trabalho.

A Jadir de Oliveira Silva, pela colaboração e disposição outorgadas durante a pesquisa de campo.

Às usinas que colaboraram com o fornecimento de dados para esta pesquisa, pela atenção e tempo concedidos.

Acima de tudo agradeço a Deus, que concede a fé que torna realidade aquilo que parece impossível.

A ardente expectativa da criação aguarda a revelação dos filhos de Deus. Pois a criação está sujeita à vaidade, não voluntariamente, mas por causa daquele que a sujeitou, na esperança de que a própria criação será redimida do cativeiro da corrupção, para a liberdade da glória dos filhos de Deus. Porque sabemos que toda a criação, a um só tempo, geme e suporta angústias até agora.
ROMANOS 8.19-22.

RESUMO

O presente estudo apresenta uma avaliação das emissões de gases de efeito estufa decorrentes dos processos de agricultura e industrialização de cana-de-açúcar para produção de etanol. A avaliação foi realizada considerando diversos cenários tecnológicos formados a partir de etapas produtivas envolvidas nos processos de agricultura e industrialização da cana-de-açúcar. Na quantificação dos gases de efeito estufa foram consideradas as emissões diretas de CO₂, CH₄ e N₂O decorrentes das atividades agrícolas e industriais, assim como as emissões correspondentes à obtenção de insumos. Os dados preliminares foram coletados a partir de processos de licenciamento ambiental de 11 usinas do Estado de Minas Gerais, incluindo usinas de álcool e usinas de açúcar e álcool. De modo geral, as emissões foram estimadas multiplicando os dados de consumo das atividades estudadas por fatores de emissão específicos obtidos da base de dados *Ecoinvent*, sendo que alguns princípios de Avaliação do Ciclo de Vida foram levados em conta para a estimativa das emissões. Para a determinação dos cenários tecnológicos relativos à produção de etanol, foi realizada uma pesquisa de campo envolvendo quatro usinas localizadas em Minas Gerais, onde foram identificadas etapas produtivas referentes aos processos de agricultura e industrialização. Foram levantados dados de consumo e utilização de insumos, os quais serviram de base para a estimativa das emissões de GEE em cada etapa produtiva. A partir das etapas produtivas e suas emissões, foi determinado um total de 180 cenários para produção de etanol com suas respectivas emissões. A partir de uma Análise de Variância foi realizada uma classificação dos cenários tecnológicos, de acordo com seu nível de emissões de GEE. Os resultados mostram que as emissões de GEE na produção de etanol dependem do cenário tecnológico considerado e que há diferenças significativas nas emissões quando comparam-se grupos de cenários tecnológicos diferentes. Dependendo do cenário tecnológico, as emissões variam entre 1729,24 kg CO₂eq/ha·ano a 3257,45 kg CO₂eq/ha·ano. Dentre as fontes de emissão que mais afetam o volume de emissões de GEE nos diversos cenários tecnológicos para produção de etanol, as mais importantes são: queima do canavial, colheita mecânica, aplicação de vinhaça, plantio de cana de ano e meio e adubação com torta de filtro. A emissão média de GEE na produção de etanol foi determinada em 2600,52 kg CO₂eq/ha·ano.

Palavras-chave: Emissões de gases de efeito estufa; Etanol; Cana-de-açúcar; Avaliação do Ciclo de Vida.

ABSTRACT

This paper presents a greenhouse gas emission's (GHG) assessment of the agricultural and industrial processes of sugar cane ethanol production in Minas Gerais. The assessment was performed by considering different technological scenarios related to the agricultural and industrial processes. The GHG balance takes into account CO₂, CH₄ and N₂O direct emissions and indirect emissions caused by upstream production processes as agrochemical manufacturing. The preliminary data were obtained by environmental licensing processes documents of eleven mills located in the state of Minas Gerais, including both ethanol and sugar cane/ethanol mills. The emissions were estimated by multiplying the input data with specific emission factors obtained by *Ecoinvent* database and Life Cycle Assessment principles were considered in the emission's quantification. In order to characterize the different technological scenarios for ethanol production, a field research was performed at four mills located in Minas Gerais. Input data for all agricultural and industrial processes has been collected directly at the mills. In total, 180 different scenarios were characterized by combining all possible subprocesses. These scenarios were classified by an analysis of variance according to the level of their total GHG emissions. The results demonstrate that the GHG emissions linked to the ethanol production depend on the respective technological scenario. Furthermore, they show that there are significant differences between the level of emissions of different scenario groups. The level of GHG emissions ranges from 1729,24 kg CO₂eq ha⁻¹·a⁻¹ to 3257,5 kg CO₂eq/ha⁻¹·a⁻¹. The major GHG sources are: sugar cane burning, mechanical harvesting, vinasse application, *one half year* sugar cane plantation, and filter cake fertilization. The average GHG emissions was 2600,5 kg CO₂eq/ ha⁻¹·a⁻¹.

Keywords: Green house gas emissions; Ethanol; Sugar cane; Life Cycle Assessment.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	XIV
LISTA DE QUADROS.....	XV
LISTA DE TABELAS.....	XVI
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	XVIII
1 INTRODUÇÃO.....	20
2 OBJETIVOS.....	22
2.1 OBJETIVO GERAL.....	22
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	22
3 REVISÃO DA LITERATURA	23
3.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE O CLIMA: EQUILÍBRIO DA TEMPERATURA NA TERRA	23
3.2 EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA NA AGRICULTURA	24
3.2.1 <i>Biomassa</i>	25
3.2.2 <i>Matéria orgânica morta</i>	25
3.2.3 <i>Solos</i>	26
3.2.4 <i>Gado e animais domésticos (livestock)</i>	26
3.3 MITIGAÇÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA PELO USO DE BIOETANOL.....	26
3.3.1 <i>Tecnologias para a produção de bioetanol</i>	27
3.3.2 <i>Produção e consumo no Brasil</i>	29
3.3.3 <i>Produtividade, eficiência energética e emissões evitadas de gases de efeito estufa</i>	30
3.4 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA.....	32
3.4.1 <i>Estrutura metodológica da Avaliação do Ciclo de Vida</i>	35
3.4.1.1 Definição do objetivo e escopo	35
3.4.1.2 Análise de inventário.....	37
3.4.1.3 Avaliação de impacto	38
3.4.1.4 Interpretação.....	38
3.5 AGRICULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR	38
3.5.1 <i>Produção de cana-de-açúcar em Minas Gerais</i>	39
3.5.2 <i>Características da cultura da cana-de-açúcar</i>	41
3.5.3 <i>Considerações antes do plantio</i>	41
3.5.3.1 Escolha da área para cultivo da cana-de-açúcar	42
3.5.3.2 Variedades de cana-de-açúcar	43
3.5.3.3 Época de plantio	44
3.5.4 <i>Produção de mudas</i>	46
3.5.4.1 Controle fitossanitário durante a produção de mudas.....	47
3.5.5 <i>Preparo do solo</i>	48
3.5.6 <i>Plantio</i>	49
3.5.6.1 Sulcação	49
3.5.6.2 Lançamento de mudas.....	50
3.5.6.3 Cultivo mínimo e plantio direto	51
3.5.7 <i>Melhoria da fertilidade do solo</i>	52
3.5.7.1 Calagem	54
3.5.7.2 Gessagem	55
3.5.7.3 Adubação mineral	56
3.5.7.4 Adubação orgânica.....	61
3.5.7.5 Adubação verde.....	62
3.5.8 <i>Tratos culturais</i>	63
3.5.8.1 Controle de ervas daninhas.....	63
3.5.8.2 Controle de doenças	64
3.5.8.3 Controle de pragas.....	65
3.5.8.4 Tratos culturais superficiais cana-soca	65
3.5.9 <i>Irrigação</i>	66
3.5.9.1 Manejo da irrigação.....	67
3.5.9.2 Métodos de irrigação.....	69
3.5.10 <i>Colheita</i>	70
3.5.10.1 Colheita manual	70
3.5.10.2 Colheita mecânica	72
3.5.10.3 Uso de maturadores e inibidores de florescimento antes da colheita.....	72
3.6 INDUSTRIALIZAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR: FABRICAÇÃO DO ETANOL.....	73
3.6.1 <i>Recepção da matéria-prima</i>	74

3.6.2	<i>Extração do caldo</i>	75
3.6.3	<i>Tratamento do caldo misto</i>	78
3.6.4	<i>Fermentação</i>	81
3.6.5	<i>Destilação</i>	85
3.7	FONTES DE EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA NA AGRICULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR.....	87
4	MATERIAL E MÉTODOS	91
4.1	ANTECEDENTES.....	91
4.2	PESQUISA BIBLIOGRÁFICA.....	91
4.3	ESTIMATIVA INICIAL DAS EMISSÕES DE GEE.....	92
4.4	CONSIDERAÇÕES SOBRE O OBJETIVO E ESCOPO.....	94
4.4.1	<i>Gases de efeito estufa</i>	94
4.4.2	<i>Unidade funcional</i>	94
4.4.3	<i>Período de base considerado</i>	95
4.4.4	<i>Fronteiras do sistema avaliado</i>	96
4.5	IDENTIFICAÇÃO DE ETAPAS PRODUTIVAS PARA A PRODUÇÃO DE ETANOL E ESTIMATIVA DAS EMISSÕES EM TAIS ETAPAS.....	99
4.6	IDENTIFICAÇÃO DE CENÁRIOS TECNOLÓGICOS PARA PRODUÇÃO DE ETANOL E ESTIMATIVA DAS EMISSÕES EM TAIS CENÁRIOS.....	101
4.7	ANÁLISE DE VARIÂNCIA.....	102
5	RESULTADOS	103
5.1	ESTIMATIVA INICIAL DAS EMISSÕES DE GEE.....	103
5.1.1	<i>Consumo de combustível</i>	103
5.1.1.1	Operações agrícolas.....	103
5.1.1.2	Transporte de mudas.....	104
5.1.1.3	Transporte de torta de filtro, cinzas e sedimentos.....	104
5.1.1.4	Transporte de cal e fertilizantes.....	105
5.1.1.5	Fertirrigação.....	105
5.1.1.6	Colheita mecânica.....	106
5.1.1.7	Carregamento após corte manual e transporte da cana-de-açúcar.....	106
5.1.2	<i>Consumo de calcário e fertilizantes</i>	107
5.1.3	<i>Consumo de defensivos agrícolas</i>	107
5.1.4	<i>Emissão de GEE devido à queima antes e após a colheita</i>	108
5.1.5	<i>Emissão de N₂O do solo</i>	109
5.1.6	<i>Produção de mudas</i>	109
5.1.7	<i>Emissões na etapa industrial</i>	109
5.2	IDENTIFICAÇÃO DE ETAPAS PRODUTIVAS PARA A PRODUÇÃO DE ETANOL E ESTIMATIVA DAS EMISSÕES EM TAIS ETAPAS.....	112
5.2.1	<i>Manutenção da área de cultivo</i>	114
5.2.2	<i>Produção de mudas</i>	115
5.2.3	<i>Aplicação de corretivos</i>	116
5.2.4	<i>Preparo do solo e plantio</i>	117
5.2.4.1	Cultivo convencional.....	118
5.2.4.2	Plantio mecanizado.....	119
5.2.4.3	Cultivo mínimo.....	120
5.2.5	<i>Tratos culturais em soqueira</i>	121
5.2.6	<i>Adubação no plantio</i>	122
5.2.6.1	Adubação de cana de ano e meio em área de vinhaça.....	123
5.2.6.2	Adubação de cana de ano e meio em área sem vinhaça.....	126
5.2.6.3	Adubação de cana de ano em área de vinhaça.....	127
5.2.6.4	Adubação de cana de ano em área sem vinhaça.....	127
5.2.6.5	Adubação com torta de filtro.....	128
5.2.7	<i>Adubação em soqueira</i>	129
5.2.7.1	Adubação em área de vinhaça com cana queimada.....	130
5.2.7.2	Adubação em área de vinhaça com cana crua.....	131
5.2.7.3	Adubação em área sem vinhaça com cana queimada.....	131
5.2.7.4	Adubação em área sem vinhaça com cana crua.....	132
5.2.7.5	Adubação com torta de filtro.....	132
5.2.8	<i>Consumo de defensivos agrícolas</i>	133
5.2.9	<i>Queima do canavial</i>	133
5.2.9.1	Áreas sem queima do canavial.....	136
5.2.10	<i>Colheita</i>	137
5.2.10.1	Colheita manual.....	137

5.2.10.2	Colheita mecânica	138
5.2.11	Transporte de cana	139
5.2.12	Industrialização	140
5.3	IDENTIFICAÇÃO DE CENÁRIOS TECNOLÓGICOS PARA PRODUÇÃO DE ETANOL E ESTIMATIVA DAS EMISSÕES EM TAIS CENÁRIOS.....	146
5.3.1	Cenário com maior volume de emissões.....	148
5.3.2	Cenário com menor volume de emissões.....	150
5.3.3	Cenário mais frequente	152
5.3.4	Cenário menos frequente.....	154
5.4	ANÁLISE DE VARIÂNCIA.....	155
5.5	CONVERSÃO DE UNIDADES: KG CO ₂ EQ/HA·ANO PARA KG CO ₂ EQ/L.....	159
6	CONCLUSÕES	160
	REFERÊNCIAS	163
	GLOSSÁRIO	174
	ANEXO A – Principais herbicidas registrados para uso na cultura da cana-de-açúcar no Brasil	175
	ANEXO B – Principais doenças da cana-de-açúcar e suas formas de controle	176
	ANEXO C – Principais pragas da cana-de-açúcar e suas formas de controle	178
	ANEXO D – Questionário para coleta de dados nas usinas pesquisadas	181
	ANEXO E – Dados de transporte de cinzas e sedimentos e emissões de GEE	188
	ANEXO F – Emissões de GEE (kg CO₂eq/ha) nas etapas produtivas e atividades agrícolas e industriais para a produção de etanol	189
	ANEXO G – Cenários tecnológicos para produção de etanol e suas emissões de GEE	190
	ANEXO H – Classificação dos cenários tecnológicos para produção de etanol segundo suas emissões de GEE	194
	ANEXO I – Cenários tecnológicos para produção de etanol e suas emissões de GEE (kg CO₂eq/L)	196

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: BALANÇO DE ENERGIA NA ATMOSFERA E NA SUPERFÍCIE TERRESTRE.....	24
FIGURA 2: A) PROPORÇÃO DE DIFERENTES GEE ANTROPOGÊNICOS COM RESPEITO ÀS EMISSÕES TOTAIS B) CONTRIBUIÇÃO DE DIFERENTES SETORES ÀS EMISSÕES TOTAIS DE GEE24	
FIGURA 3: ROTAS TECNOLÓGICAS PARA A PRODUÇÃO DE BIOETANOL	28
FIGURA 4: DISTRIBUIÇÃO DA PRODUÇÃO MUNDIAL DE ETANOL	29
FIGURA 5: EVOLUÇÃO DA PRODUÇÃO DE ÁLCOOL NO BRASIL	30
FIGURA 6: PRODUTIVIDADE DO BIOETANOL PRODUZIDO A PARTIR DE DIVERSAS MATÉRIAS PRIMAS	31
FIGURA 7: ETAPAS DO CICLO DE VIDA	33
FIGURA 8: ESTRUTURA METODOLÓGICA DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA.....	36
FIGURA 9: PARTICIPAÇÃO REGIONAL DA PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR, AÇÚCAR E ÁLCOOL EM MINAS GERAIS.....	40
FIGURA 10: EVOLUÇÃO DA PRODUÇÃO SUCROALCOOLEIRA DE MINAS GERAIS.....	41
FIGURA 11: CURVAS DE MATURAÇÃO PARA A CANA-DE-AÇÚCAR	44
FIGURA 12: CURVA DE RETENÇÃO DA ÁGUA DO SOLO	68
FIGURA 13: PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE ETANOL DA CANA-DE-AÇÚCAR	73
FIGURA 14: RECEPÇÃO DA MATÉRIA PRIMA NA FABRICAÇÃO DE ETANOL DA CANA-DE- AÇÚCAR	75
FIGURA 15: TERNO PARA MOAGEM	76
FIGURA 16: CIRCUITO DE MOAGEM COM EMBEBIÇÃO COMPOSTA	77
FIGURA 17: EXTRAÇÃO DO CALDO DE CANA POR MOAGEM.....	79
FIGURA 18: TRATAMENTO DO CALDO MISTO	82
FIGURA 19: PROCESSO DE FERMENTAÇÃO COM RECUPERAÇÃO DE LEVEDURAS	85
FIGURA 20: PROCESSO DE DESTILAÇÃO DO VINHO PARA OBTENÇÃO DO ÁLCOOL ANIDRO	87
FIGURA 21: LOCALIZAÇÃO DAS USINAS PESQUISADAS.....	93
FIGURA 22: FRONTEIRAS DO SISTEMA AVALIADO	97
FIGURA 23: CONTRIBUIÇÃO DE CADA CATEGORIA AO TOTAL DE EMISSÕES	111
FIGURA 24: ÁREA DE PLANTIO DE CANA-DE-AÇÚCAR.....	118
FIGURA 25: APLICAÇÃO DE VINHAÇA POR MEIO DE CONJUNTO MOTOBOMBA	125
FIGURA 26: CANA QUEIMADA AGUARDANDO CARREGAMENTO E PALHA REMANESCENTE ...	135
FIGURA 27: ÁREA SEM QUEIMA DO CANAVIAL E PALHA REMANESCENTE APÓS COLHEITA MECÂNICA.....	136
FIGURA 28: CARREGADEIRA UTILIZADA NO CARREGAMENTO DE CANA-DE-AÇÚCAR.....	138
FIGURA 29: A) COLHEITA MECÂNICA DE CANA-DE-AÇÚCAR; B) OPERAÇÃO DE TRANSBORDO DA CANA COLHIDA	139
FIGURA 30: VEÍCULOS UTILIZADOS NO TRANSPORTE DE CANA-DE-AÇÚCAR	140
FIGURA 31: BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR UTILIZADA PARA AUTOGERAÇÃO DE ENERGIA NA PRODUÇÃO DE ETANOL.....	141
FIGURA 32: INSTALAÇÕES DE UMA USINA PRODUTORA DE ETANOL.....	143
FIGURA 33: EMISSÕES DE GEE EM FUNÇÃO DE DIFERENTES CENÁRIOS TECNOLÓGICOS PARA PRODUÇÃO DE ETANOL.....	147
FIGURA 34: CONTRIBUIÇÃO DE CADA FONTE AO TOTAL DE EMISSÕES – CENÁRIO COM MAIOR VOLUME DE EMISSÕES	150
FIGURA 35: CONTRIBUIÇÃO DE CADA FONTE AO TOTAL DE EMISSÕES – CENÁRIO COM MENOR VOLUME DE EMISSÕES	152
FIGURA 36: CONTRIBUIÇÃO DE CADA FONTE AO TOTAL DE EMISSÕES – CENÁRIO MAIS FREQUENTE.....	154
FIGURA 37: CONTRIBUIÇÃO DE CADA FONTE AO TOTAL DE EMISSÕES – CENÁRIO MENOS FREQUENTE.....	155

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1: PARÂMETROS AMBIENTAIS PARA O CULTIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR	42
QUADRO 2: SUGESTÃO DE MANEJO DE VARIEDADES EM DE CANA-DE-AÇÚCAR EM MINAS GERAIS	44
QUADRO 3: QUANTIDADE DE NUTRIENTES EXTRAÍDOS DO SOLO PELA CANA-DE-AÇÚCAR.....	53
QUADRO 4: GANHOS EM PRODUTIVIDADE E ELEVAÇÃO DA SATURAÇÃO POR BASES EM FUNÇÃO DA APLICAÇÃO DE GESSO NO CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR	56
QUADRO 5: DOSES DE FÓSFORO RECOMENDADAS PARA ADUBAÇÃO DA CANA-PLANTA EM FUNÇÃO DA PRODUTIVIDADE DESEJADA E DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EXTRAÍDO COM MEHLICH 1	58
QUADRO 6: DOSES DE FÓSFORO RECOMENDADAS PARA ADUBAÇÃO DA CANA-PLANTA EM FUNÇÃO DA PRODUTIVIDADE DESEJADA E DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EXTRAÍDO COM RESINA DE TROCA IÔNICA	59
QUADRO 7: DOSES DE POTÁSSIO RECOMENDADAS PARA ADUBAÇÃO DA CANA-PLANTA EM FUNÇÃO DA PRODUTIVIDADE DESEJADA E DISPONIBILIDADE DE POTÁSSIO EXTRAÍDO COM MEHLICH 1	59
QUADRO 8: DOSES DE POTÁSSIO RECOMENDADAS PARA ADUBAÇÃO DAS REBROTAS EM FUNÇÃO DA PRODUTIVIDADE DESEJADA E DISPONIBILIDADE DE POTÁSSIO EXTRAÍDO COM RESINA DE TROCA IÔNICA	60
QUADRO 9: VALORES MÍNIMOS DE DISPONIBILIDADE DE MICRONUTRIENTES NO SOLO, EXTRAÍDOS COM SOLUÇÃO DE DTPA E MEHLICH 1	60
QUADRO 10: PORCENTAGEM DE ÁGUA DO SOLO QUE PODE SER CONSUMIDA PELA CULTURA EM FUNÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA MÁXIMA DA REGIÃO	68
QUADRO 11: VALORES DE KC PARA CANA-DE-AÇÚCAR	69
QUADRO 12: INDICADORES DE QUALIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR.....	71
QUADRO 13: CARACTERÍSTICAS DO MOSTO PARA UMA BOA FERMENTAÇÃO	83
QUADRO 14: ETAPAS PRODUTIVAS E ATIVIDADES AGRÍCOLAS E INDUSTRIAIS NA PRODUÇÃO DE ETANOL DE CANA-DE-AÇÚCAR.....	101
QUADRO 15: ALGUNS CENÁRIOS TECNOLÓGICOS PARA PRODUÇÃO DE ETANOL, SUAS CARACTERÍSTICAS E EMISSÕES DE GEE	148

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – PARTICIPAÇÃO (%) DAS FONTES PRIMÁRIAS DE ENERGIA NO BRASIL	30
TABELA 2 – EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E EMISSÕES EVITADAS DE GASES DE EFEITO ESTUFA PELO USO DE ETANOL.....	32
TABELA 3 – PRODUÇÃO CANAVIEIRA NO BRASIL.....	39
TABELA 4 – PRINCIPAIS PAÍSES PRODUTORES DE CANA-DE-AÇÚCAR	40
TABELA 5 – DADOS DAS USINAS PESQUISADAS	93
TABELA 6 – FATORES DE EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA PARA O DIESEL	104
TABELA 7 – EMISSÃO DE GEE NA OBTENÇÃO DO DIESEL	104
TABELA 8 – EMISSÃO DE GEE NA OBTENÇÃO DE CAL E FERTILIZANTES.....	107
TABELA 9 – EMISSÃO DE GEE NA OBTENÇÃO DE DEFENSIVOS AGRÍCOLAS	108
TABELA 10 – CONSUMO DE PRODUTOS QUÍMICOS NA INDUSTRIALIZAÇÃO DO ETANOL	110
TABELA 11 – EMISSÕES DE GEE NA AGRICULTURA E INDUSTRIALIZAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR	111
TABELA 12: DADOS DAS USINAS ESTUDADAS NA PESQUISA DE CAMPO.....	113
TABELA 13: EMISSÕES DE GEE NA MANUTENÇÃO DA ÁREA DE CULTIVO.....	114
TABELA 14: EMISSÕES DE GEE NA PRODUÇÃO DE MUDAS.....	115
TABELA 15: EMISSÕES DE GEE NO TRANSPORTE E PRODUÇÃO DE MUDAS.....	115
TABELA 16: EMISSÕES DE GEE NA APLICAÇÃO DE CORRETIVOS	116
TABELA 17: VEÍCULOS UTILIZADOS PARA TRANSPORTE DE INSUMOS AGRÍCOLAS E SEUS FATORES DE EMISSÃO DE GEE	117
TABELA 18: EMISSÕES DE GEE NO TRANSPORTE DE CORRETIVOS	117
TABELA 19: EMISSÕES DE GEE NO CULTIVO CONVENCIONAL	119
TABELA 20: EMISSÕES DE GEE NO PLANTIO MECÂNICO.....	120
TABELA 21: EMISSÕES DE GEE NAS OPERAÇÕES DE CULTIVO MÍNIMO.....	121
TABELA 22: EMISSÕES DE GEE NAS OPERAÇÕES EM SOQUEIRA.....	122
TABELA 23: EMISSÕES DE GEE DEVIDO AO USO DE FERTILIZANTES EM ÁREAS DE CANA DE ANO E MEIO E DE VINHAÇA.....	124
TABELA 24: EMISSÕES DE GEE NA APLICAÇÃO DE VINHAÇA COM CAMINHÕES-TANQUE E CONJUNTOS MOTOBOMBA	125
TABELA 25: EMISSÕES DE GEE NA APLICAÇÃO DE VINHAÇA POR MEIO DE CANAIS DE IRRIGAÇÃO.....	125
TABELA 26: EMISSÕES DE GEE NA APLICAÇÃO DE VINHAÇA COM CAMINHÕES-TANQUE.....	126
TABELA 27: EMISSÕES DE N ₂ O NA APLICAÇÃO DE VINHAÇA.....	126
TABELA 28: EMISSÕES DE GEE NA ADUBAÇÃO DE CANA DE ANO E MEIO EM ÁREA SEM VINHAÇA	127
TABELA 29: EMISSÕES DE GEE NA ADUBAÇÃO DE CANA DE ANO EM ÁREA SEM VINHAÇA	128
TABELA 30: CONTEÚDO DE N EM TORTA DE FILTRO.....	129
TABELA 31: EMISSÕES DE GEE NA APLICAÇÃO DE TORTA DE FILTRO NO PLANTIO.....	129
TABELA 32: EMISSÕES DE GEE NA ADUBAÇÃO DE SOQUEIRA EM ÁREA DE VINHAÇA COM CANA QUEIMADA.....	130
TABELA 33: EMISSÕES DE GEE NA ADUBAÇÃO DE SOQUEIRA EM ÁREA DE VINHAÇA COM CANA CRUA	131
TABELA 34: EMISSÕES DE GEE NA ADUBAÇÃO EM ÁREA SEM VINHAÇA COM CANA QUEIMADA	132
TABELA 35: EMISSÕES DE GEE NA ADUBAÇÃO EM ÁREA SEM VINHAÇA COM CANA CRUA	132
TABELA 36: EMISSÕES DE GEE NA ADUBAÇÃO COM TORTA DE FILTRO EM SOQUEIRA	133
TABELA 37: EMISSÕES DE GEE NO USO DE DEFENSIVOS AGRÍCOLAS	134
TABELA 38: EMISSÕES DE GEE DEVIDO À QUEIMA DO CANAVIAL ANTES DA COLHEITA	135
TABELA 39: EMISSÕES DE GEE DEVIDO À PALHA REMANESCENTE APÓS QUEIMA DO CANAVIAL.....	135
TABELA 40: EMISSÕES DE GEE DEVIDO À PALHA REMANESCENTE EM ÁREAS SEM QUEIMA DO CANAVIAL.....	136
TABELA 41: EMISSÕES DE GEE NO CARREGAMENTO DE CANA.....	137
TABELA 42: EMISSÕES DE GEE NA COLHEITA MECÂNICA	138
TABELA 43: EMISSÕES DE GEE NO TRANSPORTE DE CANA	139
TABELA 44: EMISSÕES DE GEE NO TRANSPORTE DE PRODUTOS QUÍMICOS PARA PRODUÇÃO DE ETANOL.....	141

TABELA 45: EMISSÕES DE GEE (KG CO ₂ EQ/HA) NAS ETAPAS PRODUTIVAS E ATIVIDADES AGRÍCOLAS E INDUSTRIAIS PARA PRODUÇÃO DE ETANOL	142
TABELA 46: EMISSÕES DE GEE NA PRODUÇÃO DE ETANOL – CENÁRIO COM MAIOR VOLUME DE EMISSÕES.....	150
TABELA 47: EMISSÕES DE GEE NA PRODUÇÃO DE ETANOL – CENÁRIO COM MENOR VOLUME DE EMISSÕES	152
TABELA 48: EMISSÕES DE GEE NA PRODUÇÃO DE ETANOL – CENÁRIO MAIS FREQUENTE.....	153
TABELA 49: EMISSÕES DE GEE NA PRODUÇÃO DE ETANOL – CENÁRIO MENOS FREQUENTE...	155
TABELA 50: CLASSIFICAÇÃO DOS CENÁRIOS TECNOLÓGICOS SEGUNDO SUAS EMISSÕES DE GEE	156

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ACV	- Avaliação do Ciclo de Vida
AR	- Açúcares Redutores
ART	- Açúcares Redutores Totais
CEMIG	- Companhia Energética de Minas Gerais
EPE	- Empresa de Pesquisa Energética
GEE	- Gases de Efeito Estufa
GWP	- Global Warming Potencial – Potencial de Aquecimento Global
FAO	- Food and Agriculture Organization
IAA	- Instituto do Açúcar e do Alcool
IBICT	- Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia
ISO	- International Standards Organization – Organização Internacional de Padrões
EEA	- European Environment Agency – Agencia Européia de Meio Ambiente
IGA	- Instituto de Geociências Aplicadas
IPCC	- Intergovernmental Panel on Climate Change – Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
IPT	- Instituto de Pesquisas Tecnológicas
MDL	- Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
NMVOC	- Non-Methane Volatile Organic Compounds – Compostos Orgânicos Voláteis que Não o Metano
MEG	- Monoetilenoglicol
MME	- Ministério de Minas e Energia
PROÁLCOOL	- Programa Nacional do Alcool
PPL	- Produção Primária Líquida
SETAC	- Society of Environmental Toxicology and Chemistry – Sociedade de Toxicologia e Química Ambiental

SIAMIG	- Sindicato da Indústria do Açúcar e do Alcool de Minas Gerais
UNEP	- United Nations Environmental Programme – Programa Ambiental das Nações Unidas
UNFCCC	- United Nations Framework Convention on Climate Change – Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima
USEPA	- United States Environmental Protection Agency – Agência de Proteção Ambiental de Estados Unidos

1 INTRODUÇÃO

A matriz energética mundial vem sofrendo importantes mudanças nas últimas décadas, principalmente devido à procura por fontes que possam substituir o petróleo, cujas reservas estão comprometidas em função do seu esgotamento e da crescente demanda por energia, sendo que as fontes renováveis vêm ganhando espaço entre as formas de energia mais tradicionais. Outro fator que influencia a reestruturação da matriz energética é a procura por formas de energia menos poluentes. Uma vez que as emissões de CO₂ decorrentes da utilização de combustíveis fósseis são a principal fonte antropogênica contribuinte para a intensificação do efeito estufa, existe crescente preocupação com as mudanças climáticas associadas. Nesse cenário, a introdução de biocombustíveis vem se consolidando como um importante fator para a atenuação dos problemas energéticos, de modo que se faça frente não só à necessidade de diminuir a dependência do petróleo como principal fonte de energia, mas também à necessidade de mitigar as mudanças climáticas associadas ao efeito estufa.

No Brasil, a energia produzida a partir da cana-de-açúcar experimenta atualmente um crescimento expressivo na matriz energética, principalmente devido ao consumo de bioetanol. Esse tipo de energia já é a segunda fonte primária de energia no país, perdendo apenas para o petróleo e derivados (EPE, 2008; MME, 2008). Face à importância atribuída aos biocombustíveis, incluindo o bioetanol de cana-de-açúcar, vários estudos nacionais e internacionais têm se ocupado em avaliar sua eficiência energética, assim como seu potencial mitigador de gases de efeito estufa (GEE). No entanto, embora seja comumente aceito que os impactos ambientais ocasionados pelo etanol, incluindo os impactos decorrentes da emissão de GEE, sejam quantificados aplicando a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), ainda não existe consenso com respeito à eficiência energética dos biocombustíveis e seu impacto líquido em GEE (LISKA & CASSMAN, 2008). As discrepâncias existentes se devem em parte a divergências entre as abordagens e suposições adotadas quando da aplicação da ACV. Diferenças tecnológicas existentes em diferentes regiões onde o etanol é produzido também afetam o resultado das avaliações (SOARES *et al.*, 2009). No Brasil, aspectos tais como a adubação orgânica e o uso de bagaço de cana para a geração de energia durante a etapa industrial contribuem significativamente para a eficiência energética e mitigação da emissão de GEE. Uma revisão de metodologias de quantificação de GEE rejeitadas pela UNFCCC, no

âmbito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL¹), indicam outros aspectos que afetam o resultado da quantificação de GEE ocasionados pelos biocombustíveis (UNFCCC, 2006a; UNFCCC, 2006b; UNFCCC, 2006c, UNFCCC, 2007; FERNADEZ, 2005):

- Falta de dados regionais;
- Consideração das emissões de GEE associados ao uso da terra;
- Cálculo adequado das emissões de transporte nas áreas de cultivo e emissões específicas ao tipo de cultivo;
- Ajuste dos dados devido à incerteza;
- Consideração adequada das emissões correspondentes a subprodutos.

Esses aspectos mostram a necessidade de mais estudos que possam reforçar as estimativas de emissão de GEE e eficiência energética dos biocombustíveis. As pesquisas em nível nacional estão elaboradas, principalmente, a partir de dados provenientes de destilarias localizadas no Estado de São Paulo. Esses estudos consideram um cenário tecnológico regional representativo do ciclo de vida do etanol. No entanto, tendo em vista que existem vários cenários tecnológicos ocorrendo atualmente para a produção desse biocombustível, principalmente na etapa de agricultura da cana-de-açúcar, o presente trabalho visa contribuir para a estimativa das emissões de GEE ocasionados durante as etapas de agricultura e industrialização, considerando e avaliando as diferenças existentes entre os distintos cenários tecnológicos presentes nessas etapas. O estudo está focado em destilarias da região do Estado de Minas Gerais.

¹ Um dos mecanismos contemplados no Protocolo de Kyoto, através do qual países desenvolvidos podem adquirir créditos de carbono provenientes de países em desenvolvimento (UNFCCC, 1998).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral da pesquisa é avaliar as emissões de gases de efeito estufa (GEE) que ocorrem nas etapas de agricultura e industrialização da cana-de-açúcar, considerando diferentes cenários tecnológicos, sendo praticados atualmente, para a produção de etanol em Minas Gerais.

2.2 Objetivos específicos

- Identificar as atividades agrícolas e industriais para produção de etanol atualmente praticadas em Minas Gerais;
- Realizar uma estimativa das emissões de GEE na agricultura e industrialização de cana-de-açúcar para produção de etanol, levando em conta diferentes atividades agrícolas e industriais atualmente praticadas em Minas Gerais;
- Avaliar diferenças na emissão de GEE decorrentes de diferentes cenários tecnológicos para produção de etanol;
- Determinar e avaliar a contribuição de cada fonte ao total de emissões de GEE.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 *Considerações sobre o clima: equilíbrio da temperatura na Terra*

O equilíbrio climático do planeta é determinado pela igualdade entre a quantidade de energia solar que entra na Terra e a quantidade de energia que esta emite ao espaço. Considerando somente a energia solar incidente, 30% desta é refletida de volta ao espaço graças ao albedo² do planeta, 20% é absorvida pela atmosfera e 50% pela superfície terrestre. A mesma quantidade de energia absorvida (70%), no equilíbrio, é emitida pela Terra ao espaço, de modo que 60% é irradiada pela atmosfera e 10% pela superfície terrestre (FIG. 1). Nessas condições, na atmosfera, a temperatura de equilíbrio é, em média, -18°C; já na superfície terrestre esta temperatura é da ordem de 15°C. A temperatura amena na superfície terrestre se deve à presença de gases (tais como H₂O e CO₂), na atmosfera, que absorvem a energia emitida pela superfície. Nesse sentido, uma quantidade equivalente a 115% da energia solar incidente é emitida pela superfície terrestre, dos quais 10% é irradiada ao espaço, e o restante (105%) é absorvido pelos gases. Da quantidade de energia absorvida por esses gases, 95% é retro-dispersada à superfície terrestre, de forma que esta acaba recebendo mais energia do que aquela que emite, resultando numa temperatura de equilíbrio maior (15°C) que a que ocorre na atmosfera. Esse fenômeno natural é o efeito estufa, necessário para a existência de um clima ameno na superfície terrestre. Não fosse pelos gases de efeito estufa presentes na atmosfera, a temperatura na superfície seria de aproximadamente -18°C (BAIRD, 2002; MELO, 1998).

As atividades humanas têm contribuído para o aumento da quantidade de gases de efeito estufa³ (GEE) na atmosfera, resultando na intensificação desse efeito e a consequente elevação da temperatura na superfície terrestre. Dentre os GEE, o CO₂ antropogênico é considerado o de maior relevância, suas emissões se devem principalmente à utilização de combustíveis de origem fóssil (FIG. 2). Assim mesmo, as atividades humanas relacionadas ao fornecimento de energia são as que mais têm contribuído à emissão de GEE (FIG. 2).

² Fração de radiação solar refletida por uma superfície ou objeto, frequentemente expressada em termos percentuais. O albedo dos solos pode adotar valores altos, como nas superfícies cobertas de neve, ou baixos, como nas superfícies cobertas de vegetação e os oceanos. O albedo da Terra varia principalmente em função das nuvens, da neve, do gelo, da superfície foliar e da cobertura do solo (IPCC, 2007).

³ O vapor de água (H₂O), o dióxido de carbono (CO₂), o óxido nitroso (N₂O), o metano (CH₄) e o ozônio (O₃) são os GEE primários da atmosfera terrestre (IPCC, 2007). Existem outros GEE inteiramente antropogênicos, dos quais (além do CO₂, CH₄, e N₂O) somente o hexafluoreto de enxofre (SF₆), os hidrofluorocarbonetos (HFC) e os perfluorocarbonetos (PFC) são controlados pelo Protocolo de Kyoto (UNFCCC, 1998).

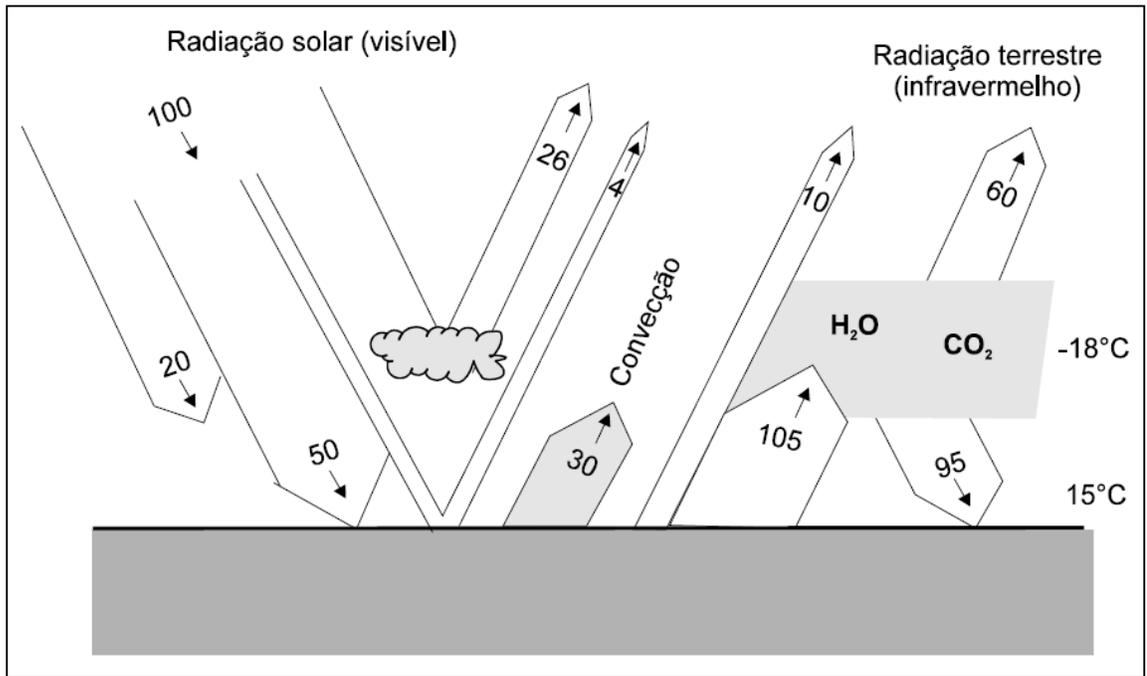


Figura 1: Balanço de energia na atmosfera e na superfície terrestre

Fonte: Melo, 1998.

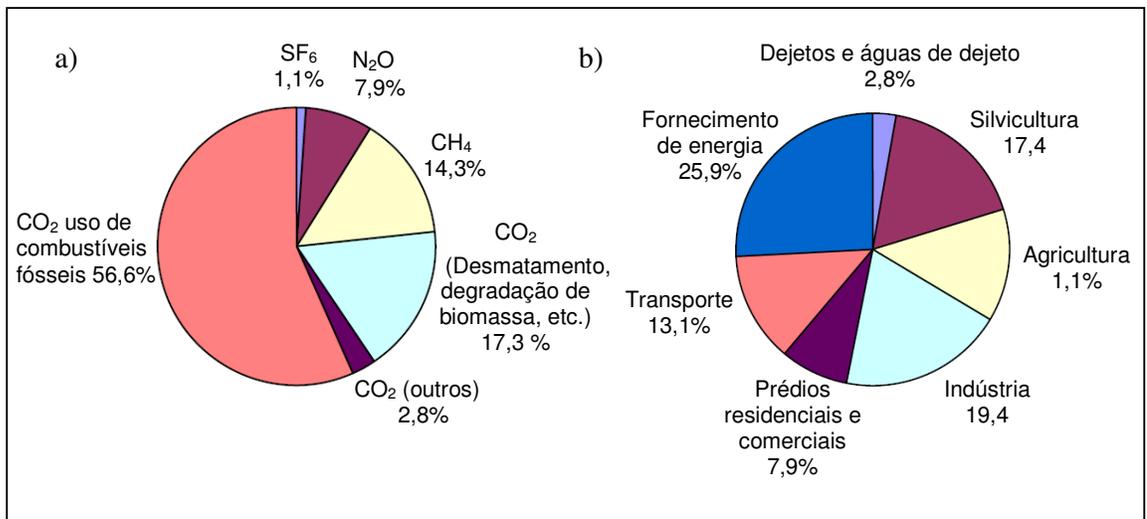


Figura 2: a) Proporção de diferentes GEE antropogênicos com respeito às emissões totais
b) Contribuição de diferentes setores às emissões totais de GEE

FONTE: IPCC, 2007.

3.2 Emissão de gases de efeito estufa na agricultura

Os principais GEE decorrentes de atividades agrícolas são CO₂, CH₄ e N₂O. Os fluxos de CO₂ ocorrem, em sua maior parte, na captura realizada durante a fotossíntese das plantas e na liberação via respiração, assim como na decomposição e combustão de matéria orgânica. A emissão de N₂O ocorre principalmente como subproduto dos processos de nitrificação e

desnitrificação. Já a emissão de CH₄ ocorre principalmente em processos anaeróbicos no solo, estocagem de estrume, fermentação entérica⁴ e durante a combustão incompleta de matéria orgânica. Os fluxos de GEE em sistemas agrícolas podem ser classificados de acordo com os componentes do ecossistema (IPCC, 2006): biomassa, matéria orgânica morta, solos e gado e animais domésticos (*livestock*).

3.2.1 Biomassa

O meio mais importante de remoção de CO₂ da atmosfera em sistemas agrícolas é a biomassa das plantas, onde ocorre captura de carbono mediante a fotossíntese, sendo que aproximadamente a metade do CO₂ capturado é depois liberado na respiração, resultando em um estoque de carbono, na biomassa, denominado Produção Primária Líquida (PPL). A captura e liberação de carbono pelas plantas é influenciada por atividades antropogênicas tais como o desmatamento, reflorestamento, fertilização, irrigação, colheita e escolha de espécies. Em culturas não florestais (tais como a cana-de-açúcar), a biomassa se renova anualmente ou em poucos anos, pelo qual os estoques líquidos de carbono da biomassa podem permanecer aproximadamente constantes, com diminuição em caso de degradação da terra. A queima de biomassa em sistemas agrícolas, além de retornar CO₂ à atmosfera, emite CH₄, N₂O, NMVOC (Compostos Orgânicos Voláteis que Não o Metano), NO_x (óxidos de nitrogênio) e CO (monóxido de carbono). Os gases NMVOC, NO_x e CO são precursores para a formação de GEE, pelo qual a formação de GEE a partir deles é considerada emissão indireta.

3.2.2 Matéria orgânica morta

A matéria orgânica morta presente nos sistemas agrícolas pode eventualmente se decompor de forma rápida, retornando CO₂ à atmosfera, ou pode permanecer sem se decompor por meses até décadas. O IPCC (2006) faz distinção entre matéria orgânica morta (madeira morta, galhos, raízes mortas, etc. com diâmetro superior a 2 mm) e matéria orgânica do solo (diâmetro menor a 2 mm). As atividades agrícolas podem influenciar os fluxos de carbono relacionados à matéria orgânica morta, por exemplo, aumentando os *inputs* de detritos frescos e por meio da queima.

⁴ O IPCC (2006) inclui a estocagem de estrume e a fermentação entérica na categoria de Reflorestamento, Florestação e Outros Usos da Terra, na qual os sistemas de agricultura estão inseridos.

3.2.3 Solos

Parte da matéria orgânica do solo pode se decompor rapidamente, retornando carbono à atmosfera. No entanto, parte da matéria orgânica pode formar complexos orgânico-minerais, os quais se decompõem de forma mais lenta, podendo permanecer no solo por décadas até séculos. Se essa biomassa for submetida a queima, pequenas quantidades do chamado carvão negro (*black carbon*) são produzidas, contendo uma fração de carbono quase inerte, a qual pode permanecer no solo por inclusive um milênio ou mais (IPCC, 2006. ODUM, 1977). As atividades agrícolas podem afetar os fluxos de carbono associados à matéria orgânica do solo, por exemplo, mediante a retenção de biomassa e intensidade de cultivo. Desta forma a adição de cal e fertilizantes nitrogenados sintéticos e/ou orgânicos no solo resultam em emissões importantes de GEE. No primeiro caso, o carbonato de cálcio retirado dos depósitos de calcário na crosta terrestre evolui em CO₂ após sua aplicação no solo. A adição de nitrogênio no solo, por meio de fertilizantes, intensifica os processos de nitrificação e desnitrificação liberando, como subproduto, N₂O à atmosfera. A adição de estrume e a urina de animais pode provocar o mesmo efeito. Em solos induzidos a decomposição elevada da matéria orgânica seguida de adição de fontes de nitrogênio, como no caso de iniciação de cultivo em solos alagados, florestas e pastagens, intensifica as emissões de N₂O. Em solos alagados, grande parte da matéria orgânica morta em decomposição e da matéria orgânica do solo retorna à atmosfera como CH₄.

3.2.4 Gado e animais domésticos (*livestock*)

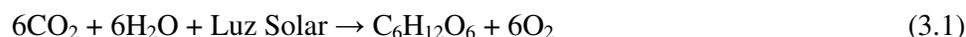
O gado e animais domésticos presentes no sistema agrícolas podem ser uma importante fonte de GEE, especialmente no caso de animais ruminantes. A fermentação entérica que ocorre durante o processo de digestão nesses animais produz e emite CH₄. Além disso o manejo e estocagem de estrume influencia as emissões de CH₄, N₂O (emissões diretas) e volatilização de NH₃ e NO_x (emissões indiretas) decorrentes dessa fonte.

3.3 Mitigação de gases de efeito estufa pelo uso de bioetanol

Como visto anteriormente, a principal fonte antropogênica de emissão de GEE no mundo é a liberação de CO₂ pelo uso de combustíveis de origem fóssil. Essas emissões podem ser mitigadas, em parte, mediante o uso de biocombustíveis, entre eles o bioetanol.

O potencial mitigador das emissões de CO₂ de origem fóssil pelo uso do bioetanol radica no fato de que a utilização energética desse biocombustível restitui a energia solar armazenada pelo vegetal de origem, consumindo oxigênio atmosférico e restituindo ao ar o CO₂ que foi capturado mediante a fotossíntese. O carbono também é restituído ao ar, embora em menor proporção, na forma de CO, hidrocarbonetos, ou CH₄. Dessa forma, as emissões de carbono decorrentes do uso do bioetanol são compensadas (embora não à mesma taxa) pela captura ou sequestro de CO₂ durante o crescimento das plantas (KADAM, 2002).

Através da fotossíntese, as plantas captam energia solar e a armazenam na forma de energia química, de acordo com a equação:



A energia armazenada nas plantas pode ser diretamente utilizada, por exemplo, através da queima de lenha, ou depois de sua conversão energética mediante processos que, segundo Nogueira e Lora (2000), classificam-se em: físicos, termo-químicos e biológicos. Dentre os processos de conversão biológicos está a fermentação, através da qual o bioetanol é produzido.

3.3.1 Tecnologias para a produção de bioetanol

O bioetanol ou etanol, comercialmente conhecido como álcool, é basicamente obtido a partir da fermentação de uma solução açucarada fermentável, a qual pode ser realizada por meio de três rotas diferentes (IPT *apud* ESTEVES, 1996): utilizando matérias-primas doces, ou sacarinas (como a cana-de-açúcar, beterraba açucareira e sorgo sacarino), matérias-primas amiláceas (como o milho, a mandioca e o trigo) e matérias-primas celulósicas (como o bagaço de cana-de-açúcar). No caso das matérias-primas doces, estas são diretamente fermentáveis, à diferença das matérias primas amiláceas, cujo amido deve ser previamente convertido em açúcares, antes da fermentação. Já no caso das matérias primas celulósicas, seus polímeros devem ser previamente hidrolisados para assim produzir uma solução fermentável de açúcares. O bioetanol é normalmente produzido, de forma comercial, a partir de matérias-primas doces e amiláceas. Já a produção a partir de materiais celulósicos ainda está em desenvolvimento, sendo por enquanto comercialmente inviável embora o custo da matéria prima seja baixo (BNDES, 2008a). A FIG. 3, a seguir, ilustra as três rotas tecnológicas para a produção do bioetanol.

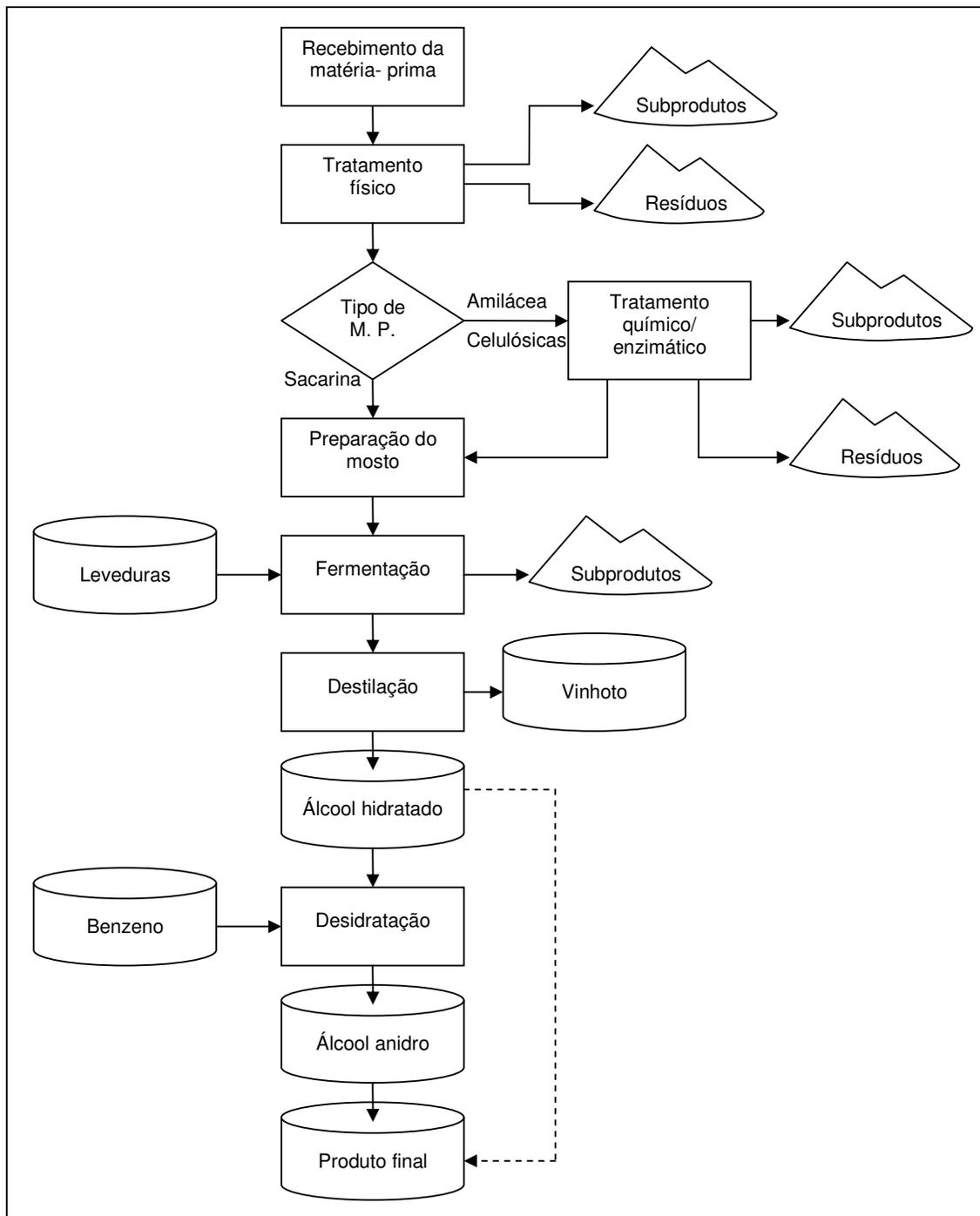


Figura 3: Rotas tecnológicas para a produção de bioetanol

Fonte: IPT *apud* ESTEVES, 1996.

Dentre os materiais utilizados para a produção de etanol no mundo, atualmente predominam as matérias-primas amiláceas (53% do total). Os principais produtores (incluindo outras matérias-primas) são os Estados Unidos (etanol a base de milho) e o Brasil (etanol a base de cana-de-açúcar), que contribuem com mais de 70% na oferta mundial de etanol (FIG. 4).

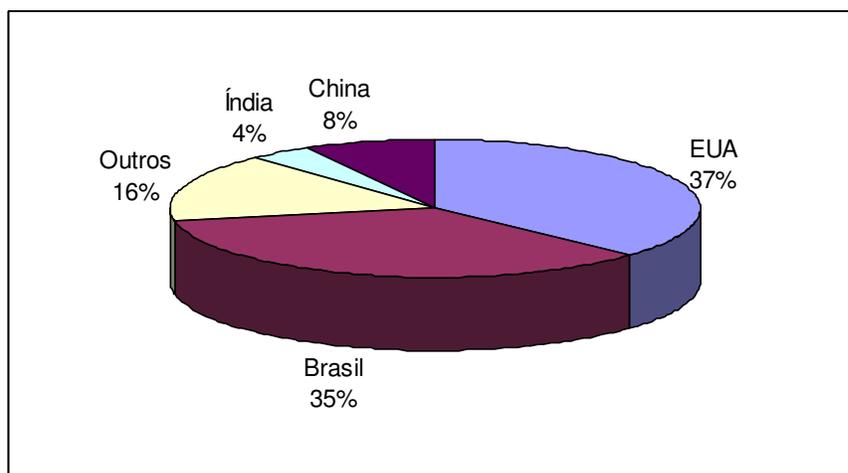


Figura 4: Distribuição da produção mundial de etanol

Fonte: BNDES, 2008.

3.3.2 Produção e consumo no Brasil

As experiências brasileiras com etanol combustível datam desde 1925, sendo que em 1933 tornou-se obrigatória a mistura de etanol na gasolina (MORAES, 2008). No mesmo ano foi criado o Instituto do Açúcar e do Alcool – IAA, o qual promoveu a produção de álcool anidro, entre outros. No entanto, a produção e uso de álcool em larga escala ocorreu a partir de 1975, fase que se caracteriza por quatro períodos marcantes (SIMÕES, 2008): (1) de 1975 a 1979, período em que, depois da crise de 1973, procurou-se amenizar a dependência da importação de petróleo com o lançamento do Programa Nacional do Alcool (Proálcool) (1975), que promoveu o envolvimento da indústria automotiva para produção de carros com motores a álcool e, mais tarde, a produção em larga escala de álcool hidratado para uso em veículos movidos exclusivamente com esse combustível; (2) de 1979 a 1989, período que se caracteriza por incentivos fiscais e financeiros a produtores e consumidores, mas que termina com crise de abastecimento e queda nas vendas; (3) de 1989 a 2000, quando ocorre desestruturação de incentivos econômicos, desregulamentação do sistema de abastecimento de combustíveis e transferência, à iniciativa privada, do planejamento e execução das atividades de produção e comercialização no setor. Em 1993 o governo fez obrigatória a mistura de álcool na gasolina, sendo que o percentual pode variar entre 20% e 25%; (4) de 2000 até a atualidade, período marcado pela adequação da oferta à demanda de mercado, pelo lançamento dos automóveis *flex-fuel*⁵ (2003), pela possibilidade de exportação do etanol e

⁵ Carros cujo motor permite qualquer mistura de álcool hidratado e gasolina, ou seja, desde 100% de álcool até 100% de gasolina (SIMÕES, 2008).

pela expansão e modernização tecnológica do setor. A FIG. 5, a seguir, mostra a evolução da produção de álcool no Brasil, desde o início do Proálcool.

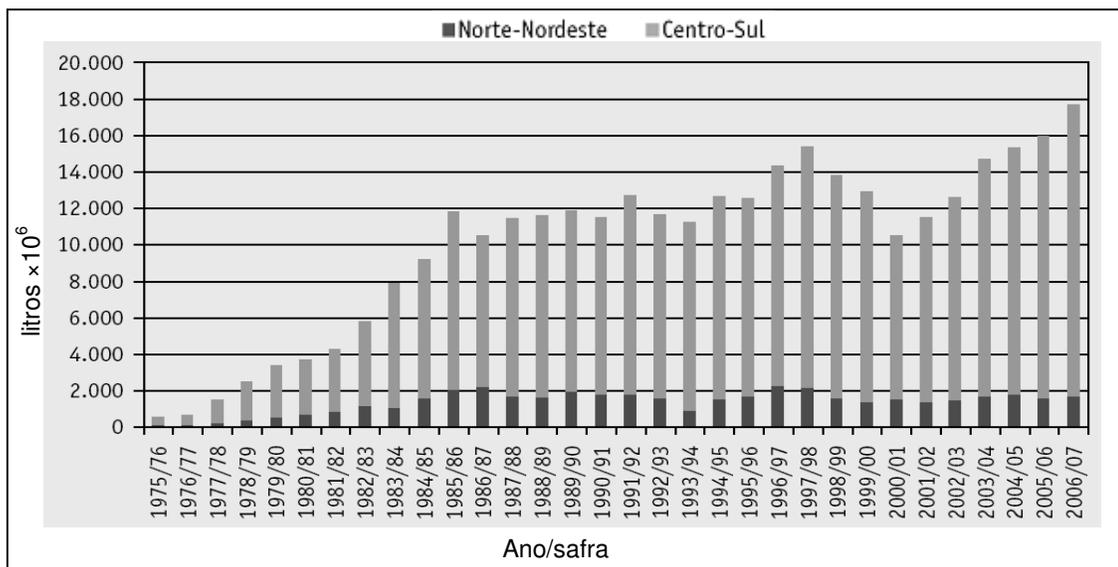


Figura 5: Evolução da produção de álcool no Brasil

Fonte: Adaptado de Moraes, 2008.

Em 2007, o consumo de bioetanol de cana-de-açúcar foi o fator principal para colocar a cana como segunda fonte primária de energia do país, perdendo apenas para o petróleo e derivados, como mostra a TAB 1 a seguir.

Tabela 1 – Participação (%) das fontes primárias de energia no Brasil

	2007	2006
Energia não renovável	53,6	55,1
Petróleo e derivados	36,7	37,8
Gás natural	9,3	9,6
Carvão mineral e derivados	6,2	6,0
Urânio (U ₃ O ₈) e derivados	1,4	1,6
Energia renovável	46,4	44,9
Energia hidráulica e eletricidade	14,7	14,8
Lenha e carvão vegetal	12,5	12,7
Produtos da cana-de-açúcar	16,0	14,5
Outras renováveis	3,1	2,9

Fonte: Empresa de Pesquisa Energética – EPE, 2008.

3.3.3 Produtividade, eficiência energética e emissões evitadas de gases de efeito estufa

O bioetanol pode ser avaliado levando em conta sua produtividade, eficiência energética e emissões evitadas de GEE. Com respeito à produtividade, pode-se observar que o bioetanol de

cana-de-açúcar tem maior rendimento por unidade de área (L/ha) em comparação ao bioetanol das outras matérias primas relacionadas na FIG. 6, sendo este ainda maior caso os resíduos celulósicos da cana-de-açúcar (bagaço e palhiço) sejam utilizados para sua produção.

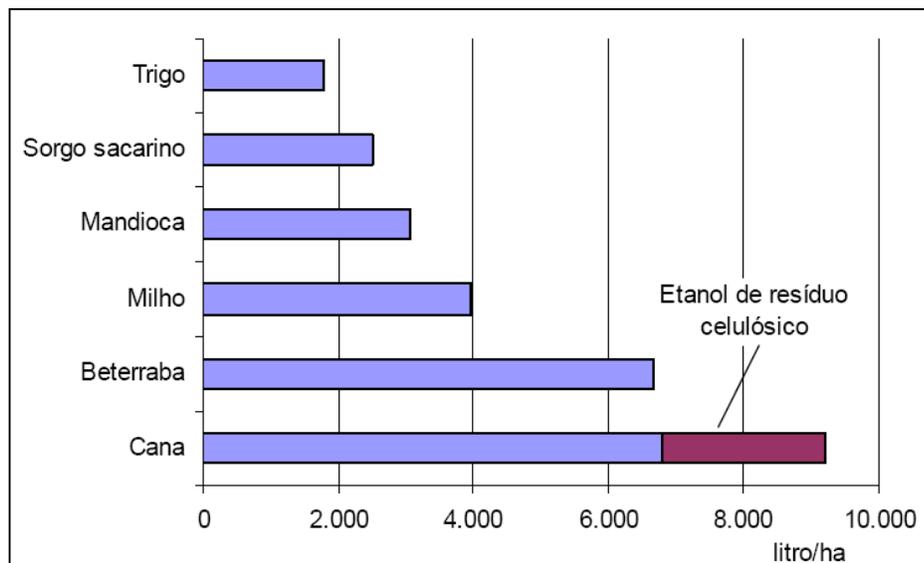


Figura 6: Produtividade do bioetanol produzido a partir de diversas matérias primas
Fonte: BNDES, 2008b.

Quanto à eficiência energética, que pode ser expressa como a relação entre a energia renovável produzida e a energia não-renovável necessária para produzir o biocombustível, considerando seu ciclo de vida, o bioetanol de cana-de-açúcar – com índice igual a 9,3 – mostra-se superior ao produzido a partir de outras matérias primas (BNDES, 2008a.). Outros autores têm mostrado maiores eficiências energéticas para o bioetanol de cana, entre eles pode-se citar: Macedo *et al.* (2004), que mostraram uma eficiência de 10,2 para o melhor cenário tecnológico atual, Soares *et al.* (2009), que estimaram a eficiência energética em 9,35 e Seabra (2008), que determinou a eficiência em 9,4, com previsão de aumento para um índice maior que 12,0 no ano 2020, em função do melhor aproveitamento futuro da biomassa residual da cana.

As emissões evitadas de GEE pelo uso de bioetanol se referem à quantidade de GEE que deixa de ser emitida pelo uso desse biocombustível, tomando como base as emissões do ciclo de vida da gasolina. Nesse aspecto, da mesma forma que na produtividade e na eficiência energética, o bioetanol de cana-de-açúcar também é superior àquele produzido a partir de outras matérias-primas. Igualmente, o aproveitamento de resíduos celulósicos da cana para produção de etanol também possui um grande potencial de mitigação de GEE. A TAB. 2

mostra a eficiência energética e emissões evitadas associadas ao etanol produzido a partir de diferentes matérias primas. As emissões evitadas de GEE estão expressas como uma fração (%) do total de emissões decorrentes da produção e uso do combustível substituído (gasolina). Graças às emissões de GEE correspondentes à produção e uso do etanol, as quais são menores em comparação às correspondentes emissões da gasolina, evitam-se emissões que ocorreriam caso o etanol não fosse utilizado. As emissões evitadas pelo uso de etanol produzido a partir de resíduos celulósicos é uma estimativa teórica, lembrando que essa tecnologia está ainda em desenvolvimento.

Tabela 2 – Eficiência energética e emissões evitadas de gases de efeito estufa pelo uso de etanol

Matéria-prima	Eficiência energética	Emissões evitadas
Cana-de-açúcar	9,3	89%
Milho	0,6 – 2,0	30% – 38%
Trigo	0,97 – 1,11	19% – 47%
Beterraba	1,2 – 1,8	35% – 56%
Mandioca	1,6 – 1,7	63%
Resíduos celulósicos	8,3 – 8,4	66% – 73%

Fonte: BNDES, 2008.

Pode-se observar que os biocombustíveis, em especial aqueles obtidos a partir da cana-de-açúcar e resíduos celulósicos, possuem um considerável efeito mitigador das emissões de GEE. No entanto, existem controvérsias quanto à eficiência energética e real potencial mitigador dos biocombustíveis (LISKA & CASSMAN, 2008; GNANSOUNOU *et al.*, 2008). Como explicado anteriormente, embora haja consenso em que a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) seja a metodologia adequada para fazer o balanço de GEE dos biocombustíveis, as discrepâncias entre abordagens e suposições adotadas levam a diferentes resultados quanto ao potencial mitigador.

Tendo em vista a importância da aplicação da ACV na estimativa das emissões de GEE decorrentes do ciclo de vida dos biocombustíveis, a seguir são apresentadas as características dessa metodologia e algumas implicações na quantificação das emissões de GEE associadas aos biocombustíveis.

3.4 Avaliação do Ciclo de Vida

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), é uma metodologia quantitativa de avaliação ambiental, que consiste basicamente em determinar, quantificar e avaliar as cargas ambientais

de todos os *inputs* (materiais e energia) e *outputs* (emissões no ar, solo e água) associadas ao ciclo de vida de um produto ou processo (FIG. 7). Ou seja, essa metodologia avalia as cargas ambientais associadas aos insumos e emissões que ocorrem durante a aquisição de matérias primas, uso/reúso/manutenção, reciclagem e disposição final, relacionados ao produto, processo ou atividade objeto da avaliação. A SETAC, precursora da introdução do conceito de ACV, define essa metodologia da seguinte maneira (GRAEDEL, 1998):

A Avaliação do Ciclo de Vida é um processo objetivo para avaliar as cargas ambientais associadas a um produto, processo, ou atividade identificando e quantificando o uso de energia e materiais e emissões ambientais, para avaliar o impacto desses usos de energia e materiais e emissões no meio ambiente, e para avaliar e implementar oportunidades para efetuar melhoramentos ambientais. A avaliação inclui o ciclo de vida inteiro do produto, processo ou atividade, envolvendo extração e processamento de matérias-primas; manufatura, transporte e distribuição; uso/reuso/manutenção; reciclagem; e disposição final⁶.

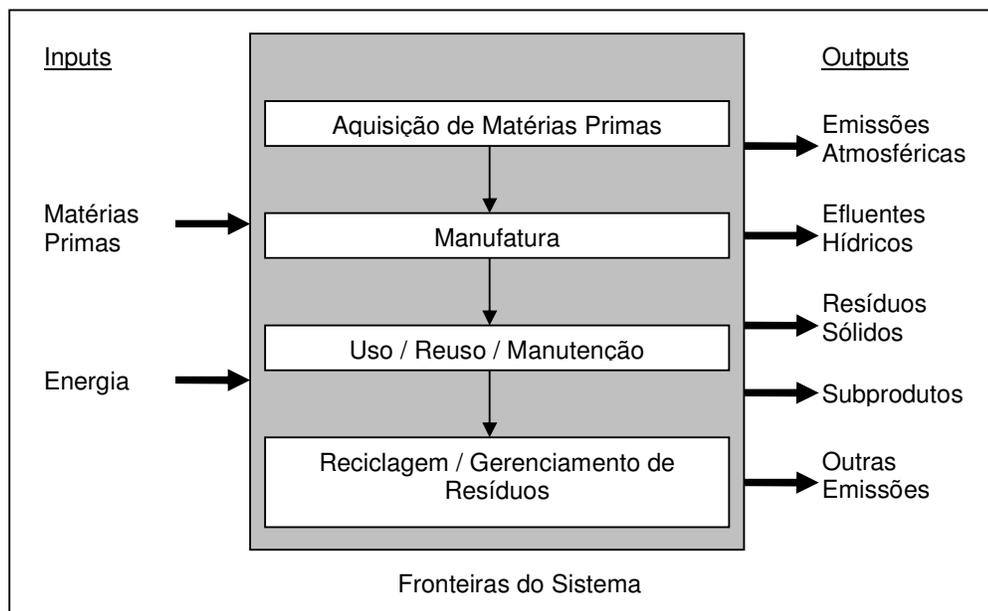


Figura 7: Etapas do Ciclo de Vida

Fonte: USEPA, 2006.

Mediante a ACV, os tomadores de decisão possuem uma visão mais ampla das cargas ambientais relacionadas ao produto ou processo em questão, a qual permite a seleção do produto/processo menos poluente. Um dos principais benefícios da ACV é que esta permite identificar cargas ambientais a montante e jusante do processo de produção que não seriam facilmente observáveis caso não fosse realizada a avaliação. Por exemplo, a substituição de

⁶ Tradução do autor

um processo por outro, considerado menos poluente, pode não levar em conta as cargas ambientais ligadas à produção dos insumos necessários para a operação de ambos os processos. Assim mesmo, pode não levar em conta os impactos ambientais relacionados aos subprodutos e seu destino final. Estes aspectos podem ser analisados pela aplicação de uma adequada ACV de ambos os processos.

Além da visão mais ampla dos impactos ambientais relacionados ao produto/processo, a ACV permite (USEPA, 2006):

- Desenvolver uma avaliação sistemática das conseqüências ambientais associadas a um dado produto;
- Analisar as implicações associadas a um ou mais produtos/processos, para ajudar a ganhar aceitação por parte do público (Estado, comunidade, etc.) para uma ação planejada;
- Quantificar emissões ambientais no ar, água e solo em relação a cada etapa do ciclo de vida ou estágio mais poluente;
- Prestar assistência na identificação de transferências significativas de impactos ambientais entre estágios do ciclo de vida e meio ambiental;
- Avaliar os efeitos humanos e ecológicos do consumo de materiais e emissões ambientais na comunidade local, região e planeta;
- Comparar os impactos na saúde e ecológicos entre dois ou mais produtos/processos concorrentes ou identificar os impactos de um produto ou processo específico;
- Identificar impactos em uma ou mais áreas ambientais de interesse específicas.

Apesar dos benefícios da aplicação da ACV, esta possui suas limitações. Por exemplo, uma avaliação elaborada em detalhe pode demandar muito tempo e recursos necessários. Além disso, a ACV depende fortemente da disponibilidade de dados e muitas vezes será necessária a estimação ou suposição dos mesmos. Outra das limitações consiste em que a ACV avalia somente aspectos ambientais e não aspectos tais como custo, qualidade e desempenho ao longo do ciclo de vida. Portanto, a decisão final a respeito da escolha de dado produto/processo, com base nesses fatores, dependerá de ferramentas adicionais. Uma outra limitação da ACV é o fato de que a associação entre impactos de categorias ambientais diferentes (a ACV avalia impactos de acordo com categorias ambientais predefinidas) para a obtenção de um único indicador deve ser feito com base em julgamentos de caráter subjetivo,

portanto, a obtenção dos indicadores finais de impacto deverá ser realizada com base, por exemplo, na discussão de um painel de especialistas. No entanto, este obstáculo pode ser superado focando o estudo em uma única categoria ambiental, tal como o Aquecimento Global. Neste último caso, o impacto ocasionado pelos biocombustíveis poderia ser avaliado levando em consideração unicamente o balanço de GEE.

3.4.1 Estrutura metodológica da Avaliação do Ciclo de Vida

A metodologia de avaliação do ciclo de vida possui etapas reconhecidas internacionalmente, embora não estejam ainda normalizadas. Atualmente não existe um consenso quanto às melhores práticas, especialmente na etapa final de avaliação do impacto ambiental. A metodologia possui quatro fases (USEPA, 2006, GRAEDEL, 1998, ISO *apud* EEA, 1997) (FIG. 8):

- Definição do objetivo e escopo;
- Análise de inventário;
- Avaliação de impacto;
- Interpretação.

3.4.1.1 Definição do objetivo e escopo

Nesta etapa levantam-se as questões a serem respondidas pela ACV e a abrangência do estudo que será realizado para responder essas questões. Segundo a USEPA (2006), nesta etapa devem ser definidos os objetivos do estudo, o tipo de informação necessária, a especificidade requerida, a forma de organização e apresentação dos dados, o escopo do estudo e as regras básicas para a realização do trabalho.

No caso dos biocombustíveis, os objetivos da ACV podem estar voltados ao desenvolvimento de novos produtos, melhoramentos no processo, comparação entre várias alternativas tecnológicas ou a avaliações voltadas a políticas de ação. Dependendo dos objetivos, a ACV deverá ser mais ou menos detalhada. Por exemplo, no caso de uma ACV voltada a políticas de ação, a avaliação poderá ser simplificada (GNANSOUNOU *et al.*, 2008).

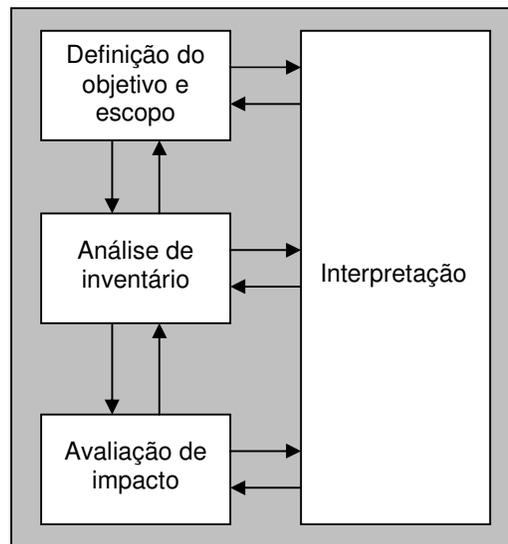


Figura 8: Estrutura metodológica da Avaliação do Ciclo de Vida

Fonte: Adaptado de ISO *apud* EEA, 2006.

A quantificação dos dados ambientais na ACV é expressa em termos de uma unidade funcional. O estabelecimento da unidade funcional permite a comparação equivalente entre dois ou mais produtos/processos diferentes. Por exemplo, para mensurar e comparar as cargas ambientais que ocorrem entre dois tipos de transporte diferentes, seria conveniente que a unidade funcional esteja expressa em termos de certa quantidade de peso transportado e distância percorrida para ambos os tipos de transporte. A partir desta unidade funcional, será possível mensurar e comparar as cargas e impactos ambientais de forma equivalente, independentemente da natureza e particularidade de cada tipo de transporte. Para casos em que o objetivo da ACV seja a comparação entre dois ou mais tipos de combustível, normalmente as cargas ambientais devem ser avaliadas em termos de um mega-joule de energia proporcionado pelo combustível no tanque (1 MJ) ou em termos de um litro de combustível (GNANSOUNOU *et al.*, 2008).

Na definição do escopo do estudo deve-se decidir quais etapas e subetapas do ciclo de vida do produto/processo serão incluídas na ACV e quais serão suas fronteiras. Segundo a USEPA (2006) esta decisão depende do objetivo do estudo, da precisão requerida para os resultados e do tempo e recursos disponíveis.

Geralmente os estudos de ACV para combustíveis (incluindo os biocombustíveis) incluem as etapas compreendidas desde a extração de matérias primas até o momento em que o veículo é abastecido (abordagem *Well-to-Tank* – WtT, ou “do poço ao tanque”) ou até o consumo do

combustível (abordagem *Well-to-Wheel* – WtW, ou “do poço à roda”). No entanto, sempre dependendo dos objetivos perseguidos, podem-se adotar outras abordagens, como por exemplo a consideração do ciclo compreendido entre o abastecimento e o consumo (*Tank-to-Wheel* – TtW, ou “do tanque à roda”) (GNANSOUNOU *et al.*, 2008).

3.4.1.2 Análise de inventário

O inventário do ciclo de vida é o processo de quantificar os *inputs* e *outputs* do sistema avaliado, isto é, quantificar os requerimentos de matérias-primas e energia, emissões atmosféricas, emissões via aquosa, resíduos sólidos e outras emissões em todo o ciclo de vida de um produto, processo ou atividade (USEPA, 2006). O resultado é uma lista de poluentes liberados ao meio ambiente e a quantidade de energia e materiais consumidos. Esta lista pode ser organizada de acordo com cada etapa do ciclo de vida, o meio (ar, água e solo), processos específicos ou qualquer combinação destes.

Uma importante decisão a ser tomada durante a coleta de dados é a escolha de algum método de alocação das cargas ambientais do(s) processo(s) unitário(s) entre os produtos e/ou subprodutos do(s) mesmo(s) (USEPA, 2006; EEA, 1997), já que resulta difícil quantificar as cargas associadas a cada produto/subproduto individualmente. Desta forma deve ser escolhido um método de alocação de cargas ambientais entre subprodutos quando um deles é um resíduo que pode ser oferecido comercialmente para outros usos. A ISO (*apud* USEPA, 2006) fornece procedimentos para a escolha do método de alocação, indicando que esta deve ser evitada, quando possível, (1) dividindo o processo unitário em questão em dois ou mais subprocessos para posteriormente coletar os *inputs* e *outputs* associados a tais subprocessos e/ou (2) expandindo as fronteiras do sistema de modo a incluir funções adicionais relacionadas aos produtos/subprodutos, com suas respectivas unidades funcionais e diagramas de fluxo. Caso o procedimento anterior não seja possível, a recomendação é alocar os *inputs* e *outputs* do sistema de acordo com relações físicas entre os produtos/subprodutos do mesmo, o qual não necessariamente significa estabelecer relações proporcionais simples. Finalmente, caso os procedimentos anteriores não sejam possíveis, a recomendação é alocar as cargas ambientais entre os produtos/subprodutos em proporção, por exemplo, ao valor econômico dos mesmos. Segundo Gnansounou *et al.* (2008), a escolha do método de alocação e suas implicações é uma das *debilidades* da ACV para biocombustíveis, particularmente quando subprodutos estão envolvidos no estudo.

3.4.1.3 Avaliação de impacto

Segundo a EEA (1997), na avaliação de impacto devem-se definir as categorias de impacto ambiental a serem consideradas no estudo, as quais servirão de base para a classificação, caracterização e avaliação dos *inputs* e *outputs* quantificados durante a análise de inventário.

Quanto à definição de categorias de impacto, as seguintes são comumente usadas em estudos de ACV (USEPA, 2006): aquecimento global; degradação da camada de ozônio; acidificação; eutrofização; smog fotoquímico; toxicidade terrestre; toxicidade aquática; saúde humana; depleção de recursos; uso da terra; e uso da água. Outras categorias podem ser consideradas, dependendo dos objetivos da ACV.

3.4.1.4 Interpretação

A interpretação do ciclo de vida é um processo sistemático para identificar, qualificar, verificar e avaliar a informação procedente da análise de inventário e/ou avaliação de impacto, de modo a apresentar essas informações atendendo os requerimentos especificados no objetivo e escopo do estudo (ISO *apud* USEPA, 2006; IBICT, s.d.). Dessa forma, a fase de interpretação poderá focar a avaliação nos aspectos ambientais significantes, verificar a completude, sensibilidade e consistência dos dados, assim como ressaltar os aspectos relevantes do estudo, os resultados principais e as limitações mais importantes.

3.5 Agricultura da cana-de-açúcar

Originária do Sudeste da Ásia, a cana-de-açúcar é uma gramínea semiperene, pertencente ao gênero *Saccharum* que se desenvolve preferentemente em regiões quentes. A exploração da sua cultura é antiga, sendo que a procura por melhoramentos tecnológicos e varietais continua até os dias de hoje. Os múltiplos usos da cana-de-açúcar conferem grande importância à sua cultura. Na pecuária ela pode ser utilizada como forragem para a alimentação de animais, já na indústria ela serve de matéria prima para a fabricação de vários produtos: açúcar, álcool, cachaça, melado e rapadura, entre outros. Consta-se portanto que a indústria da cana-de-açúcar gera vários subprodutos com importante valor econômico.

No Brasil, a cultura do açúcar consolidou-se desde a época colonial, sendo que os primeiros engenhos foram constituídos nos Estados de Pernambuco e Alagoas, até o século 20. A produção do café e a abolição da escravidão contribuíram para o declínio da cultura da cana

no Brasil, recuperando-se na década de 30 com a criação do IAA e, mais tarde, do Proálcool (BARBOSA *et al.*, 2007). Com o fim do Proálcool, atrelado à desregulamentação do setor no final da década de 80 e início dos anos 90, o setor sucroalcooleiro no país passou por uma fase crítica de estagnação por ocasião da sua adequação à economia de mercado. Só em Minas Gerais, quase 50% das unidades produtoras encerraram suas atividades (CAMPOS FILHO & SANTOS, 2007). Já superada essa etapa crítica, a indústria sucroalcooleira experimenta um processo de expansão sem precedentes, intensificada pela demanda crescente de álcool combustível no país assim como pelo grande interesse internacional pelos biocombustíveis. Hoje, com mais de sete milhões de hectares plantados e uma produção acima de 600 milhões de toneladas em 2010 (CONAB, 2011), o Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar, açúcar e álcool de cana do mundo, sendo também o maior exportador mundial de açúcar e álcool de cana. A seguir mostra-se a produção canavieira e a área plantada no país nos anos 2009 e 2010 (TAB. 3), com destaque para as regiões e Estados onde ocorre a maior produção. A TAB. 4 mostra a participação brasileira na produção mundial de cana-de-açúcar.

Tabela 3 – Produção canavieira no Brasil

Região/Estado	Área (mil ha)		Produção (mil t)	
	2009	2010	2009	2010
Norte	17,2	19,5	991,6	1.380,2
Nordeste	1.082,6	1.100,6	60.677,2	62.909,8
Centro-Oeste	940,3	1202,5	77.435,9	96.149,1
Sudeste	4.832,6	5126,9	419.857,7	420.561,1
MG	588,816	649,940	49.923,4	55.198,1
ES	68,037	68,650	4.009,6	3.484,0
RJ	45,834	51,330	3.260,0	2.643,5
SP	4.129,872	4.357,010	362.664,7	359.235,5
Sul	537,0	584,0	45.551,3	43.990,8
PR	535,958	582,320	45.502,8	43.905,2
RS	1,035	1,690	1.414,1	120
TOTAL	7.409,6	8.033,6	604.513,6	624.991,0

Fonte: CONAB, 2011.

3.5.1 Produção de cana-de-açúcar em Minas Gerais

Como mostra a TAB. 3, Minas Gerais foi o segundo maior produtor de cana-de-açúcar do país em 2010, ficando atrás apenas de São Paulo. A produção de cana-de-açúcar em Minas Gerais se concentra principalmente na região do Triângulo Mineiro (70% da produção), seguido pelo Sul de Minas (10%) (FIG. 9).

Tabela 4 – Principais países produtores de cana-de-açúcar

País	Área (ha)		Produção (t)	
	2007	2008	2007	2008
Brasil	7080920	8141135	549707328	648921280
Índia	5150000	5055200	355519700	348187900
China	1596643	1708520	113731917	124917502
Tailândia	1010287	1054439	64365482	73501610
Paquistão	1029000	1241300	54741600	63920000
México	690441	669231	52089356	51106900
Colômbia	410201	383388	38500000	38500000
Austrália	420000	390000	36397000	33973000
Argentina	355000	355000	29950000	29950000
Estados Unidos	357539	374200	27750600	27603000
Filipinas	382956	397991	32500000	26601400
Indonésia	404653	415578	25300000	26000000
Guatemala	287000	287000	25436774	25436764

Fonte: FAO, 2009.

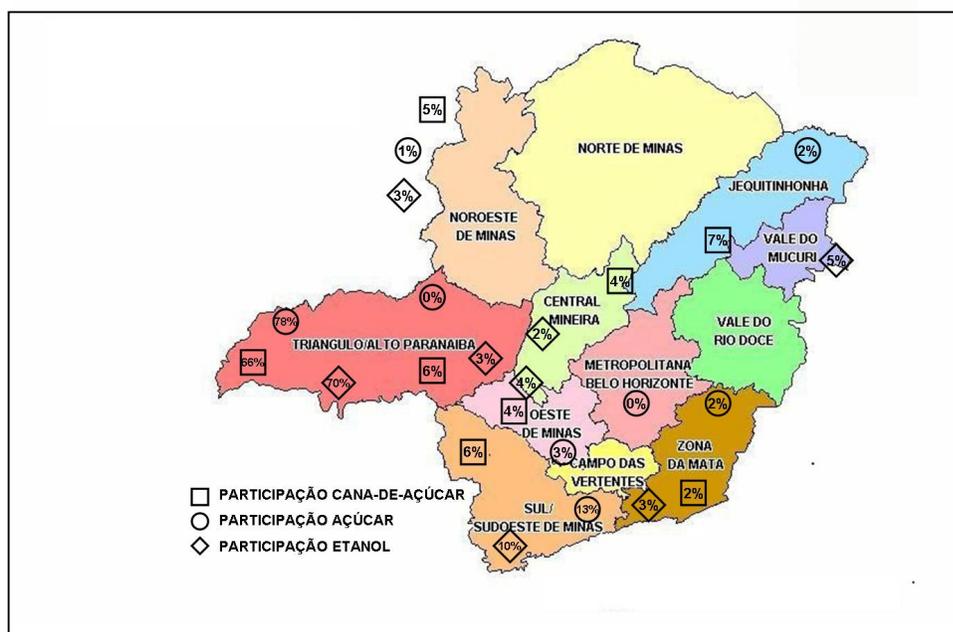


Figura 9: Participação regional da produção de cana-de-açúcar, açúcar e álcool em Minas Gerais

Fonte: Adaptado de Campos, 2008.

Nos últimos anos, o Estado de Minas Gerais tem apresentado o maior crescimento em nível nacional, tanto para a produção de cana-de-açúcar quanto para a produção de açúcar e álcool (CAMPOS FILHO & SANTOS, 2007), sendo que se prevê ainda uma maior expansão devido à onda de investimentos que experimenta o setor. Essa projeção, em um futuro próximo, consolidaria o Estado de Minas Gerais como segundo maior produtor em nível nacional. A FIG. 10 mostra a evolução da produção de cana, açúcar e álcool no Estado.

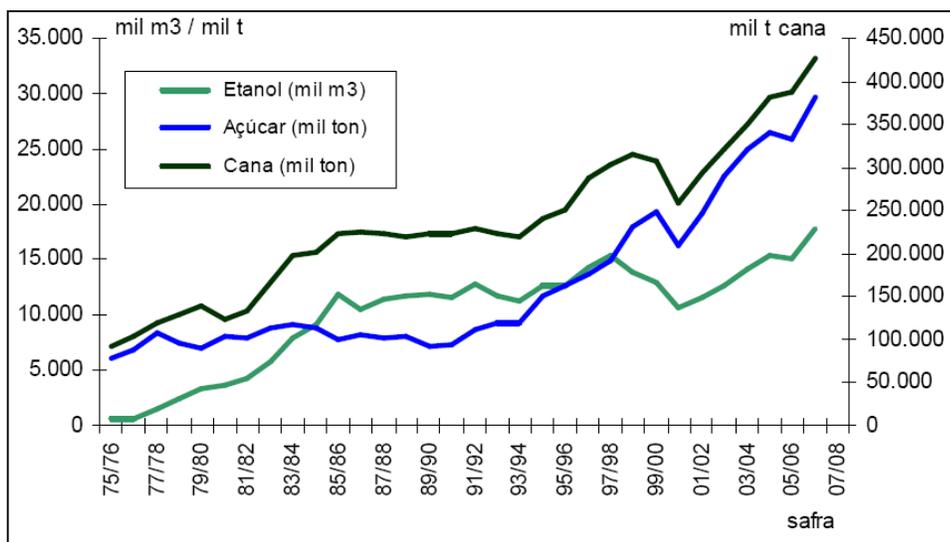


Figura 10: Evolução da produção sucroalcooleira de Minas Gerais

Fonte: BNDES, (2008b)

3.5.2 Características da cultura da cana-de-açúcar

A cultura da cana-de-açúcar é temporária, com safras anuais, onde ocorre o corte seguido de rebrota. O ciclo de corte-rebrota pode ocorrer de 3 a 6 vezes (ESTEVES, 1996), principalmente em função da qualidade das variedades utilizadas e da produtividade, a qual cai depois de cada corte. A cana-de-açúcar se reproduz através do plantio do próprio colmo (caule), o qual pode ser obtido em viveiros nos quais os colmos devidamente produzidos são as mudas que serão utilizadas para plantio comercial. Neste último, o primeiro brote é normalmente chamado de “cana-planta” e os rebrotos são chamados de “cana-soca”.

O crescimento da cana possui basicamente duas fases (ANDRADE & ANDRADE, 2007): fase de brotação, perfilhamento e desenvolvimento vegetativo; e fase de maturação. A primeira fase exige solo úmido e temperaturas acima de 20°C, sendo o ideal a faixa compreendida entre 25°C e 30°C. Na fase de maturação, a cana entra em repouso fisiológico e ocorre o acúmulo de sacarose nos colmos, precisando de clima seco e frio, abaixo de 20°C. Segundo Barbosa *et al.* (2007), a fase de crescimento vegetativo leva de seis a oito meses, enquanto que a fase de maturação leva de quatro a seis meses.

3.5.3 Considerações antes do plantio

Segundo Andrade & Andrade (2007) os fatores que influem na boa produtividade do canavial são: o bom preparo do solo (incluindo a correção da acidez e a adubação), o plantio realizado

na época recomendada, o uso de mudas sadias oriundas de viveiros e os tratos culturais da cana-planta e da cana-soca no momento adequado. Antes de realizar estas atividades, deve-se fazer o planejamento e escolha da área para cultivo. Nesse sentido, o planejamento começa com estimativas de produção e projeção de áreas de lavoura em horizontes de tempo de 5 a 10 anos, levando em conta fatores tais como: as variedades a serem utilizadas, o ambiente de produção, a produtividade e o número de cortes econômicos, entre outros. Uma vez realizada esta etapa, procede-se à escolha da área de cultivo.

3.5.3.1 Escolha da área para cultivo da cana-de-açúcar

Quanto à área de plantio a ser escolhida, pelo menos quatro fatores básicos devem ser levados em conta (MACHADO *et al.*, 2007): o clima, o solo, a declividade do terreno e a vegetação. Como foi explicado anteriormente, a cana-de-açúcar precisa de clima quente e úmido, na fase de desenvolvimento vegetativo, e clima seco e frio na fase de maturação. Portanto, o bom crescimento da planta depende da variação da temperatura assim como da umidade. Em climas muito secos, onde a deficiência hídrica é elevada, será necessária a irrigação. A declividade do terreno determinará o grau de mecanização do cultivo. Assim mesmo, existem determinados tipos de solo que não são favoráveis ao desenvolvimento ou implantação da cultura. O QUADRO 1 mostra os parâmetros para cultivo de cana-de-açúcar destinada à produção de açúcar e álcool.

Um outro aspecto a ser levado em conta antes de começar com as atividades de plantio é a escolha das variedades a serem cultivadas.

Parâmetro	Classificação	Critério
Temperatura média anual	Apta	>21°C
	Restrita	19 °C a 21 °C
Deficiência Hídrica (CAD ⁽¹⁾ 100 mm)	Ótima	0 – 150 mm
	Irrigação suplementar	150 – 400 mm
	Irrigação imprescindível	> 400 mm
Solo	Inapta	Espodossolo Cárstico; Gleissolo Melânico; Neossolo Litólico; Neossolo Quartzarênico; Neossolo Flúvico e afloramento rochoso
Declividade	Mecanizável	≤ 13%
Vegetação	Restrita	Unidade de conservação não explorável e de uso sustentável

(1) CAD – Capacidade de Água Disponível

Quadro 1: Parâmetros ambientais para o cultivo da cana-de-açúcar

Fonte: Machado *et al.*, 2007.

3.5.3.2 Variedades de cana-de-açúcar

Segundo Barbosa *et al.* (2007), as características desejáveis nas variedades de cana-de-açúcar são: produtividade elevada; elevado teor de sacarose; conteúdo ideal de fibras; boa brotação e longevidade da soca; perfilhamento e características do colmo; florescimento não excessivo; e tolerância às principais pragas e doenças. Para alcançar os objetivos de produção deve ser feito um manejo adequado de variedades, já que não existe uma única que englobe todas as características desejadas na produção. É recomendável diversificar, já que o cultivo de só uma variedade (monocultura) tende a afetar a produtividade. A monocultura, devido a fatores bióticos e abióticos, entra em estresse biológico afetando assim sua resistência e rendimento, comprometendo a produtividade. Para minimizar o declínio da produtividade, a recomendação é não ultrapassar 15% da área total cultivada com uma única variedade (BARBOSA *et al.*, 2007), sendo que esta área deve ter por volta de dez variedades cultivadas. Recomenda-se utilizar as variedades com menor grau de parentesco e que apresentem menor risco de aquisição das principais doenças.

No manejo de variedades, deve-se considerar ainda as características de maturação das mesmas. Neste sentido, as variedades podem ser classificadas em precoces, médias e tardias, em função de atingirem um teor satisfatório de sacarose no início (maio/junho), no meio (julho/agosto) ou final (setembro/outubro/novembro) da safra (ELETROBRÁS, 1983). O período útil de industrialização (PUI) ocorre em função do teor de sacarose satisfatório para esse fim, o qual deve ser da ordem de 13% a 16%. Nesse sentido, as variedades precoces possuem um PUI longo, já que estas alcançam teores de sacarose da ordem de 13% logo no início da safra. Isto significa que durante vários meses (mais de 150 dias) estas variedades apresentam teores de sacarose dentro da faixa de 13% a 16%. As variedades médias possuem PUI médio (entre 120 e 150 dias). Já as variedades tardias possuem PUI curto (70 a 120 dias), apresentando menor interesse, devido ao baixo rendimento em sacarose. A escolha das variedades com base no PUI e o teor de sacarose deve ser feito levando em conta as curvas de maturação correspondentes (FIG. 11).

Observando as curvas de maturação, pode-se dar preferência às variedades precoces e médias no plantio, sendo as precoces em maior proporção. Dessa forma garante-se maiores teores de sacarose durante a colheita, e portanto, maior quantidade de açúcar por hectare. A escolha de variedades de cana-de-açúcar deve considerar, além das características de maturação, as características agronômicas das variedades.

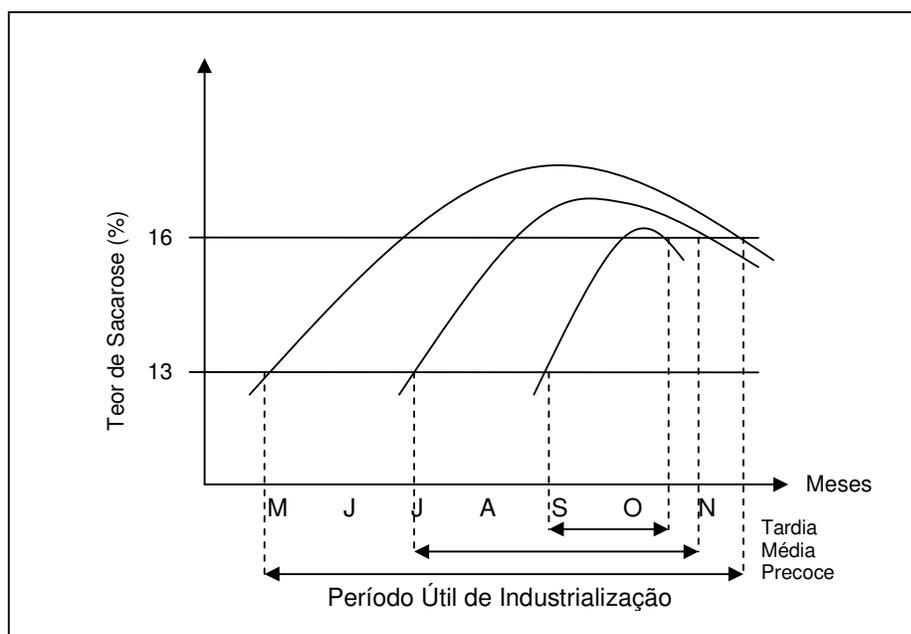


Figura 11: Curvas de maturação para a cana-de-açúcar

Fonte: Adaptado de Eletrobrás (1983)

O quadro a seguir mostra as principais variedades de cana-de-açúcar⁷ utilizadas em Minas Gerais, para a produção de açúcar e álcool, e o manejo sugerido em função dos dias de safra.

Dias de safra⁽¹⁾			
30 dias	45 dias	75 dias	75 dias
Precoce 1	Precoce 2	Média	Tardia
RB 855156	RB 835486	RB867515	RB72454
RB 855453	SP80-1842	RB855536	RB867515
	SP81-3250 ⁽²⁾	SP79-1011	SP83-2847
		SP80-1816	
		SP80-3280	

(1) Considerando-se 225 dias de safra

(2) Com maturador

Quadro 2: Sugestão de manejo de variedades em de cana-de-açúcar em Minas Gerais
Fonte: Barbosa *et al.* (2007).

3.5.3.3 Época de plantio

De modo geral, a época de plantio da cana-de-açúcar depende das características climáticas da região e do tipo de cana a ser plantado em função do tempo requerido para o desenvolvimento

⁷ A codificação das variedades de cana-de-açúcar segue um padrão internacional, onde as duas primeiras letras indicam a sigla da instituição obtentora; os dois números seguintes representam o ano em que foi realizada a hibridação; e os últimos números indicam o código que o clone recebeu no início dos experimentos (BARBOSA *et al.*, 2007).

da cana (cana de ano ou cana de ano e meio). Segundo Andrade & Andrade (2007) a época de plantio recomendada para a região Centro-Sul, incluindo o Estado de Minas Gerais, sem o uso de irrigação é janeiro a março, para a cana de ano e meio, e outubro a novembro para a cana de ano.

A cana de ano e meio brota e se desenvolve vegetativamente nos meses de janeiro, fevereiro e março. De abril a agosto fica em repouso, sem apresentar desenvolvimento. Seguidamente se desenvolve vegetativamente, de forma intensa, de setembro a março e logo depois entra em processo de maturação. A cana de ano brota em outubro/novembro, se desenvolve vegetativamente até março/abril e posteriormente entra em processo de maturação. Depois do primeiro corte, o ciclo das socas dura 12 meses, tanto para a cana de ano e meio quanto para a cana de ano. Entre a cana de ano e meio e a cana de ano, a primeira é preferida devido a que, entre outras vantagens, permite a colheita durante todo o período de safra. Ou seja, pode-se fazer o corte em maio/junho, julho/agosto/setembro e/ou outubro/novembro/dezembro plantando variedades de maturação precoce, média e/ou tardia, respectivamente. Já a cana de ano não permite o corte no início da safra, mesmo utilizando variedades de maturação precoce, no entanto esta permite produção mais rápida de plantio ao primeiro corte e melhor brotação das socas.

As vantagens de fazer plantio de cana de ano e meio são (ANDRADE & ANDRADE, 2007):

- Colheita durante toda a safra;
- Maior número de meses para desenvolvimento vegetativo, garantindo maior produção;
- Melhor distribuição de mão-de-obra (plantio e colheita não coincidem);
- Melhor controle de plantas daninhas;
- Menores problemas fitossanitários, principalmente no início do ciclo da planta;
- Possibilidade de rotação com culturas de ciclo curto por ocasião da reforma do canavial.

Uma vez vistos os aspectos antes do plantio, a seguir expõem-se características das etapas da agricultura da cana-de-açúcar: produção de mudas, preparo do solo, plantio, tratos culturais e colheita. Além desses pontos, destacam-se aspectos referentes à melhoria da fertilidade do solo e irrigação.

3.5.4 Produção de mudas

Segundo Silveira *et al.* (2007) a produção de mudas de cana-de-açúcar deve ser feita em viveiros específicos para esse fim. Os objetivos perseguidos no viveiro são similares àqueles relativos ao plantio comercial: alcançar um nível de produtividade ótimo, minimizar os possíveis desequilíbrios culturais e oferecer colmos com bom estado hídrico e nutricional, entre outros. No plantio comercial, estes fatores garantirão o vigor na germinação inicial, assim como o bom desenvolvimento vegetativo e pureza varietal. A diferença básica entre uma lavoura destinada à obtenção de mudas e uma destinada ao plantio comercial são os aspectos fitossanitários e a necessidade de irrigação durante a produção das mudas. Os cuidados fitossanitários na produção em viveiros garantirão a minimização de perdas provocadas por doenças no plantio comercial, além da resistência varietal. Já a irrigação garantirá o bom estado hídrico das mudas.

Para a formação do viveiro, primeiramente se faz o planejamento da lavoura, que consiste na definição da expansão e estabilização da mesma. Em seguida planeja-se o tipo de equipamento a ser utilizado para tratamento térmico das mudas. Nesse sentido, existem dois modelos básicos para tratamento térmico de mudas (SILVEIRA, 2007): a Unidade de Tratamento Térmico – Sistema Corpersucar e a Unidade de Tratamento Térmico – Sistema Planalsucar. O modelo Corpersucar permite o tratamento térmico de toletes de uma gema⁸, sendo que sua escolha é a mais econômica quando a área de plantio for menor que 10 hectares. Já o modelo Planalsucar permite o tratamento térmico de toletes de três gemas, que é a melhor opção quando a área de plantio for superior a 10 hectares.

Os viveiros podem ser primários e secundários. Os viveiros primários são aqueles onde ocorre o primeiro brote, de onde será feito o corte dos toletes (mudas) para tratamento térmico. Já o viveiro secundário é formado pelo segundo brote, de onde também serão obtidos toletes para o correspondente tratamento térmico. O viveiro primário, diferentemente do secundário, precisa de irrigação independentemente da época de plantio.

O corte de mudas deve ser feito de forma manual, realizando esterilização dos facões de forma periódica para evitar a eventual mistura de variedades. A esterilização deve ser feita de

⁸ O tolete é uma parte do colmo da muda, o qual contém os nós (gemas) por onde ocorrerão os brotes no plantio comercial.

três a quatro vezes por dia. Os métodos usuais utilizados para a esterilização são a flambagem e a solução biocida, com creolina a 20%. A limpeza termina com a raspagem dos facões.

3.5.4.1 Controle fitossanitário durante a produção de mudas

O controle fitossanitário em viveiros diz respeito ao controle de doenças e pragas complementado com a utilização de variedades resistentes ou tolerantes aos patógenos e pragas que atacam a cultura.

Dentre as doenças de importância econômica que incidem nos canaviais brasileiros, somente a ferrugem pode ser combatida através da resistência varietal. As outras doenças devem ser controladas por meio de tratamento térmico e *rouguing*. O tratamento térmico tem como objetivo principal o controle do raquitismo-da-soqueira (RSD), considerada a doença que acarreta maiores problemas nos canaviais brasileiros, resultando em perdas de, em média, 60% da produção canavieira. As perdas são maiores em lavouras com variedades susceptíveis à doença. O controle do RSD é realizado por imersão dos toletes em água quente, a temperatura controlada de 50,5°C, durante duas horas, ou a temperatura de 52°C durante 30 minutos (SILVEIRA, 2007). Segundo pesquisas realizadas por Matsuoka (*apud* SILVEIRA, 2007), após o tratamento térmico, a plantação realizada com as mudas tratadas pode sofrer até cinco multiplicações sucessivas, voltando depois aos níveis de contaminação com RSD das mudas não tratadas. Para serem submetidas a tratamento térmico, as mudas devem estar com 13 a 14 meses de idade, no caso de mudas oriundas de viveiro primário. No caso de mudas provenientes de viveiro secundário, a idade para tratamento térmico deve estar entre 10 e 12 meses.

O *rouguing* consiste na eliminação de plantas com sintomas de doenças e plantas com mistura varietal, além do controle de pragas. Ele é realizado normalmente a partir do primeiro mês de plantio, prestando maior atenção às doenças. A partir do quarto mês, o *rouguing* é realizado prestando atenção também à mistura varietal. As plantas eliminadas devem ser arrancadas, incluindo todo o sistema radicular, e isoladas das plantas saudáveis. No caso de plantas doentes, estas devem ser arrancadas e afastadas do canavial, tomando os cuidados necessários para eliminar o contato com as plantas saudáveis.

3.5.5 Preparo do solo

O preparo do solo é uma das atividades mais importantes do cultivo da cana-de-açúcar, uma vez que o canavial deverá suportar diversos cortes econômicos por vários anos, até ser renovado. Nesse período o solo será submetido apenas a tratos culturais de ação superficial. Há dois casos distintos de preparo do solo que devem ser considerados (ANDRADE & ANDRADE, 2007; ESTEVES, 1996): (1) quando o terreno vai ser cultivado com cana-de-açúcar pela primeira vez e (2) quando o terreno já está cultivado com cana e será efetuado um novo plantio após o último corte econômico (renovação do canavial).

No primeiro caso, deve ser feita a eliminação da cobertura vegetal, a qual consiste na retirada das plantas ou restos de cultura existentes na área. Segundo Andrade & Andrade (2007) a eliminação da cobertura vegetal deve ser complementada com o controle de plantas daninhas de difícil erradicação, tais como a grama-seda. O controle começa com ação mecânica (gradeação) no período seco; em seguida se faz o manejo químico no período úmido, quando também é realizada a instalação do sistema viário e conservacionista, assim como a confecção dos talhões e posterior aplicação de corretivos (calcário e gesso). Posteriormente realiza-se aração ou subsolagem seguida de gradeações de pré-plantio e plantio. Segundo a Agrobite (s.d.), uma vez constatada a compactação do solo, a subsolagem é aconselhável somente quando a camada adensada de terra estiver localizada entre 20 a 50 cm da superfície do solo seco.

No segundo caso, o terreno já cultivado com cana-de-açúcar é submetido à chamada renovação ou reforma do canavial, ocasião na qual se usa arado e grade comuns para a eliminação da vegetação (soqueiras, raízes e rizomas) (ANDRADE & ANDRADE, 2007). A aração pode ser realizada depois do corte da cana, antes que comece o rebrote, para cortar raízes e rizomas, de modo que os restos culturais sejam trazidos à superfície do solo para serem desidratados pela exposição ao sol pelo menos por uma semana. A operação é completada com gradagem leve, para picar o material e incorporá-lo no solo; isto facilitará a decomposição do resto cultural. A destruição das soqueiras pode ser feita também através de uma única passagem de grade pesada, de modo que os restos culturais são incorporados a grandes profundidades no solo. Antes da gradagem, deve-se aplicar calcário e gesso em área total. Outra possibilidade de eliminação das soqueiras (para terrenos arenosos, sem problemas de compactação da subsuperfície e surgimento de pragas do solo) é a aplicação de agentes químicos. Neste caso, após o último corte econômico da cana, espera-se a que a rebrota atinja

de 60 a 100 cm de altura, procedendo-se depois à aplicação do produto químico. Quando esta operação é realizada, não é necessário o preparo prévio do solo, realizando-se a sulcação direta da entrelinha e posterior plantio.

Conforme Demattê (2004), quando da renovação do canavial, que antecede o plantio da cana, é necessário avaliar o estado de compactação do solo, para otimizar as operações de preparo e cultivo. Para isso existem instrumentos tais como os penetrômetros de impacto e os penetrógrafos, os quais avaliam o nível crítico de compactação do solo relacionado ao teor de umidade do mesmo. Esses instrumentos fornecem resultados rápidos, mas dependem muito de curvas de calibração das variáveis mencionadas e, portanto, estão sujeitos a erros. Um método mais seguro de avaliação da compactação é a abertura de trincheiras de 60 a 70 cm de profundidade, para procurar por camadas densas na subsuperfície. Isso determina a necessidade ou não de subsolagem na área. A subsolagem, que é realizada para facilitar o desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar, é uma das operações agrícolas mais caras e que demandam maiores quantidades de energia, motivo pelo qual sua implementação deve ser feita de forma criteriosa (VASCONCELOS, 2006). A operação é feita por subsoladores providos de hastes que penetram o solo, tracionados por tratores.

3.5.6 Plantio

3.5.6.1 Sulcação

O plantio da cana-de-açúcar consiste basicamente na sulcação, adubação (aspecto que será exposto mais adiante) e lançamento das mudas. A sulcação, que consiste na confecção de sulcos para recebimento das mudas, é normalmente realizada juntamente com a adubação, por meio de sulcadores-adubadores (plantio semi-mecanizado) de duas a três linhas (ANDRADE & ANDRADE, 2007), os quais abrem o sulco e aplicam adubo ao mesmo tempo. A sulcação também pode ser manual (pequenos produtores), por meio do arado; neste caso, normalmente a adubação também é manual. Quanto ao espaçamento entre sulcos, para canaviais industriais com colheita manual, este varia entre 1,30 e 1,50 m, sendo normalmente de 1,40 m, o qual se adapta melhor ao tráfego de tratores, carregadoras e caminhões. No caso de colheita mecanizada, o espaçamento deve ser maior, normalmente de 1,50 m. Para o caso de sulcação e adubação manuais, onde não existe trânsito de tratores e caminhões no meio do canavial, o espaçamento entre sulcos pode ser de 1,0 m. Note-se neste último caso, que a produtividade de cana-de-açúcar por unidade de área é maior e a incidência de plantas daninhas é menor.

Dentre os tipos de plantio, no Brasil e Minas Gerais ainda predomina o sistema de plantio convencional, semi-mecanizado, com grande demanda de mão-de-obra. O plantio mecanizado, onde são utilizadas máquinas plantadoras que podem realizar inclusive a sulcação, a adubação, a distribuição dos toletes, a aplicação de inseticida e a cobertura em uma única operação, é ainda pouco utilizado no país, mas é uma tendência e uma necessidade do setor, devido à previsão de expansão da produção para atender a demanda dos próximos anos.

3.5.6.2 Lançamento de mudas

Existem vários tipos de disposição das mudas no sulco de plantio. Esteves (1996) cita uma forma de arranjo em que o lançamento das mudas no leito dos sulcos é realizado de forma horizontal, formando linhas com distâncias que variam entre 1,0 a 1,4 m, sendo que a distância entre mudas estende-se de 40 a 45 cm. Coleti (*apud* ANDRADE & ANDRADE, 2007) sugere que a densidade de plantio de mudas seja de 12 a 15 gemas/m, sendo que podem ser usados dois tipos de arranjo para este fim, dependendo da distância dos entrenós e da qualidade da muda: (1) usar uma cana e meia ou (2) duas canas no fundo do sulco. No primeiro sistema os colmos são arranjados de modo que a metade apical de um deles fique traspassada com a metade apical de outro, de forma lateral. No segundo sistema dois colmos são arranjados juntos, de modo que o pé de um fique junto à ponta do outro, para prevenir possíveis falhas de germinação. As mudas são distribuídas em caminhões (grandes produtores) e por carretas de tração animal (pequenos produtores). Quanto à quantidade de mudas para cultivo da cana, segundo Oliveira *et al.* (2007), a utilização de mudas por hectare de cultivo de cana é da ordem de 12 t. Já segundo Andrade & Andrade (2007), são necessárias de 8 a 10 t de mudas, com idade de 12 meses e oriundas de viveiros, para o plantio de um hectare. As mudas devem ser preferencialmente colhidas e plantadas no mesmo dia, no entanto, podem permanecer cortadas no campo por até uma semana, sem perdas significativas na brotação. Ainda conforme Andrade & Andrade (2007), as mudas, distribuídas inteiras nos sulcos, devem ser cortadas manualmente com podões, em toletes de duas a três gemas. Depois, os toletes são recobertos com terra por meio de cobridores de cana acoplados ao trator, que também faz a aplicação de inseticida. O cobrimento mecânico pode ser complementado manualmente com enxada. Estas são características do plantio semi-mecanizado da cana-de-açúcar que, como explicado anteriormente, ainda predomina no Brasil. O rendimento médio de plantio neste sistema é de 0,27 ha/dia por trabalhador.

No caso de plantio mecanizado, existem plantadoras de cana já disponíveis no mercado que, segundo Andrade & Andrade (2007) podem ser de dois tipos: Plantadora de Cana Inteira (PCI) e Plantadora de Cana Picada (PCP). A primeira utiliza cana inteira e normalmente faz o plantio de uma linha de cada vez. A plantadora está equipada de uma sulcadora e uma adubadora. A alimentação dos colmos é feita manualmente a partir de uma carreta acoplada na parte de trás da plantadora. O maquinário possui um sistema de facas que corta as canas inteiras em toletes de 30 a 40 cm, os quais são distribuídos uniformemente no fundo do sulco de plantio. Como a plantadora também faz o cobrimento das mudas, a sulcação, a adubação, a distribuição de toletes e o cobrimento podem ser realizados em uma única operação. O rendimento médio da plantadora PCI é de 3 ha/dia; sua capacidade é de 3 t de mudas e 300 kg de adubo, sendo que já existem plantadoras de duas linhas, com espaçamento regulável de 1,00 a 1,60 m.

A plantadora PCP, à diferença da PCI, utiliza toletes e planta duas linhas de cada vez. A alimentação dos toletes é feita via transbordo, das carretas provenientes do colhimento de mudas para o depósito da plantadora, a qual possui duas transportadoras de toletes para os sulcos de plantio. A plantadora possui duas sulcadoras, duas adubadoras, um tanque com duas saídas para distribuição de inseticida sobre os toletes e duas cobridoras. Então, a plantadora pode fazer o sulcação, adubação, distribuição de toletes, aplicação de inseticida e cobrimento em uma única operação. O rendimento médio da plantadora PCP é de um hectare por hora; sua capacidade é de 4 t de mudas, 900 kg de adubo (450 kg em cada adubadora) e 450 l de inseticida. Segundo Andrade & Andrade (2007), embora o plantio mecanizado não danifique muito as gemas, é recomendável que a densidade de plantio, neste caso, seja de 18 a 20 gemas por metro linear de sulco aberto.

3.5.6.3 Cultivo mínimo e plantio direto

O cultivo mínimo, que consiste no preparo mínimo do solo para o plantio, envolve a utilização de herbicidas para destruição das soqueiras e combate a ervas daninhas, sem revolver o solo, o que substitui as operações agrícolas de cultivo convencionais. Seguidamente à aplicação do herbicida, se realiza a sulcação da terra nas entrelinhas para o novo plantio. As vantagens desse tipo de cultivo são (SEAGRI, s.d.): possibilidade de plantio em época de chuva (o que pode antecipar o plantio em alguns meses); utilização mais intensa da área de plantio (o intervalo entre a colheita e o replantio é menor); redução da erosão;

redução do uso de máquinas, implementos e combustível; eliminação mais eficiente da soqueira e o controle de invasoras problemáticas, como a tiririca e a grama-seda.

No plantio direto a mobilização do solo ocorre somente na linha de plantio, na qual o sulco é aberto, adubado e plantado em uma única operação. Previamente o terreno é cultivado com uma planta de cobertura, gramínea ou leguminosa, a qual é dessecada pela ação de herbicidas, o qual deixa o solo com uma cobertura morta (NETTO, 2005). Segundo Tanimoto (2008), o plantio direto de cana-de-açúcar sobre a palha de leguminosas viabiliza o plantio mecanizado; reduz o preparo do solo evitando sua compactação; evita a erosão; aumenta a matéria orgânica do solo; e reduz o custo operacional, entre outros. Além desses benefícios, o plantio direto também aumenta a produtividade e preserva o ambiente devido à colheita da cana sem queima prévia (DUARTE JÚNIOR & COELHO, 2008). A área de plantio direto na região Centro Sul do Brasil é da ordem de 200000 hectares, o que representa mais de 50% das áreas destinadas para renovação da cultura.

3.5.7 Melhoria da fertilidade do solo

A melhoria da fertilidade do solo é um dos fatores que contribuem para aumentar a produtividade da cana-de-açúcar. Ela consiste basicamente na correção da sua acidez e na adubação (fertilização). A correção da acidez é normalmente realizada pela aplicação de calcário e gesso (corretivos), sendo que a adubação é feita principalmente por meio de fertilizantes minerais a base de nitrogênio, fósforo e potássio (NPK), em função das necessidades de correção e adubação do solo, respectivamente.

Para seu desenvolvimento, a cana-de-açúcar extrai e acumula grande quantidade de nutrientes e micronutrientes do solo. Este acúmulo está diretamente relacionado à produtividade do canavial, ou seja, quanto maior a produtividade, maior será a quantidade de nutrientes extraídos do solo. A produtividade média brasileira na produção de cana-de-açúcar é da ordem de 80 t/ha⁹ (CONAB, 2011). Cabe ressaltar que este índice leva em conta somente os colmos industrializáveis, que representam aproximadamente 80% da matéria natural produzida por hectare, ou seja, excluindo as folhas secas e os ponteiros da parte aérea da planta. A produtividade média dos canaviais neste último caso é da ordem 100 t/ha

⁹ O valor foi calculado com base nos anos de 2009 e 2010, onde a produtividade foi de 81,59 e 77,79 t/ha, respectivamente.

(OLIVEIRA *et al.*, 2007). Fazendo-se manejo adequado de variedades, adubação e tratos culturais, entre outros, a produtividade da cana-de-açúcar pode chegar a ser maior que 150 t/ha. Assim mesmo, fazendo uso adequado de irrigação complementar, a produtividade pode ultrapassar 200 t/ha.

O seguinte quadro mostra a quantidade de nutrientes e micronutrientes extraídos do solo pela cana-de-açúcar, considerando uma produção de 120 t de matéria natural (parte aérea) por hectare.

Nutriente	Quantidade (kg/ha)	Micronutriente	Quantidade (kg/ha)
Nitrogênio (N)	150	Ferro (Fe)	8
Fósforo (P)	40	Manganês (Mn)	3
Potássio (K)	180	Zinco (Zn)	0,6
Cálcio (Ca)	90	Cobre (Cu)	0,4
Magnésio (Mg)	50	Boro (B)	0,3
Enxofre (S)	40		

Quadro 3: Quantidade de nutrientes extraídos do solo pela cana-de-açúcar
Fonte: Oliveira *et al.*, 2007.

Considerando a quantidade de nutrientes e micronutrientes extraídos pela cana-de-açúcar, deve-se fazer a avaliação da disponibilidade destes no solo para, se necessário, complementá-la com adubação. Assim mesmo, deve-se avaliar o solo quanto à sua acidez e presença de elementos em níveis tóxicos, para considerar a necessidade de gessagem e calagem. A avaliação da disponibilidade de nutrientes e dos níveis de toxicidade do solo é normalmente realizada através da análise química da camada arável (VITTI *et al.*, 2004), levando-se em conta também o histórico da área (adubações realizadas; ocorrência ou não de sintomas de deficiência ou de toxidez em cultivos anteriores). Para a análise química, normalmente coletam-se amostras de solo das camadas de 0 a 20 cm de profundidade (para avaliar a necessidade de adubação e calagem) e de 20 a 40 cm para avaliar a necessidade de gessagem. A amostra deve ser composta, fruto da mistura homogênea de 20 a 30 amostras simples (dependendo do tamanho da área e da sua homogeneidade). No caso da avaliação da disponibilidade de potássio, cálcio, magnésio, sódio e alumínio, podem-se obter resultados de alta precisão e exatidão, apesar da grande variedade de extratores químicos utilizados pelos laboratórios. Já no caso dos teores de fósforo, enxofre e micronutrientes no solo, o resultado das análises químicas pode variar bastante, em função dos métodos e extratores químicos utilizados, da época de coleta das amostras, umidade do solo e preparo da amostra. Assim, o histórico da área é de grande importância nesses casos, de modo que, por exemplo, se for

constatada deficiência de micronutrientes em culturas anteriores, será necessária a inclusão destes na adubação.

3.5.7.1 Calagem

A calagem envolve a aplicação de calcário no solo para correção da acidez do mesmo. Esta deve ser realizada quando as quantidades de cálcio e/ou magnésio trocáveis do solo estejam presentes em níveis insuficientes para o bom desenvolvimento da cana-de-açúcar ou quando os teores de alumínio tóxico (trocável) forem altos (ELETROBRÁS, 1983). Segundo Oliveira *et al.* (2007), a maior parte dos solos brasileiros são naturalmente ácidos, apresentando baixas concentrações de cátions básicos tais como o cálcio, magnésio e potássio. Esta característica, associada à presença de altos teores de alumínio trocável, prejudica o desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar e, conseqüentemente, o crescimento da planta. O baixo desenvolvimento do sistema radicular também acarreta problemas tais como menor volume de solo explorado e menor resistência à seca por parte da planta. A aplicação de fertilizantes nitrogenados, especialmente os amoniacais, assim como a retirada de cátions básicos pelas colheitas, podem também contribuir para o aumento da acidez do solo.

Para a realização da calagem, os corretivos mais utilizados são: os calcários calcíticos, magnesianos e dolomíticos, além dos silicatos de cálcio e magnésio (escórias de siderurgias). Serrana (2001) e Oliveira *et al.* (2007) citam dois métodos de determinação da necessidade de calagem utilizados na maioria dos Estados brasileiros: (1) o método de neutralização da acidez trocável e da elevação dos teores de cálcio e magnésio e (2) o método de saturação por bases. Este último determina a quantidade de calcário (QC) a ser aplicada, levando-se em conta a recomendação de elevar a saturação por bases a 60% para o caso da cana-de-açúcar, segundo a equação (RAIJ *et al. apud* OLIVEIRA *et al.*, 2007):

$$QC = \frac{[(60 - V) \times T]}{PRNT} \quad (3.2)$$

Na qual:

QC = Quantidade de Calcário em t/ha

V = Saturação por bases atual do solo (%)

T = Capacidade de troca catiônica (CTC) a pH 7,0

$PRNT$ = Poder Relativo de Neutralização Total do corretivo utilizado

Para solos mais argilosos ou com saturação por bases abaixo de 30%, a recomendação é utilizar de 1,5 a 2,0 vezes a necessidade de calcário determinada pela equação (3.2). Para áreas de rebrota, a calagem é necessária quando a saturação por bases for inferior a 50%. Para áreas de cultivo mínimo e plantio direto de cana-de-açúcar a necessidade de calagem é menor; recomenda-se aplicar calcário somente quando a saturação por bases for inferior a 40%. Nesses casos, a mineralização dos restos culturais e da palhada presentes liberam ânions que complexam com o Ca, Mg, K, e Al, formando moléculas neutras que percolam no solo, assim, a complexação do alumínio trocável possibilita a redução da acidez do mesmo (SUMMER & PAVAN *apud* OLIVEIRA *et al.*, 2007). Segundo a Eletrobrás (1983), a aplicação de calcário deve ser realizada em área total, quanto mais profunda melhor, e deve anteceder o plantio em pelo menos 1 mês. Segundo a mesma fonte, os seguintes materiais podem ser empregados na calagem: cal viva ou virgem, cal extinta (ou apagada), calcário de rocha, calcário dolomítico, resíduos de caieras e cinzas em geral, com destaque para os calcários. A eficiência do material a ser aplicado na calagem, ou seja, a sua capacidade em corrigir a acidez do solo, depende de vários fatores: granulometria, distribuição uniforme no campo, disponibilidade hídrica do solo e quantidade de cálcio (CaO) presente, entre outros. Dentre os materiais calcários, deve-se dar preferência ao calcário dolomítico, já que, além do conteúdo de cálcio também possui uma quantidade apreciável de magnésio (MgO) que será fornecida à planta. O material pode ser distribuído a lanço, manual ou mecanicamente e deve ser aplicado após o solo ter recebido uma primeira aração. Depois da aplicação do calcário, deve-se realizar uma segunda aração e uma ou duas gradagens, para misturar bem o material com a terra. Segundo a Eletrobrás (1983) 2 a 4 t/ha de calcário dolomítico satisfazem as necessidades da cana-de-açúcar.

3.5.7.2 Gessagem

O gesso agrícola ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) é um subproduto da indústria de fertilizantes. É obtido a partir da reação entre o ácido sulfúrico e a rocha fosfatada durante a produção do ácido fosfórico. Segundo Oliveira *et al.* (2007), o gesso aplicado no solo não neutraliza a acidez do mesmo, senão que aumenta a saturação por bases e diminui a saturação de alumínio, melhorando o ambiente radicular nas camadas debaixo da arável e, portanto, contribuindo para o melhor desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar. A gessagem deve ser realizada quando se constatarem teores de Ca^{2+} menores que $0,4 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$ e/ou saturação por Al^{3+} maior que 20%, na camada do solo de 20 a 40 cm. O efeito da aplicação do gesso perdura por vários anos, motivo pelo qual não é necessária sua aplicação anual.

A quantidade de gesso a ser aplicada no cultivo de cana-de-açúcar pode ser determinada a partir da necessidade de calagem, por um dos métodos mencionados anteriormente, ou através da avaliação da textura do solo. No primeiro caso, a dose de gesso a ser aplicada varia de 25% a 30% da necessidade de calagem, multiplicado pelo fator de correção de profundidade (perfil a ser corrigido/20). Assim por exemplo, se o ambiente radicular a ser melhorado estiver na camada de 20 a 60 cm e a necessidade de calagem for de 3 t/ha, então a quantidade de gesso a ser aplicada será de 1,5 t/ha $[(3,0 \times 0,25) \times (60-20)/20]$. No segundo caso, a quantidade de gesso a ser aplicada (kg/ha) é calculada a partir do teor de argila (g/kg) multiplicado pelo fator de correção de profundidade, multiplicado por seis (RAIJ, 1997). A aplicação de gesso, em casos em que não seja possível a sua obtenção econômica, poderá ser substituída aplicando fertilizante fosfatado (superfosfato simples), o qual contém sulfato de cálcio. O gesso deve ser aplicado em área total, e poderá ser incorporado ao solo ou não. O quadro a seguir mostra os ganhos em produtividade e elevação da saturação por bases (V) em diferentes camadas do solo, ao longo de vários cortes da cana-de-açúcar, aplicando doses diferentes de gesso.

Dose de gesso (t/ha)	Camada (cm)	Saturação por bases (V%)	Produção de colmos industrializáveis (t/ha)			
			2º Corte	3º Corte	4º Corte	Média
Testemunha	0 a 20	60	97	106	59	87
	20 a 40	25				
	40 a 60	15				
0,5	0 a 20	60	99	114	60	91
	20 a 40	58				
	40 a 60	18				
1,0	0 a 20	60	96	113	65	97
	20 a 40	48				
	40 a 60	25				
2,0	0 a 20	64	105	125	71	101
	20 a 40	45				
	40 a 60	23				

Quadro 4: Ganhos em produtividade e elevação da saturação por bases em função da aplicação de gesso no cultivo de cana-de-açúcar

Fonte: Demattê, 2004.

3.5.7.3 Adubação mineral

A adubação mineral, diferentemente da adubação orgânica, envolve a utilização de fertilizantes sintéticos fornecidos pela indústria de fertilizantes. Seu objetivo principal é fornecer os nutrientes e/ou micronutrientes necessários para promover o desenvolvimento e aumentar a produtividade da cana-de-açúcar; sua aplicação é normalmente realizada a partir dos resultados da análise química do solo na camada de 0 a 20 cm (VITTI, 2004). Com respeito aos nutrientes da cana-de-açúcar, as necessidades de cálcio e magnésio podem ser

supridas pela calagem e a gessagem. No entanto, para o bom desenvolvimento da planta, a cana precisa de outras fontes de nutrientes e micronutrientes. Nesse sentido, a seguir expõem-se os aspectos da adubação referentes ao nitrogênio, fósforo, potássio, enxofre e micronutrientes no plantio da cana-de-açúcar.

Adubação Nitrogenada

O nitrogênio é um elemento muito importante na nutrição e fisiologia da cana-de-açúcar, já que ele é constituinte de proteínas e ácidos nucléicos, entre outros. Juntamente com o potássio, o nitrogênio é o elemento absorvido em maiores quantidades pela cultura da cana; ele intervém no perfilhamento, incremento do índice de área foliar (IAF) e aumento da longevidade das folhas. O incremento do IAF favorece o uso da radiação solar, resultando em maior fixação de gás carbônico, o qual, à sua vez, aumenta o acúmulo de matéria seca na planta (OLIVEIRA *et al.*, 2007). No entanto, a cana-planta apresenta baixa resposta à adubação nitrogenada, sendo que as causas para este fenômeno não estão suficientemente esclarecidas. Esta baixa resposta pode ocorrer devido à variabilidade experimental, à mineralização da matéria orgânica e restos culturais do solo, às épocas de aplicação do fertilizante e às perdas por lixiviação e desnitrificação. Segundo Soares *et al.* (2009), no Brasil, as variedades de cana-de-açúcar mais plantadas apresentam fixação biológica de nitrogênio, devido a bactérias diazotróficas presentes nos tecidos da planta. Por esta razão, as quantidades de fertilizante nitrogenado aplicadas na cana-planta são bem menores em comparação com outros países. Segundo esses autores, a aplicação de N-fertilizante para a cana-planta é da ordem de 20 kg/ha. Já segundo Oliveira *et al.* (2007) a aplicação de fertilizante nitrogenado para cana-planta varia entre 60 a 100 kg/ha de N, devendo o mesmo ser aplicado no fundo do sulco de plantio, juntamente com o fósforo (P) e o potássio (K). Assim mesmo, a aplicação de fertilizante nitrogenado na cana-soca tem maior resposta (acima de 90%) do que na cana-planta, sendo que a recomendação é aplicar 1,0 kg de N por tonelada de matéria natural acumulada na parte aérea. Assim, para se obter uma produtividade de 80 t/ha de colmos industrializáveis (que representam aproximadamente 80% da matéria natural acumulada na parte aérea) por hectare, deverão ser aplicados cerca de 100 kg/ha de N.

Os fertilizantes nitrogenados mais utilizados estão na forma amoniacal e amídica, tais como a uréia, nitrato de amônio e sulfato de amônio, entre outros (ELETROBRÁS, 1983, VITTI, 2004). Dentre estes fertilizantes, o mais utilizado para o cultivo de cana-de-açúcar é a uréia, devido ao menor custo por unidade de N. Quando da aplicação de uréia no cultivo da cana, a

recomendação é enterrá-la no solo a 7,0 cm de profundidade aproximadamente, devido a que este fertilizante é altamente volátil, provocando perdas da ordem de 40% caso seja aplicado sobre o solo ou sobre a palhada. Quando não for possível esta operação, deve-se irrigar a superfície logo após a aplicação da uréia ou adubar antes de uma chuva.

Adubação fosfatada

O fósforo desempenha uma importante função no metabolismo da cana-de-açúcar; está associado à formação de proteínas, processo de divisão celular, fotossíntese, armazenamento de energia, desdobramento de açúcares, respiração, fornecimento de energia e formação de sacarose (KORNDORFER *apud* VITTI, 2004). Além disso, a aplicação de P melhora o desempenho da adubação nitrogenada (OLIVEIRA *et al.*, 2007, contribuindo para a absorção e metabolismo do N. Segundo Vitti (2004.), a adubação fosfatada deve ser realizada em solos arenosos (teor de argila < 25%), com baixo teor desse nutriente e que apresentem menor fixação do mesmo. A aplicação de fósforo deve ser feita no plantio da cana e nas rebrotas; as quantidades a serem aplicadas podem estar baseadas na análise química do solo na camada de 0 a 20 cm. A recomendação de adubação fosfatada (P₂O₅) é de 100 a 150 kg/ha. As fontes mais comuns de P₂O₅ são (ELETROBRÁS, 1983): o superfosfato simples, o superfosfato triplo, o termofosfato magnésiano, o multifosfato magnésiano e os hiperfosfatos. A aplicação de fósforo deve ser feita juntamente com o N e o K. Em grandes lavouras, nas rebrotas, esta aplicação é realizada juntamente com a subsolagem e cultivo das entrelinhas.

Os quadros 5 e 6, a seguir, mostram as necessidades de fósforo para a cana-planta, em função da produtividade desejada e da disponibilidade de fósforo extraído com Mehlich 1 e resina de troca iônica¹⁰.

Produtividade desejada cana-planta (t/ha)	Classe de fertilidade do solo		
	Baixa	Média Dose de P ⁽¹⁾ (kg/ha)	Alta
Menos de 100	70	-	-
100 a 150	80	60	40
150 a 180	90	70	50
Maior que 180	100	80	60

(1) Para transformar P em P₂O₅ multiplicar o valor desejado por 2,29

Quadro 5: Doses de fósforo recomendadas para adubação da cana-planta em função da produtividade desejada e disponibilidade de fósforo extraído com Mehlich 1
Fonte: RAIJ, 1997.

¹⁰O Mehlich 1 e a resina de troca iônica são extratores utilizados para avaliar a fertilidade do solo em laboratório.

Produtividade desejada cana-planta (t/ha)	Fósforo extraído (mg/dm ³)			
	1-6	7-17	16-40	> 40
	Dose de P ⁽¹⁾ (kg/ha)			
Menos de 100	80	44	30	20
100 a 150	90	55	40	26
Mais de 150	100	66	45	35

(1) Para transformar P em P₂O₅ multiplicar o valor desejado por 2,29

Quadro 6: Doses de fósforo recomendadas para adubação da cana-planta em função da produtividade desejada e disponibilidade de fósforo extraído com resina de troca iônica
Fonte: RAIJ, 1997.

Adubação potássica

A cana-planta e as rebrotas apresentam boa resposta à adubação com potássio, motivo pelo qual sua aplicação é feita no plantio e após cada corte. A dose a ser aplicada pode ser determinada através da análise química do solo na camada de 0 a 20 cm e, dependendo da fertilidade do solo, a dosagem de potássio poderá ser dispensada. Segundo Benedini & Penatti (2008), solos com teores de potássio abaixo de 0,6 mmolc/cm³ (<40 ppm) deverão responder com aumentos de produtividade de até 30% com a aplicação de fertilizante potássico. Por outro lado, solos com teores acima de 4,2 mmolc/cm³ de potássio (>160 ppm), possivelmente de alta expectativa de produtividade, pois seus teores de nutrientes são naturalmente altos, dispensam a adubação potássica. Dentre as fontes de potássio para adubação da cana-de-açúcar, o cloreto de potássio (KCl) tem sido o mais utilizado (OLIVEIRA *et al.*, 2007), sendo que também é comum a aplicação de vinhaça, bastante rica em potássio. Os quadros 7 e 8, a seguir, mostram as necessidades de potássio baseadas na produtividade e disponibilidade desse elemento determinadas por meio dos extratores Mehlich 1 e resina de troca iônica, para a cana-planta e cana-soca.

Produtividade desejada cana-planta (t/ha)	Classe de fertilidade do solo		
	Baixa	Média Dose de K ⁽¹⁾ (kg/ha)	Alta
Menos de 90	80	-	-
90 a 120	100	80	60
120 a 150	120	100	80
150 a 180	140	120	100
Mais de 180	160	140	120

(1) Para transformar P em K₂O multiplicar o valor desejado por 1,20

Quadro 7: Doses de potássio recomendadas para adubação da cana-planta em função da produtividade desejada e disponibilidade de potássio extraído com Mehlich 1
Fonte: RAIJ, 1997.

Produtividade desejada cana- planta (t/ha)	K extraído com resina (mmol/dm ³)				
	0-0,7	0,8-1,5	1,6-3,0	3,1-6,0	> 6,0
	Dose de K ⁽¹⁾ (kg/ha)				
Menos de 100	100	80	40	40	0
100 a 150	150	120	80	60	0
Mais de 150	200	160	120	80	0

(1) Para transformar P em K₂O multiplicar o valor desejado por 1,20

Quadro 8: Doses de potássio recomendadas para adubação das rebrotas em função da produtividade desejada e disponibilidade de potássio extraído com resina de troca iônica
Fonte: RAIJ, 1997.

Adubação com enxofre

Segundo Oliveira (*et al.*, 2007), em áreas com deficiência de enxofre, deve-se aplicar 30kg/ha desse elemento, sendo que a aplicação é desnecessária em áreas de plantação de cana-de-açúcar que receberam adubação com vinhaça e/ou gesso agrícola. Dentre as fontes de enxofre, são recomendáveis o sulfato de amônio (22% a 24% de S) e o superfosfato simples (10% a 12% de S).

Micronutrientes

Segundo Oliveira *et al.* (2007), grande parte das áreas de cultivo de cana no Brasil são ricas em micronutrientes fornecidos pelo solo. Nesses casos, não é necessária a aplicação desses elementos na adubação. No entanto, devido ao plantio em áreas menos férteis, associado à alta produtividade requerida, faz-se necessário o fornecimento de micronutrientes em alguns casos. A necessidade de adubação com micronutrientes deve ser determinada com base na análise do solo, além do histórico da área e da variedade. Dentre os extratores utilizados para análise química da disponibilidade de micronutrientes no solo, a solução de ácido dietiltriáminopentacético (DTPA) e o Mehlich 1 têm sido bastante empregados. O quadro a seguir mostra os limites de disponibilidade de micronutrientes no solo, extraídos com solução de DTPA e Mehlich 1, abaixo dos quais será necessária a adubação.

Disponibilidade	Extrator							
	DTPA			Elementos		Mehlich 1		
	Cu	Zn	Mn	Fe	Cu	Zn	Mn	Fe
	mg/dm ³							
Baixa	≤ 0,2	≤ 0,5	≤ 1,2	≤ 4,0	≤ 0,8	≤ 1,0	≤ 6,0	≤ 19
Média	0,3-0,8	0,6-1,2	1,3-5,0	5,0-12,0	0,8-1,2	1,0-1,5	6,0-8,0	19-30
Alta	> 0,8	> 1,2	> 5,0	> 12,0	> 1,2	> 1,5	> 8,0	> 30

Quadro 9: Valores mínimos de disponibilidade de micronutrientes no solo, extraídos com solução de DTPA e Mehlich 1

Fonte: Oliveira *et al.*, 2007.

3.5.7.4 Adubação orgânica

A adubação orgânica no cultivo da cana-de-açúcar consiste na utilização de fertilizantes não minerais, tais como os resíduos/subprodutos da indústria canavieira, para fertilização do solo. Dentre os resíduos passíveis de utilização na adubação da cana-de-açúcar destacam-se (ELETROBRÁS, 1983; OLIVEIRA *et al.*, 2007): a vinhaça, a torta de filtro, as cinzas das caldeiras e o bagaço da cana, procedentes da industrialização da cana-de-açúcar. Alguns desses resíduos são rotineiramente utilizados na adubação da cana-de-açúcar.

Também chamado de vinhoto, a vinhaça é subproduto da destilação do caldo de cana fermentado (vinho) para produção de álcool hidratado. Os volumes gerados nas usinas oscilam em torno de 12 a 15 m³ de vinhaça por m³ de álcool. Rica em matéria orgânica, potássio e cálcio, a vinhaça pode substituir total ou parcialmente a adubação mineral, além de suprir parcialmente o déficit hídrico e de nutrientes na cultura, motivo pelo qual sua aplicação na lavoura tornou-se prática corriqueira e indispensável nas destilarias. Devido à compatibilidade das exigências nutricionais das soqueiras, a aplicação de vinhaça é realizada geralmente nas rebrotas, após cada corte (ALMEIDA, 2007; ANDRADE & ANDRADE, 2007), e pode fornecer todo o K necessário para a cultura da cana. Sua utilização deve estar sujeita a análise química, uma vez que a composição da vinhaça varia dependendo da sua origem. A vinhaça pode ser obtida a partir da fermentação de caldo direto, caldo misto ou melaço de cana, sendo que o K presente no caldo misto é maior (oscila em torno de 2,5 kg/m³) em comparação com aquele presente no caldo direto (em torno de 1,2 kg/m³). No caso da vinhaça proveniente do caldo misto, ela pode ser aplicada até a dose de 150 m³/ha, depois da subsolagem adubação e cultivo do solo. Para sua utilização, a vinhaça é depositada em lagoas de decantação, onde é levada às áreas de cultivo através de sulcos de infiltração, aspersão ou caminhão-tanque.

A torta de filtro é um resíduo resultante do processo de clarificação do caldo de cana-de-açúcar (filtragem) na etapa industrial. É produzida à razão de, em média, 40 kg por tonelada de cana processada (ELETROBRÁS, 1983) e apresenta, no momento da extração, cerca de 80% de água na sua composição. A torta de filtro é rica em matéria orgânica, fósforo e cálcio (o P e o Ca presentes na torta de filtro variam entre 5,0 e 10 kg e 15 a 36 kg por tonelada de matéria seca, respectivamente), podendo substituir total ou parcialmente a adubação mineral no plantio da cana. A torta de filtro deve ser aplicada no fundo do sulco de plantio à razão de

30 t/ha, ou pode ser dobrada a dose em área total, complementada com fertilizante potássico (K_2O) à razão de 80 kg K_2O /ha (OLIVEIRA *et al.*, 2007).

O bagaço de cana é um resíduo pobre em nutrientes, no entanto ele pode ser compostado, juntamente com esterco de cama de frango e sulfato de amônio (OLIVEIRA, *et al.*, 2007), e aplicado no fundo do sulco de plantio da cana, à razão de 15 t/ha. A utilização do composto melhora as propriedades físicas do solo, principalmente a aeração e capacidade de retenção de água. Oliveira *et al.* (2007) relatam bons resultados no aumento da produtividade da cana-de-açúcar após a aplicação de composto com bagaço de cana em comparação com compostos mais ricos em nutrientes.

3.5.7.5 Adubação verde

A adubação verde consiste no cultivo de plantas, que não a cana-de-açúcar, para sua incorporação no solo durante a renovação do canavial, de modo a melhorar as propriedades físicas do solo. Existem vários tipos de plantas que podem ser utilizadas para este fim, sendo que as características desejáveis são (ELETROBRÁS, 1983):

- Possibilidade de mecanização, da semeadura à colheita de sementes;
- Ausência de sementes dormentes;
- Sistema radicular vigoroso e profundo;
- Capacidade de associar-se a bactérias fixadoras do nitrogênio do ar atmosférico;
- Crescimento rápido para controlar plantas daninhas;
- Possuir mecanismos ou sintetizar compostos que auxiliem no controle de pragas e doenças.

As leguminosas têm mostrado possuir essas características, dentre as quais as mais utilizadas são a *Crotalaria juncea*, na região Centro-Sul do país, e a *Crotalaria spectabilis*, em algumas regiões do Nordeste brasileiro. O cultivo de plantas para adubação verde pode resultar no acúmulo de nitrogênio de até 300 kg/ha sobre o solo, o qual garante maior produtividade da cana-de-açúcar na área de cultivo. O cultivo de crotalária no solo resulta no aumento da produtividade na cana-planta da ordem de 15 t/ha, em comparação ao acúmulo natural da área de pousio¹¹. Segundo Demattê (2004), o cultivo de crotalária durante a renovação do canavial,

¹¹ Pousio é o descanso temporário dado a uma terra cultivada.

assim como o cultivo de soja e amendoim, entre outros, mantém o solo coberto durante o período de maior precipitação, reduzido os perigos da erosão.

3.5.8 Tratos culturais

Os tratos culturais da cana-de-açúcar envolvem basicamente o controle de ervas daninhas, controle de doenças e controle de pragas na lavoura (ESTEVES, 1996; ANDRADE & ANDRADE, 2007), tanto para a cana-planta quanto para a cana-soca. Nos tratos culturais da cana-soca, estes envolvem ainda operações superficiais para promover o rebrote.

3.5.8.1 Controle de ervas daninhas

Cana-planta

O controle de ervas daninhas é o principal trato cultural a ser realizado na cana-planta. De acordo com Andrade & Andrade (2007), existem vários métodos de controle de plantas daninhas, entre eles: controle preventivo, cultural, manual, mecânico e químico. O ideal é a combinação de dois ou mais métodos, ou seja, o manejo integrado.

O controle preventivo consiste na utilização de mudas sadias, livres de disseminulas das plantas daninhas; manutenção dos canais de irrigação ou de vinhaça livres de plantas daninhas; manter limpos os equipamentos agrícolas; utilizar torta de filtro e/ou composto orgânico livres de plantas daninhas; limpar as áreas e carregadores adjacentes.

As medidas culturais dizem respeito à adoção de práticas que favorecem competitivamente a cultura da cana-de-açúcar. Entre elas: escolha de variedades adaptadas a condições locais, de rápido crescimento e ocupação de espaço; espaçamento mais adensado; rotação, sucessão e consórcio de culturas, as quais evitam a predominância de determinadas ervas daninhas.

O controle manual, mecânico e/ou químico depende da área plantada, grau de mecanização e mão-de-obra disponível. Estes tipos de controle devem ser especialmente realizados nos primeiros 100 dias após o plantio, período de competição considerado crítico para a cana-planta. O controle manual (capina) é realizado com enxadas e só é viável em pequenas áreas. São necessários, em média, 15 homens/dia/ha para realizar uma capina, sendo que, dependendo do grau de infestação, são necessárias três capinas até que a cana feche e abafe o mato. A capina mecânica pode ser realizada utilizando cultivadores de tração animal ou tratores e, à semelhança da capina manual, são necessárias até três capinas para favorecer o

crescimento da cana. A capina mecânica tem a desvantagem de controlar o mato somente nas entrelinhas, sendo que às vezes é necessário realizar capina manual nas linhas. Além disso, a capina manual é efetiva somente na etapa de desenvolvimento inicial das plantas daninhas. Ainda conforme Andrade & Andrade (2007), a capina química é o método de controle mais utilizado atualmente. Consiste na aplicação de herbicidas por meio de pulverizadores de barra acoplados a trator. A aplicação de herbicidas pode ser realizada antes (pré-emergência) ou depois (pós-emergência) do surgimento das plantas daninhas, e deve ser consultada por um engenheiro agrônomo, devido à variedade de herbicidas registrados disponíveis no mercado (vide ANEXO A).

Cana-soca

Em áreas onde houve queima prévia do canavial antes da colheita, o controle de ervas daninhas nas soqueiras é realizado por meio de herbicidas específicos aplicados com pulverizadores de barra acoplados a trator (Andrade & Andrade, 2007), após o aleiramento da palha, subsolagem, cultivo e adubação. Dá-se preferência àqueles herbicidas que não dependem muito da umidade no solo, já que no período de maio a agosto, início e meio da safra, as condições de umidade são inadequadas. Este controle deve ser feito nos primeiros 60 dias após cada corte do canavial, período que corresponde à etapa crítica de competição do mato nas soqueiras. Assim mesmo, dependendo da área, o controle de ervas daninhas na cana-soca também pode ser realizado por meio de capina mecânica e/ou uso de enxadas. No caso de presença de palha na área de rebrota, este exerce bom controle das ervas daninhas pelo qual a aplicação de herbicida é realizada de forma dirigida, somente nas áreas em que há brotação de mato. O herbicida é aplicado por meio de pulverizadores costais motorizados ou manuais. No caso de pequenas áreas, o controle do mato poderá ser feito por meio de enxadas.

3.5.8.2 Controle de doenças

Existem várias doenças comumente encontradas na cultura da cana-de-açúcar no Brasil, as quais podem ocasionar prejuízos importantes na produção do canavial. O controle das doenças da cana-de-açúcar é realizado principalmente através da utilização de variedades resistentes a tais doenças, *rouguing* e tratamento térmico (ANDRADE & ANDRADE, 2007). Como explicado anteriormente, o *rouguing* consiste na erradicação de plantas infectadas nos viveiros de mudas e em áreas de plantio comercial, sendo que o tratamento térmico é realizado pela imersão de toletes em água quente. O controle de doenças pode ser realizado

também por meio de fungicidas (ESTEVEZ, 1997). O ANEXO B apresenta uma relação das principais doenças presentes nos canaviais brasileiros, seus agentes causais, os sintomas, as formas de transmissão e suas formas de controle.

3.5.8.3 Controle de pragas

O controle de pragas ocorre em maior grau através da aplicação de pesticidas ou inseticidas específicos. Outra alternativa bastante freqüente é o controle biológico de pragas. No caso da cana-planta, a aplicação de inseticida pode começar logo após o lançamento das mudas, colocando o produto sobre os toletes distribuídos nos sulcos. Desta forma, tanto para a cana-planta quanto para a cana-soca, principalmente na fase inicial da brota/rebrota do canavial, deve-se fazer um controle eficiente de formigas com pessoal bem treinado na identificação de olheiros e aplicação de formicidas em pó, grânulos ou líquido, os quais são transformados em gases, por meio da termonebulização, que é o processo mais empregado atualmente nos canaviais brasileiros (ANDRADE & ANDRADE, 2007). O controle de formigas deve ser efetuado com rigor na fase inicial de desenvolvimento das plantas, no entanto, deve ser realizado continuamente, ao longo do desenvolvimento da cana. Além das formigas, as pragas de maior incidência nos canaviais brasileiros são: a broca-comum, a cigarrinha-das-raízes e os cupins subterrâneos. O ANEXO C mostra as principais pragas da cana-de-açúcar e suas formas de controle.

3.5.8.4 Tratos culturais superficiais cana-soca

As operações de preparo do solo após a colheita dependem principalmente da realização de queima prévia do canavial antes da colheita ou não realização dessa operação. A queima do canavial é prática adotada geralmente para facilitar a colheita manual, enquanto que para a colheita mecanizada usualmente não ocorre esta queima.

No caso de queima do canavial para colheita manual, mesmo fazendo essa operação, ficam no solo restos de folhas e pontas de cana não queimadas, o que constitui o palhicho, que chega a ser de 3 a 4 toneladas por hectare (ELETROBRÁS, 1983). Para facilitar as operações subseqüentes, se faz o aleiramento do palhicho por meio de aleiradoras ou ancinhos rotativos acoplados a trator. O rendimento das aleiradoras pode ser de 1,0 a 3,0 ha/hora, utilizando-se tratores de 65 a 80 HP (CORBINI *apud* ANDRADE & ANDRADE, 2007). Depois do aleiramento, o cultivo é realizado por meio de cultivadores específicos desenvolvidos para a cana-soca, os quais realizam tríplex operação de forma simultânea: subsolagem, adubação e

cultivo. O rendimento dos cultivadores oscila entre 0,75 e 1,00 ha/hora, por meio de tratores de 90 a 120 HP.

Quando não existe queima prévia do canavial antes da colheita (prática geralmente adotada na colheita mecanizada), a palha não pode ser aleirada devido ao volume do mesmo, o qual é de 12 a 15 t/ha (ANDRADE & ANDRADE, 2007), ou de 15% a 30% da parte aérea da cana (RIPOLI & GAMERO, 2007). Neste caso, a subsolagem, cultivo e adubação é realizada por meio de cultivadores específicos, diferentes dos cultivadores de soqueiras comuns, que realizam o corte prévio da palha para realizar essas operações em profundidade no solo. A presença do palhicho não afeta o crescimento da cana-soca, somente ocasiona um pequeno atraso na rebrota do canavial, além de conservar melhor a umidade do solo e exercer bom controle sobre as ervas daninhas. Nestas áreas, a adubação poderá ser feita sobre a palha e o controle de ervas daninhas poderá ser realizado em espaços específicos, apenas onde o mato aparece.

3.5.9 Irrigação

Um dos fatores que contribuem para o aumento da produtividade nos canaviais é a implementação adequada de um sistema de irrigação. A irrigação traz enormes benefícios para o cultivo da cana-de-açúcar, entre eles (COSTA *et al.*, 2007): incremento na produtividade pela redução do custo unitário de produção; uso do solo durante todo o ano; redução da sazonalidade de produção; incorporação de novas áreas no complexo agrícola no Cerrado e Semi-Árido, com maior garantia de colheita para o produtor rural pela redução do fator risco; maior qualidade dos produtos agrícolas; aplicação de novas tecnologias como a quimigação; produção de mudas de alta qualidade que contribuem para o aumento da produtividade em geral; conservação do solo e da água; e possibilidade de criação de pólos agroindustriais para o aproveitamento do produto das áreas irrigadas.

O bom manejo da irrigação é fator fundamental para o sucesso na obtenção dos benefícios desta prática, já que o excesso e/ou déficit de água aplicada podem levar a condições desfavoráveis ao desenvolvimento da cana, o qual resulta na queda da produtividade do canavial, além de aumentar os custos com energia de bombeamento e aplicação de fertilizantes. Por esta razão, é necessário que o agricultor conheça, dentre outros fatores, o momento ideal de irrigação e a lâmina a ser aplicada.

A irrigação nos diferentes estágios de desenvolvimento da cana deve ocorrer da seguinte forma (COSTA *et al.*, 2007):

- a. Estabelecimento: irrigações leves e freqüentes;
- b. Vegetativo inicial: o perfilhamento é diretamente proporcional à freqüência de irrigação. As irrigações devem ser mais freqüentes;
- c. Alongamento do caule e inícios de formação da colheita: o intervalo pode ser ampliado. Porém, o consumo de água nesse período é maior que o anterior, em razão da maior área foliar e, por isso, a lâmina deve ser aumentada;
- d. Maturação; nessa fase os intervalos de irrigação devem ser ampliados ou a irrigação deve ser suspensa, para que a cultura atinja a maturação com a máxima concentração de sacarose.

3.5.9.1 Manejo da irrigação

Como mencionado anteriormente, o momento certo de iniciar a irrigação, assim como a quantidade certa de água a ser aplicada, constituem os fatores principais para o bom manejo da irrigação. Com respeito à quantidade de água a ser usada na irrigação sem prejuízos para a cultura, conforme Costa *et al.* (2007), esta está ligada à demanda climática da atmosfera e ao estágio de desenvolvimento da cana-de-açúcar. Nesse sentido, a determinação do consumo máximo de água permitido (FAD – mm) sem prejuízos para a cultura, entre dois ciclos de irrigação, considerando a água disponível total do perfil do solo (AD – mm), pode ser realizada por meio da curva de retenção de água do solo (FIG. 12), a qual é obtida com base em amostras do solo na área de exploração radicular (até 40 cm). Estas amostras são encaminhadas ao laboratório de física do solo, onde é determinada a relação entre a umidade do solo ($\theta - \text{cm}^3/\text{cm}^3$ ou g/g) e a tensão da água retida no solo ou potencial matricial ($\psi_m - \text{kPa}$). Com base em informações do teor de água na capacidade de campo (θ_{CC}) e no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), obtêm-se o teor de água crítico (θ_c) e o potencial matricial crítico correspondente (ψ_{mc}), considerando o fator de disponibilidade de água do solo (f). Sendo $FAD = f(\theta_{CC} - \theta_{PMP})$. O fator de disponibilidade de água no solo representa a porcentagem de água disponível no solo que pode ser consumida pela cultura sem prejuízos à produção. Este fator depende da demanda atmosférica de água, a qual está relacionada à evapotranspiração de referencia máxima da região ($ET_{O_{MAX}} - \text{mm/dia}$) (QUADRO 10). De modo geral, quando a

demanda atmosférica é grande, é necessário trabalhar com valores pequenos de f , o que leva à realização de irrigações mais frequentes e vice-versa.

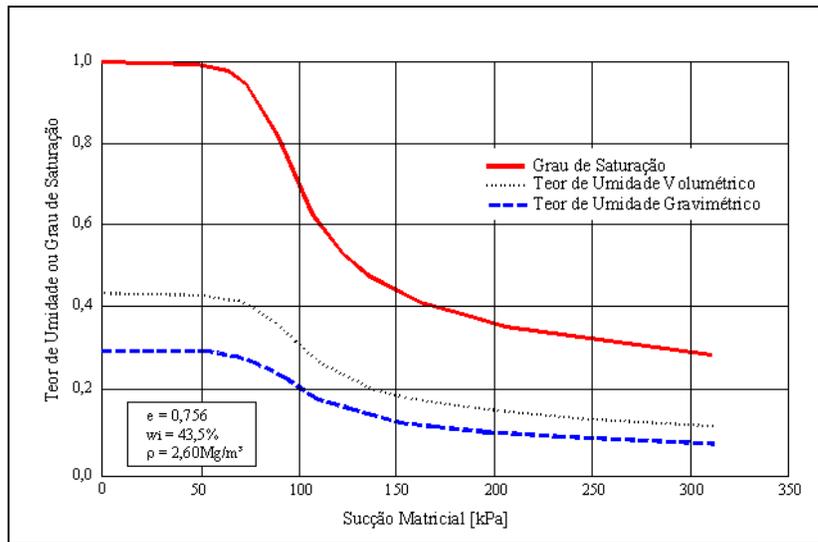


Figura 12: Curva de retenção da água do solo

Fonte: Fredlund & Xing *apud* Silva (2005)

ET_{0MAX} (mm/dia)	2	3	4	5	6	7	8
f	0,85	0,80	0,70	0,60	0,55	0,50	0,45

Quadro 10: Porcentagem de água do solo que pode ser consumida pela cultura em função da evapotranspiração de referência máxima da região

Fonte: Doorenbos e Kassan *apud* Costa *et al.*, 2007.

Outra forma de determinar a quantidade de água a ser usada na irrigação, é calculando a lâmina bruta (L_b) de água a ser aplicada:

$$L_b = \frac{ET_c}{E_a} \quad (3.3)$$

na qual:

ET_c = Evapotranspiração da cultura

E_a = Eficiência de aplicação de água pelo sistema de irrigação

Neste caso, a evapotranspiração da cultura (E_c) é calculada multiplicando a evapotranspiração de referência da região (ET_0) pelo coeficiente de cultivo (K_c). Este método de determinação da quantidade de água a ser aplicada na cultura apóia-se no fato de que E_c corresponde à quantidade real de água a ser reposta nas plantas durante a irrigação. O QUADRO 11 apresenta os valores de K_c para os diferentes períodos de desenvolvimento da cana-de-açúcar, tanto para a cana-planta quanto para a cana-soca. Conforme Costa *et al.* (2007), estes valores

devem ser verificados em ensaios regionais, uma vez que a necessidade hídrica da cultura é afetada pelo desenvolvimento da planta, o qual varia em diferentes condições edafoclimáticas.

Período de desenvolvimento	Dias do ciclo	Coefficiente de cultura (Kc)
Do plantio até 0,25 de cobertura	30 a 60	0,40 a 0,60
De 0,25 a 0,50 de cobertura	30 a 40	0,75 a 0,85
De 0,50 a 0,75 de cobertura	15 a 25	0,90 a 1,00
De 0,75 à cobertura completa	45 a 55	1,00 a 1,20
Utilização máxima	180 a 330	0,80 a 1,05
Início de senescência	30 a 150	0,80 a 1,05
Maturação	30 a 60	0,60 a 0,75

Quadro 11: Valores de Kc para cana-de-açúcar

Fonte: Doorenbos e Kassam *apud* Santos, 2005.

3.5.9.2 Métodos de irrigação

Segundo Costa *et al.* (2007), a cana-de-açúcar pode ser irrigada por qualquer sistema de irrigação, seja por superfície, aspersão ou irrigação localizada. Não existe um sistema indicado para a irrigação, sendo que este deve ser escolhido em função de fatores tais como o tipo de solo, clima, topografia, custo do sistema, uso de mão-de-obra e energia, incidência de pragas e doenças, além da quantidade e qualidade de água disponível.

Dentre os métodos de irrigação de superfície mais adotados destaca-se o sistema de irrigação por sulcos, por meio dos quais a água é conduzida sobre a superfície do solo. O espaçamento entre sulcos permite irrigar até duas linhas de plantas por vez. Este sistema, que consome maior quantidade de água em comparação com os sistemas pressurizados (por tubos), é adotado principalmente em solos de textura areno-argilosa, argilosa e muito argilosa, tais como os Argilosolos, Cambissolos e Vertissolos (SANTOS, 2005). Já os métodos de irrigação por aspersão, tais como o pivô central, a aspersão convencional e o autopropelido, caracterizam-se por simular uma chuva em cima da copa da cultura.

A irrigação localizada é o sistema que apresenta maiores vantagens quanto à eficiência, melhor controle da lâmina aplicada e redução de perdas por evaporação, percolação e escoamento superficial (COSTA *et al.*, 2007). Além disso, este sistema é mais eficiente na aplicação de fertilizantes (fertirrigação) nas mais diversas condições ambientais, uma vez que permite a aplicação de nutrientes via água de irrigação junto à planta, ali onde a concentração de raízes é maior. Outras vantagens do sistema são: menor consumo de energia e menor umidade na parte aérea da planta, reduzindo a incidência de doenças. Entre as desvantagens estão: necessidade de um bom sistema de filtragem, alto custo inicial e mão-de-obra

especializada. Dentre os sistemas de irrigação localizada, destaca-se o gotejamento subsuperficial, onde a água é distribuída uniformemente por debaixo da superfície do solo, na região das raízes da planta, formando um bulbo úmido. Este sistema permite maior eficiência no uso da água, menor consumo de energia e menor incidência das condições climáticas na área de irrigação.

3.5.10 Colheita

O planejamento da colheita é um dos fatores que intervêm na qualidade de matéria prima para a industrialização da cana-de-açúcar, portanto, é determinante para a obtenção de bons resultados no processo industrial. Pelo menos dois fatores devem ser levados em conta antes da colheita: o momento ideal de corte da cana e o tipo de equipamento a ser utilizado.

Segundo Xavier (2007), o melhor momento para iniciar a colheita da cana é quanto esta atinge sua maior concentração de açúcares (sacarose, glicose e frutose), o qual depende de fatores tais como: região de cultivo, condições climáticas, idade da cultura, variedade, tipo de solo, pragas e doenças. A maturidade da planta é determinada por pré-análises laboratoriais na própria indústria, as quais indicam o momento oportuno de realização da colheita. O QUADRO 12 mostra os indicadores de qualidade recomendados para a colheita da cana-de-açúcar.

Quanto ao tipo de equipamento a ser utilizado para as operações de colheita, este depende principalmente do tipo de colheita: colheita manual ou colheita mecânica, de cana crua ou cana queimada.

3.5.10.1 Colheita manual

A colheita manual com queima prévia do canavial é ainda o tipo de colheita mais utilizado no Brasil (SOARES *et al.*, 2009), no entanto, a colheita manual também pode ser realizada sem queima prévia do canavial. A queima é adotada principalmente para eliminar as palhas e assim aumentar o rendimento de corte, além de minimizar o conteúdo de palhiço na matéria prima para a indústria (ANDRADE & ANDRADE, 2007), aspectos que ajudam a diminuir o custo operacional. Entre as desvantagens da queima podem-se citar (XAVIER, 2007): emissão de poluentes, perda de açúcares pela exsudação, tempo limitado para corte/moagem, perda de matéria orgânica e umidade no solo, e maior presença de plantas daninhas.

Indicador	Valor recomendado
POL ⁽¹⁾	> 14
Pureza (POL/Brix ¹²)	> 85%
ART ⁽²⁾ (sacarose, glicose, frutose)	> 15% (maior possível)
AR ⁽³⁾ (glicose, frutose)	< 0,8 %
Fibra	11% a 13%
Tempo de queima/corte	< 35 horas para cana com corte manual
Terra na cana (minerais)	< 5 kg/t cana
Contaminação da cana	< 5,0×10 ⁵ bastonetes/ml no caldo
Teor de álcool no caldo da cana	< 0,06% ou 0,4%Brix
Acidez sulfúrica	< 0,80
Dextrana	< 500 ppm/Brix
Amido na cana	< 500 ppm/Brix
Broca na cana	< 1,0 %
Índice de Honig-Bogstra	> 0,25
Palhiço na cana	< 5%
Ácido aconítico	< 1500 ppm/Brix

(1) Porcentagem de sacarose aparente contida no caldo de cana

(2) Açúcares redutores totais

(3) Açúcares redutores

Quadro 12: Indicadores de qualidade da cana-de-açúcar

Fonte: XAVIER, 2007.

O rendimento do corte manual varia em função da variedade, idade do corte, cana em pé ou deitada, topografia do terreno, cana crua ou queimada, esteirada ou em montes, com desponte ou sem desponte e as condições climáticas, entre outros (XAVIER, 2007). A realização de corte manual sem queima prévia do canavial é realizada preferentemente no corte de mudas, onde o rendimento é da ordem de 3 a 4 t/homem/dia. Já no caso de corte manual de cana queimada, o rendimento é de 7 a 10 t/homem/dia.

Posteriormente ao corte, segue o carregamento da cana cortada, o qual deve ser realizado evitando a contaminação mineral e vegetal, assim como as perdas durante a operação e transporte até a usina. O carregamento é realizado por meio de carregadoras mecânicas acopladas a tratores (guinchos), quando o terreno possui declive de até 12%. Quando o terreno possui declives superiores a 12%, são usadas autopropelidas, comuns em Pernambuco e Alagoas (XAVIER, 2007). As carregadoras/autopropelidas realizam o carregamento em sincronia com o caminhão, encarregado do transporte até a indústria. O rendimento médio do carregamento é de 30 a 40 t/h, o qual depende de fatores tais como: topografia do terreno, disposição da cana no solo após o corte, capacidade do operador, sincronismo com o

¹² O Brix, ou Grau Brix (B), é a percentagem em massa dos sólidos dissolvidos em solução de açúcar, geralmente medido por um dosímetro calibrado a 20°C. Para altos índices de pureza, mede, aproximadamente, o teor de sacarose. Pode também ser medido por um refratômetro, sendo a pureza aparente calculada por 1/B (CEMIG, 1990).

caminhão, programação de abastecimento e manutenção. Esses fatores também afetam a qualidade da matéria prima e perdas no carregamento. Posterior ao carregamento, ocorre a catação de bitucas, isto é, canas inteiras ou em pedaços que caem durante a operação de carregamento. Estas são amontoadas e enviadas à indústria, o que deve ser feito no menor tempo possível, para evitar problemas de qualidade.

3.5.10.2 Colheita mecânica

A colheita mecanizada com cana crua, se realizada corretamente, pode elevar a qualidade da matéria prima, possibilitando maior teor de matéria orgânica, menor compactação do solo, maior retenção de umidade e menor aparecimento de plantas daninhas, entre outros. No entanto, este tipo de colheita pode propiciar maior aparecimento de pragas, risco de incêndio da palha e dificuldade de brotação de algumas variedades, uma vez que o corte mecânico pode inibir o desenvolvimento normal das socas. Quanto ao rendimento, a colheita mecânica com cana queimada é 12% a 15% maior que com cana crua (XAVIER, 2007), já que o processo de corte e a visualização do canavial são melhores. Considerando o corte mecânico com cana crua, o rendimento de corte pode chegar a ser de 700 a 800 t cana/dia/colhedora, considerando 24 horas de trabalho da colhedora. Para otimizar o rendimento da colheita mecanizada, esta deve ser bem planejada, levando em conta fatores como: dimensionamento de talhões; sistematização do solo; variedades apropriadas; velocidade adequada de trabalho e manobras corretas e precisas; e sincronismo com o caminhão e/ou transbordo, entre outros.

Uma vez que a colheita manual é geralmente praticada com queima prévia do canavial, existe já, em Minas Gerais, uma deliberação normativa que regulamenta a queima da cana-de-açúcar para fins de colheita (MINAS GERAIS, 2009). Assim mesmo, o setor sucroalcooleiro do Estado se comprometeu a eliminar totalmente a queima da cana até 2014 (SIAMIG/SINDAÇÚCAR, 2008). Estes fatores, dentre outros, promovem a adoção da colheita mecanizada, a qual pode ser realizada com cana crua ou queimada.

3.5.10.3 Uso de maturadores e inibidores de florescimento antes da colheita

Os maturadores são produtos químicos que promovem o amadurecimento da planta, alterando seu ciclo normal de desenvolvimento. Estes são usados para antecipar o início da safra e manter o teor de sacarose até o final da mesma. Segundo Xavier (2007), a aplicação de maturadores é via aérea, na dose de 30 a 40 L/ha. O florescimento da cana-de-açúcar é indesejável em algumas variedades da planta, já que este está associado à perda de sacarose e

peso da cana, devido à isoporização. Nesses casos, os inibidores de florescimento, quando aplicados no períodos propícios de indução floral (entre início de fevereiro e meados de março), podem ajudar a minimizar as perdas de qualidade devidas ao florescimento.

3.6 Industrialização da cana-de-açúcar: fabricação do etanol

O processo de industrialização da cana-de-açúcar pode apresentar diferenças significativas de uma usina para outra, dependendo principalmente dos produtos fabricados e do tipo de tecnologia utilizado. No caso específico da fabricação de etanol da cana-de-açúcar em escala industrial, os processos utilizados podem ser representados, de forma genérica, pelo fluxograma apresentado na FIG. 13. A seguir são expostos mais detalhadamente esses processos.

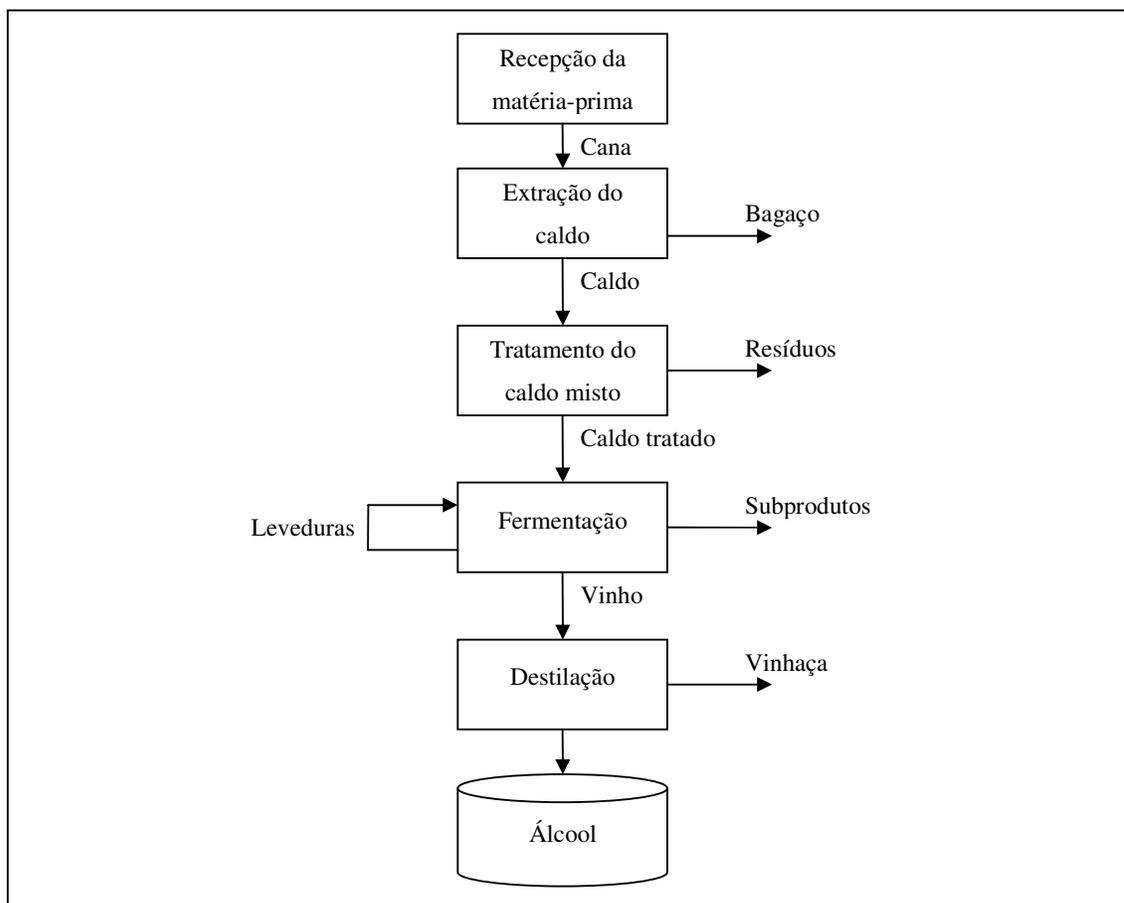


Figura 13: Processo de fabricação de etanol da cana-de-açúcar
Fonte: Adaptado de CEMIG (1990).

3.6.1 Recepção da matéria-prima

O processo de fabricação de etanol da cana-de-açúcar começa pela recepção da matéria prima, a qual consta de várias operações características (FIG. 14). Na chegada à usina, os caminhões são primeiramente submetidos à pesagem, operação normalmente realizada com o caminhão carregado. Uma vez descontado o peso do caminhão vazio, pode-se determinar a quantidade de matéria prima transportada. A pesagem é geralmente realizada com uma balança do tipo rodoviário, com capacidade de 120 t, em plataforma de 3,20×36 m (BARRETO JÚNIOR, 2007). Durante esta operação, também é realizada a identificação dos caminhões, com informações tais como: talhão de origem da cana transportada, variedade, horas de queima e tipo de colhedora utilizada, entre outros.

Depois da pesagem, procede-se à amostragem da cana recebida, para caracterização e determinação da sua composição, a partir de análises laboratoriais. A pesagem e a determinação da composição da cana são essenciais para o controle de processo e para a determinação do preço a ser pago ao fornecedor. De modo geral, o valor da cana-de-açúcar é função do seu peso e teor de ART.

Posteriormente, realiza-se o descarregamento da matéria prima, processo que pode ser efetuado por meio de guindastes estacionários, chamados hilos, os quais basculam a carga, ou através de pontes rolantes, as quais suspendem a carga abraçada a correntes e a depositam diretamente na mesa alimentadora, no depósito ou no pátio. A mesa alimentadora é um equipamento provido de correntes tracionadas por um sistema de engrenagens, as quais são acionadas por um motor com variação de velocidade, permitindo o controle de dosagem da cana para a esteira anexa ao equipamento. A cana que é diretamente descarregada na mesa alimentadora é logo submetida a lavagem, por meio de jatos de água, na própria mesa, operação fundamental para retirada do material inerte proveniente das operações de colheita, carregamento e transporte. A quantidade de material inerte pode variar de 4% do peso total, no período seco, a 15%, no período chuvoso (CEMIG, 1990). No caso de descarregamento da cana em depósito, é aconselhável que o tempo de estocagem não ultrapasse dois dias, período após o qual a matéria prima pode sofrer alterações na sua qualidade. A estocagem da cana é geralmente realizada para garantir o fluxo constante do processo durante a noite, já que o fornecimento de matéria prima ocorre normalmente de dia.

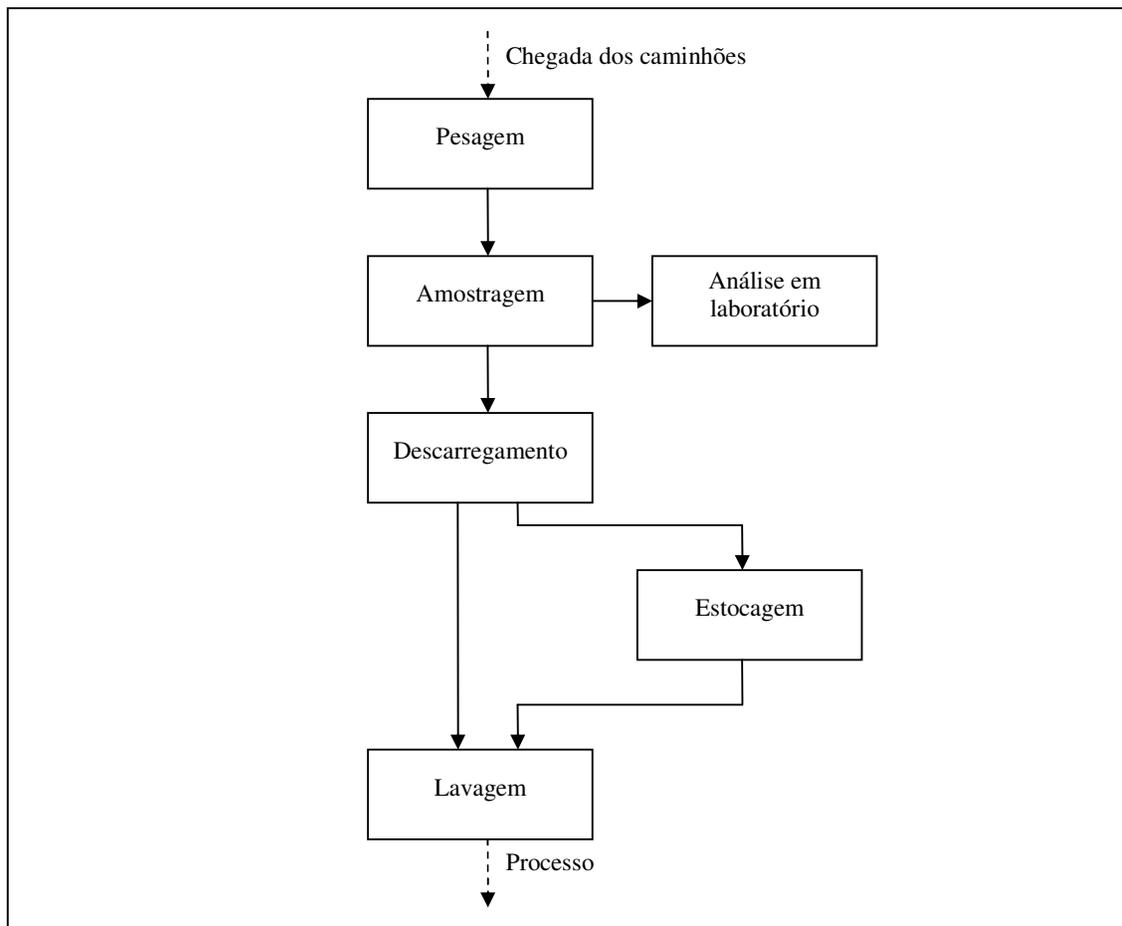


Figura 14: Recepção da matéria prima na fabricação de etanol da cana-de-açúcar
 Fonte: Adaptado de CEMIG (1990).

3.6.2 Extração do caldo

O caldo de cana é normalmente obtido por moagem, processo de esmagamento da cana por meio de rolos ou cilindros através dos quais a cana é submetida a pressão física para extrair o caldo. Para que os cilindros possam esmagar a cana com maior eficiência, esta deve ser previamente picada e desfibrada. Sendo assim, a cana lavada é transportada, por meio da esteira anexa à mesa alimentadora, até um picador e um desfibrador. A picagem tem o objetivo de reduzir o tamanho dos pedaços da cana a ser moída, diminuindo assim a resistência física da cana à moagem. Já o desfibramento tem o objetivo de abrir as células residuais para facilitar o posterior esmagamento. Estas operações permitem a abertura de 83% a 85% das células da cana (BARRETO JÚNIOR, 2007). A picagem é realizada por um picador dotado de um sistema de facas, o qual é normalmente acionado por turbinas a vapor de contrapressão ou motores elétricos. A cana picada, por meio de um cilindro alimentador, é

conduzida ao desfibrador de cana, o qual está provido de um sistema de martelos e uma placa desfibradora.

A cana, uma vez picada e desfibrada, passa por um espalhador, o qual uniformiza o leito de alimentação da cana para a esteira rápida. Esta última conduz a cana desfibrada até as moendas. A esteira rápida transporta a cana desfibrada a uma velocidade de 12 a 50 m/min (BARRETO JÚNIOR, 2007), o qual possibilita o movimento da cana a uma altura baixa acima do nível da esteira. Isto favorece a ação do eletroímã localizado sobre a esteira rápida e/ou antes das moendas ou dos desfibradores (aproximadamente a 40 cm da superfície da esteira). O eletroímã é encarregado de reter material ferroso que poderia ocasionar danos às moendas.

Uma moenda é constituída por um conjunto de três ou quatro cilindros¹³ denominado terno (FIG. 15). O conjunto de ternos/moendas denomina-se tandem. A velocidade de alimentação das moendas pela esteira rápida é automaticamente controlada por meio de sensores localizados na entrada às moendas, no chute de alimentação, o qual é uma caixa metálica instalada sobre a entrada. No chute de alimentação, a descarga da matéria prima deve exercer pressão suficiente sobre os rolos da moenda. Os sensores determinam a velocidade de alimentação desde a mesa alimentadora, em função da necessidade das moendas e do sistema de proteção de sobrecarga no acionamento.

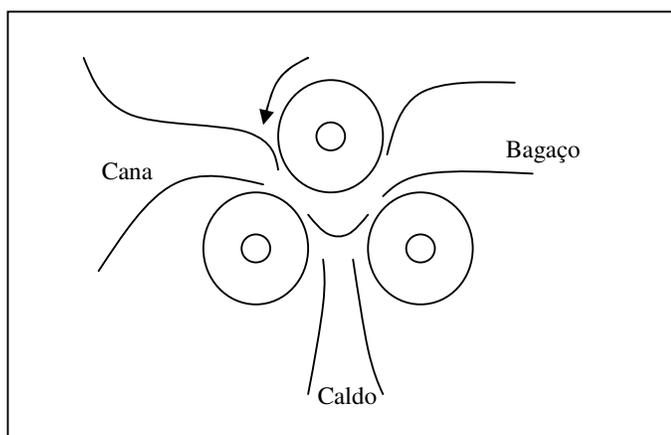


Figura 15: Terno para moagem

Fonte: Esteves, 1996.

¹³ Segundo Barreto Junior (2007), o terno é composto por um conjunto de quatro cilindros: superior, de pressão, de entrada e de saída.

Um tandem normalmente possui de três a seis ternos, sendo o mais comum o de quatro ternos, onde no primeiro é extraído o caldo puro, isto é, sem adição de água. O bagaço resultante desta primeira extração passa aos ternos seguintes onde a extração é complementada com água de embebição ou caldo diluído. O tipo de embebição mais comum é o sistema de embebição composta, que consiste na adição de água ao último terno (ou aos dois últimos), de modo que o caldo recicle para o terno imediatamente anterior, até chegar ao segundo terno, em contracorrente com o bagaço, de modo que o caldo da primeira (caldo puro) e da segunda moenda (caldo diluído) são misturados, formando o caldo misto (FIG. 16).

O caldo misto é posteriormente peneirado em uma peneira ascendente (cush-cush), onde são retiradas as partes mais grossas do caldo, tais como pedaços de cana e de bagaço, os quais retornam à primeira moenda. O caldo resultante desse primeiro peneiramento é enviado para um segundo peneiramento, em um conjunto de peneiras vibratórias, as quais possuem malha mais fina. Aqui é retirado o bagacinho¹⁴ (ou bagacilho), o qual é enviado para o filtro rotatório a vácuo, juntamente com os sólidos sedimentados no tratamento do caldo. Segundo a CEMIG (1990), no sistema de extração do caldo com água de embebição, a extração de açúcares da cana chega a ser de 88% a 92%, sendo que com o uso de moendas de 4 rolos, esta extração pode chegar a ser de 97%.

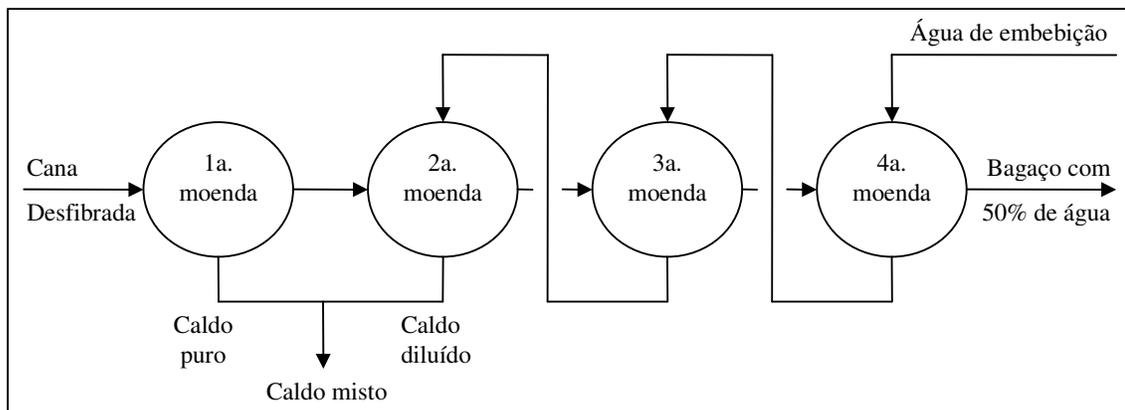


Figura 16: Circuito de moagem com embebição composta

Fonte: CEMIG, 1990.

O bagaço resultante da extração do caldo, o qual possui 50% de água aproximadamente, é enviado às caldeiras por meio de correias transportadoras ou, caso haja excedente, é enviado ao pátio junto às caldeiras, para uso oportuno em caso de necessidade. De modo geral, as

caldeiras são pré-aquecidas com lenha, para depois se utilizar exclusivamente o bagaço, de forma contínua para geração de vapor. A FIG. 17 esquematiza todo o processo de extração por moagem.

O caldo de cana também pode ser obtido por difusão, método que ainda é pouco utilizado no Brasil. A extração por difusão consiste na deslocação da sacarose da cana de dentro das células para a solução ou caldo fora das mesmas, através de uma membrana. A deslocação ocorre devido ao gradiente de concentração de açúcar dentro e fora das células, ou seja, o açúcar presente nestas, onde há maior concentração, migra em direção ao caldo, onde a concentração de açúcar é menor, até alcançar o equilíbrio entre as fases separadas pela membrana.

3.6.3 Tratamento do caldo misto

Antes de passar para o processo de fermentação, normalmente o caldo misto obtido do processo de moagem é previamente tratado. O processo de tratamento possui várias etapas, as quais podem ser parcialmente ou mesmo totalmente eliminadas, conforme o tipo de usina. A eliminação de etapas do tratamento do caldo ocorre em certas destilarias autônomas¹⁵, sendo que as usinas de açúcar, de modo geral, empregam um processo completo de tratamento do caldo, devido a exigências de qualidade para produção de açúcar. Segundo o Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (*apud* ESTEVES, 1996), algumas unidades do parque industrial brasileiro eliminam o tratamento prévio do caldo enviando-o diretamente para a seção de fermentação, para evitar paradas que possam resultar na deposição de impurezas no caldo.

O tratamento do caldo misto consta das seguintes etapas (CEMIG, 1990; BARRETO JUNIOR, 2007): sulfitação, calagem, tratamento térmico, decantação, filtração e evaporação. A sulfitação consiste na adição de dióxido de enxofre (SO₂) no caldo misto. O SO₂ é obtido na própria usina, a partir da queima de enxofre. O objetivo da sulfitação é branquear as moléculas de sacarose, promover a floculação de colóides dispersos no caldo, destruir corantes e formar produtos insolúveis com as impurezas presentes no caldo. A sulfitação é realizada com equipamentos adequados, através de multijatos ou colunas de sulfitação em contracorrente.

¹⁴ Bagaço finalmente fragmentado que é separado do caldo misto por peneiramento na saída do tandem de moendas (CEMIG, 1990).

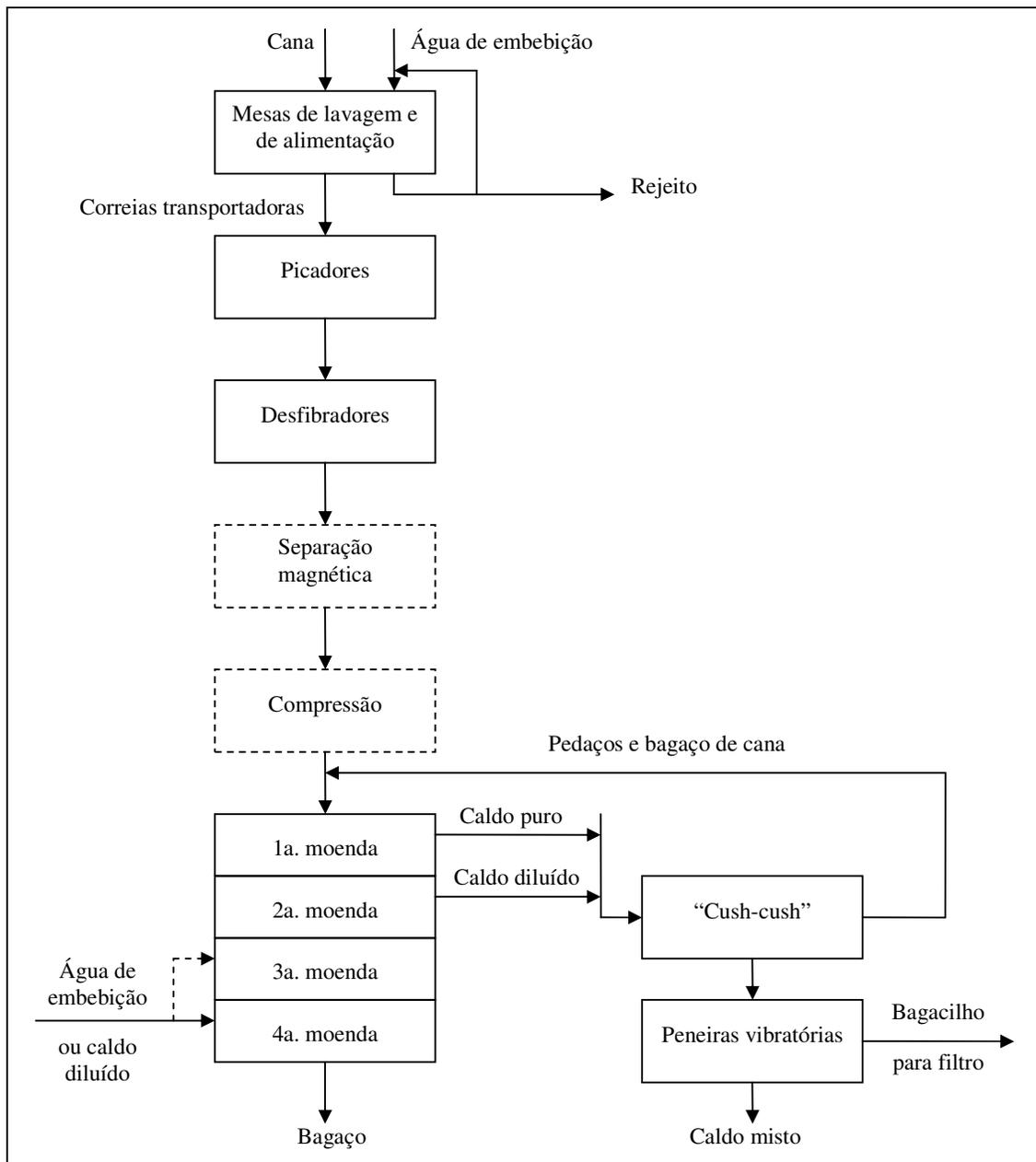


Figura 17: Extração do caldo de cana por moagem

Fonte: CEMIG, 1990.

O processo de sulfitação resulta no rebaixamento do pH do caldo (de 3,8 a 4,5), pelo qual este deve ser submetido a calagem. A calagem, processo que consiste na adição de leite de cal hidratada ao caldo de cana, é realizada para a correção do pH (de 5,8 a 6,6) e formação de compostos insolúveis, os quais serão posteriormente removidos no processo de decantação para clarificação do caldo. A calagem pode ser realizada a quente ou a frio, sendo que a

¹⁵ Destilarias autônomas são aquelas que se dedicam exclusivamente à produção de álcool, a diferença das

quantidade necessária de leite de cal é determinante para a consecução dos objetivos da operação. Se a quantidade de cal for menor à ideal, isto prejudica a decantação do caldo, além de promover a inversão da sacarose. Se a quantidade de cal for maior que a necessária, existe formação de sais de cálcio de coloração escura e há aumento na formação de gomas e cinzas, além de que a evaporação e cristalização do açúcar são retardadas. Se necessário, para melhorar a clarificação do caldo, é adicionado ácido fosfórico em pequena quantidade.

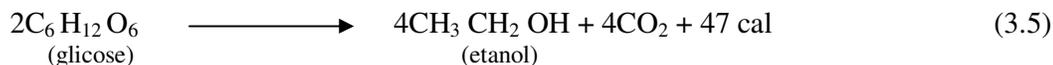
O tratamento térmico, normalmente realizado a 105°C, é feito para esterilização parcial do caldo e aceleração da formação de compostos insolúveis entre o enxofre, as impurezas e a cal. Os compostos insolúveis formados se aderem às paredes dos tubos, de modo que os trocadores de calor devem ser constantemente limpos para evitar perdas na transferência de calor entre o fluido quente e o caldo. O tratamento térmico é realizado com vapor de escape das turbinas ou com vapor vegetal proveniente do pré-evaporador.

Posteriormente, realiza-se a decantação do caldo, colocando-o em repouso para, através da operação, possibilitar a remoção de sólidos remanescentes e outras impurezas floculadas. A decantação possui três etapas: coagulação, floculação e sedimentação. Existem basicamente dois tipos de decantadores: o decantador convencional e o rápido. O primeiro está formado por um sistema de bandejas internas, nas quais o caldo fica em repouso por, aproximadamente, três horas, período após o qual o lodo é retirado por meio de raspas mecânicas. O decantador rápido não possui sistema de bandejas e o caldo fica retido por, aproximadamente, 50 minutos. Depois desse período, o lodo é extraído por raspas mecânicas ou sistema de bombeamento. Para melhorar o processo de decantação, podem ser adicionados agentes floculantes. Os produtos da decantação são o caldo decantado ou clarificado e o lodo (borra), o qual é bastante viscoso e rico em açúcares. O lodo removido na decantação representa de 10% a 20% do volume total do caldo. Este resíduo, juntamente com aquele resultante do processo de peneiramento, normalmente é submetido a filtração a vácuo, para recuperação do caldo residual presente, o qual é realimentado em estágios prévios ao tratamento do caldo (geralmente o caldo residual é reciclado à etapa de sulfitação). O resíduo procedente do processo de filtração é a torta de filtro, a qual normalmente é utilizada como fertilizante na lavoura de cana-de-açúcar.

Finalmente, antes de passar para a etapa de fermentação, o caldo clarificado pode ser submetido a evaporação, etapa que pode não ser realizada em algumas usinas autônomas de álcool, principalmente aquelas com produção menor a 120000 L/dia (CEMIG, 1990). A evaporação é realizada parcialmente para facilitar o controle do Brix na etapa de fermentação assim como para otimizar o estoque para dar continuidade ao processo, no caso de eventuais paradas na etapa de extração. O processo de evaporação eleva a concentração de açúcares a níveis da ordem de 65 Brix. A evaporação é feita por meio de um sistema de evaporadores a vácuo (de duplo, triplo ou quádruplo efeito) e um pré-evaporador. O vapor produzido no pré-evaporador é denominado vapor vegetal, o qual é usado em parte para aquecer o evaporador subsequente e em parte para outras unidades da indústria. Durante a evaporação, os evaporadores podem sofrer incrustações nas suas paredes prejudicando a troca de calor, motivo pelo qual devem ser realizadas limpezas semanais ou quinzenais. A limpeza dos evaporadores pode ser mecânica ou química, usando soda ou ácido para tal fim. O caldo resultante do processo de evaporação (xarope) é enviado a tanques de armazenamento, para depois alimentar os cozedores, no caso de produção de açúcar, e/ou para ser diluído e logo ser destinado a fermentação, no caso de produção de álcool. A FIG. 18 ilustra o processo de tratamento do caldo misto.

3.6.4 Fermentação

A fermentação é a transformação dos açúcares (contidos no caldo de cana e/ou no mel ou melaço¹⁶ diluído) em etanol, pela ação de microorganismos (leveduras). Existem duas reações químicas importantes durante o processo de fermentação: a sacarificação e a fermentação alcoólica. A primeira é decorrente da atuação das enzimas invertase, entanto que a segunda corresponde aos efeitos das enzimas zimase. As reações químicas envolvidas neste processo são (ESTEVES, 1996):



¹⁶ A CEMIG (1990), diferencia mel e melaço, indicando que o primeiro é produto residual da massa cozida para produção de açúcar, onde os cristais de sacarose nela contidos foram separados por centrifugação. Já o melaço, ou mel esgotado, é o mel do qual se retira, por cristalização e centrifugação, toda a sacarose técnica e economicamente possível.

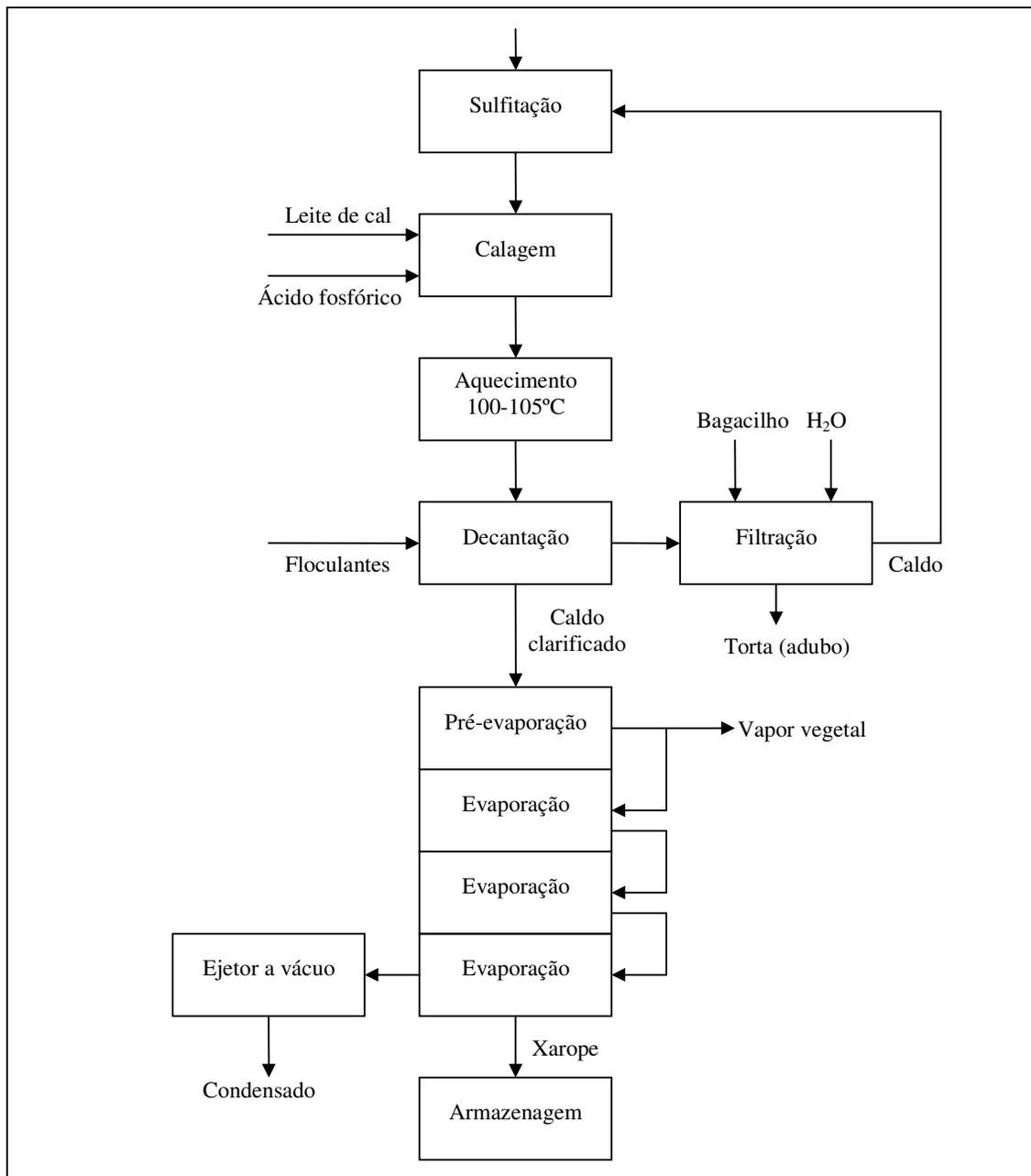


Figura 18: Tratamento do caldo misto

Fonte: CEMIG, 1990.

Uma vez que os substratos a serem fermentados possuem composição bastante variável, a preparação do mosto¹⁷ deve ser realizada de modo a promover uniformidade e alto rendimento à fermentação. O QUADRO 13 mostra as características do mosto necessárias para uma boa fermentação.

¹⁷ Substrato de carboidratos (caldo misto ou tratado) e nutrientes, pronto para a inoculação de leveduras, para a sua fermentação (CEMIG, 1990).

Parâmetro	Características
Concentração de sólidos solúveis e açúcares totais	Deve ser ajustado de acordo com o tipo de levedura e processo a serem usados. Mostos muito diluídos resultam na fermentação mais rápida, menor teor alcoólico do vinho, maior consumo de água de condensação e torres de destilação, maior consumo de vapor, maior facilidade de infecção e necessidade de mais mão-de-obra. Mostos muito concentrados resultam na fermentação mais lenta e incompleta, maior rendimento na destilação, maior índice de incrustações nas torres de destilação e nas serpentinas de resfriamento das dornas.
Acidez total e pH	O pH ótimo para fermentação oscila em torno de 4,5. A baixa acidez desfavorece o desenvolvimento das leveduras e facilita as infecções bacterianas.
Sais minerais	A adição de fósforo favorece a ação das leveduras e melhora o rendimento em álcool. Pequenas doses de sais de magnésio, manganês e cobalto também podem favorecer o processo.
Compostos nitrogenados	A adição de nitrogênio, principalmente na forma amoniacal, melhora o processo fermentativo, o rendimento e a qualidade do produto final.
Temperatura	A temperatura ideal é da ordem de 30°C.
Viscosidade	A formação de bolhas gasosas de alta viscosidade é sinal de matéria-prima infeccionada e mal conservada.
Agitação	Fornece homogeneidade ao meio, favorecendo a fermentação.
Oxigênio	Condições anaeróbias favorecem o metabolismo dos açúcares por fermentação alcoólica, evitando a formação de CO ₂ e H ₂ O.

Quadro 13: Características do mosto para uma boa fermentação

Fonte: Adaptado de CEMIG, 1990.

Os processos de fermentação variam de usina para usina, mas, de modo geral, a fermentação do mosto pode ser dividida nas etapas de (BARRETO JUNIOR, 2007; CEMIG, 1990): preparação do mosto, preparação do fermento, fermentação e centrifugação. A preparação do mosto é realizada principalmente para ajustar as concentrações de açúcares totais e de sólidos solúveis, além de corrigir o pH da solução. Nesta fase, também são adicionados sais minerais e compostos nitrogenados. O Brix é ajustado em torno de 14 a 16 graus e o mel ou melaço, rico em açúcares, é, na maioria dos casos, conduzido à fermentação. Como o mel ou melaço possui um Brix entre 70 a 86 graus, este é diluído com água e/ou com caldo de cana, até atingir o Brix adequado para fermentação.

O mosto já preparado é então estocado para posteriormente alimentar os pé-de-cuba (pré-fermentadores) e as dornas de fermentação. Se bem que os processos de tratamento do caldo misto e a preparação do mosto podem variar em função do tipo de destilaria (autônoma ou anexa), a partir da estocagem do mosto preparado para fermentação, os processos subsequentes são praticamente iguais.

A preparação do fermento ocorre em duas fases: de laboratório e industrial. Na primeira, é preparado o meio de fermentação esterilizado e é realizada a inoculação asséptica da levedura e a incubação da cultura. A fase industrial consiste na preparação do pé-de-cuba, onde se mistura o fermento preparado em laboratório com parte do mosto pronto para fermentação, para conseguir as condições iniciais da fermentação no referente a pH e Brix. A quantidade de mosto utilizado no pé-de-cuba geralmente corresponde a 20% da dorna de fermentação (CEMIG, 1990).

Uma vez preparado o fermento, o mosto é adicionado às dornas de fermentação, juntamente com o pé-de-cuba, de modo que se dá início à fermentação propriamente dita. Durante a fermentação, a população de células de levedura inoculadas no mosto passa por quatro fases: adaptação das células ao meio; crescimento exponencial das células; fase estacionária, que ocorre quando a concentração de nutrientes na solução decai ao tempo que a concentração de álcool inibe a atividade celular; e declínio, que ocorre quando a quantidade de células que morrem é maior que a quantidade de células produzidas. A produção de álcool na fermentação evidencia-se quando começa o desprendimento de CO₂. O tempo de fermentação varia de 4 a 12 horas.

Existem vários processos de fermentação industrial, os quais podem ser contínuos ou descontínuos, entre eles (CEMIG, 1990): sistema de cortes, sistema de cultura pura, sistema de aproveitamento do inóculo ou de decantação e sistema de recuperação de leveduras. O processo de fermentação mais utilizado no Brasil é o processo descontínuo com recuperação de leveduras (FIG. 19) chamado Melle-Boinot (BARRETO JÚNIOR, 2007, IPT, 1990). O reaproveitamento de leveduras é possível devido a que o mosto fermentado é centrifugado para realizar sua separação em duas frações: creme ou leite de levedura e vinho de levedurado. O creme de levedura é enviado para um pré-fermentador (pé-de-cuba), onde é tratado para logo retornar ao processo de fermentação. O tratamento de pré-fermentação consiste em: adição de água no creme de levedura, para realizar sua diluição; adição de ácido sulfúrico, para controle do pH em torno de 2,5; adição de nutrientes e antiespumantes, se necessário; e agitação da mistura durante 2,5 a 3 horas, período após o qual a levedura já tratada retorna à fermentação. O mosto fermentado, antes de ser centrifugado, possui, em média, 90% de vinho e 10% de leveduras, sendo que o vinho, à sua vez, possui de 88% a 93% de água e 7% a 12% de álcool.

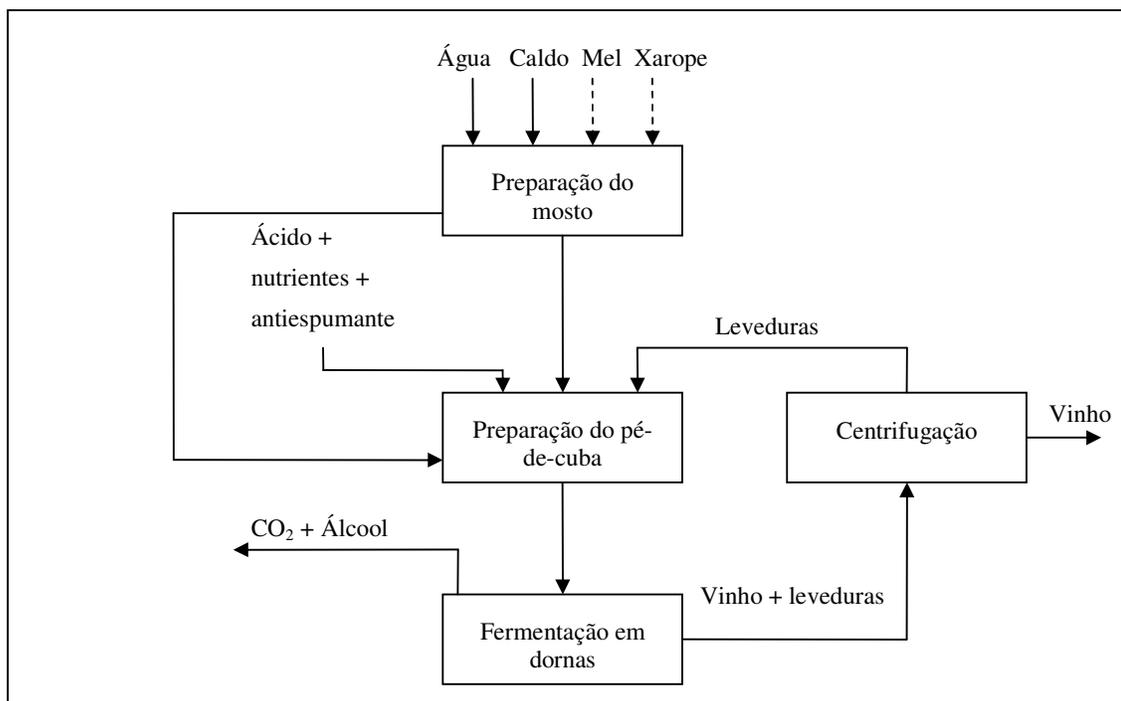


Figura 19: Processo de fermentação com recuperação de leveduras

Fonte: CEMIG, 1990.

3.6.5 Destilação

Uma vez que o vinho, produto da fermentação, possui composição variável, incluindo as fases sólida, líquida e gasosa, este deve ser submetido à destilação, onde o álcool é separado do vinho por evaporação e posterior condensação. Para produção industrial de álcool, o processo de destilação mais comum (retificação contínua) é realizado em múltiplos estágios sucessivos de vaporização e condensação (CEMIG, 1990), sendo que a maior parte das destilarias produzem dois tipos de álcool: hidratado¹⁸ e anidro¹⁹, ambos para fins carburantes. O álcool hidratado pode ser diretamente utilizado pelos veículos a álcool ou flex, enquanto que o álcool anidro é utilizado somente para ser adicionado à gasolina. No caso de obtenção de álcool por processos convencionais de vaporização e condensação, o teor de álcool pode chegar até 96 INPM²⁰, ponto no qual o etanol e a água formam uma solução azeotrópica, ou seja, ambos entram em ebulição à mesma temperatura, como se fossem um único líquido. Assim, não é

¹⁸ Solução de etanol com um teor entre 92,6 e 93,8 INPM, medidos a 20°C. É obtido a partir da destilação do vinho derivado da fermentação do mosto (CEMIG, 1990).

¹⁹ Solução de etanol com um teor mínimo de 99,3 INPM, medidos a 20°C. É obtido a partir da destilação azeotrópica do álcool hidratado, por meio da introdução do benzol ou toluol (CEMIG, 1990).

²⁰ Grau INPM é a quantidade de álcool em massa, contida em 100 g de uma mistura hidroalcoólica, ou seja, a porcentagem em massa de álcool em solução, geralmente medida por um densímetro devidamente calibrado a 20°C (CEMIG, 1990).

mais possível aumentar o teor de álcool por destilação simples, de modo que essa situação representaria o limite teórico máximo de pureza do álcool hidratado. Para aumentar o teor alcoólico da solução, ou seja, para a produção de álcool anidro, deve-se adicionar um componente que altere as condições de solução azeotrópica. Nesse caso, a substância utilizada normalmente é o benzol. Outra forma de obtenção do álcool anidro é a adição de uma substância desidratante no meio (BARRETO JUNIOR, 2007), a qual pode ser o ciclohexano ou o monoetilenoglicol (MEG).

A destilação é normalmente realizada em um sistema formado de colunas (torres de destilação), condensadores e resfriadeiras, além do sistema de bombas, válvulas, tubulações e demais acessórios. Para a obtenção de álcool anidro, normalmente se utiliza um sistema de quatro colunas (FIG. 20), onde também é possível a obtenção de álcool hidratado. O vinho devedurado entra pela coluna A, onde se inicia o processo de destilação. Nessa fase, obtém-se etanol com aproximadamente 45% de concentração (flegma) (BARRETO JUNIOR, 2007) e vinhaça ou vinhoto. O flegma é conduzido para uma segunda coluna (coluna B) de retificação, onde é obtido o álcool hidratado. Já a vinhaça, rica em nutrientes, é normalmente destinada à lavoura da cana-de-açúcar, para fertirrigação. Tendo em vista a obtenção do álcool anidro, como explicado anteriormente, pode ser adicionado benzol ao álcool hidratado. Nesse caso, o álcool anidro é produto da destilação azeotrópica realizada numa terceira coluna (coluna C). O benzol utilizado pode ser recuperado em uma quarta coluna (coluna D) e reutilizado posteriormente. No caso de obtenção de álcool anidro utilizando um agente desidratante, este é adicionado ao álcool hidratado, onde seqüestra água existente no meio, na coluna C. O agente desidratante, da mesma forma que o benzol, pode ser recuperado na coluna D para reutilização. A FIG. 20 mostra o processo de destilação do vinho para obtenção do álcool anidro, utilizando o benzol para destilação azeotrópica.

Depois da destilação, o álcool produzido é armazenado em um tanque medidor, para controle de qualidade em laboratório, onde é realizada a avaliação do etanol em comparação com parâmetros de especificação. Realizado o controle de qualidade, o álcool é posteriormente armazenado em depósitos (tanques de armazenamento), à espera de carregamento para comercialização.

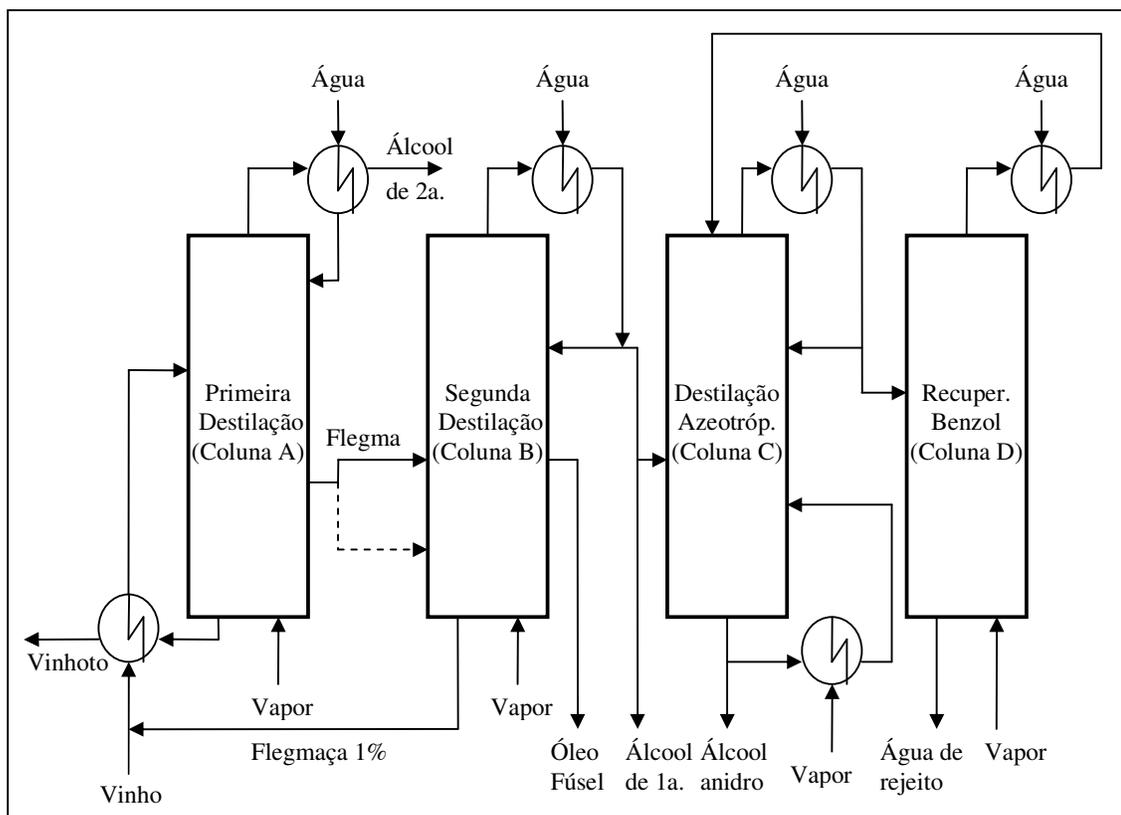


Figura 20: Processo de destilação do vinho para obtenção do álcool anidro
 Fonte: CEMIG, 1990.

3.7 Fontes de emissão de gases de efeito estufa na agricultura da cana-de-açúcar

Segundo estudos de quantificação da emissão de GEE realizados no Brasil (SEABRA, 2008; MACEDO *et al.*, 2004; SOARES *et al.* 2009; SEABRA & MACEDO, s.d.; MACEDO *et al.* 2008; SILVA, 2009), observam-se as seguintes categorias de emissão de GEE durante as etapas de agricultura e industrialização da cana-de-açúcar para produção de etanol: consumo de combustível; consumo de insumos agrícolas; emissão de N₂O do solo; emissões na queima do canavial; produção de mudas; emissões devido ao uso da terra; e emissões na industrialização da cana-de-açúcar.

As emissões associadas ao consumo de combustível ocorrem devido ao uso de maquinário e equipamentos agrícolas, assim como o transporte da cana para a indústria. Em todas essas operações, os estudos acima citados consideram o diesel como combustível utilizado. Segundo o IPCC (2006), durante o consumo de diesel ocorrem emissões diretas de CO₂, CH₄ e N₂O, além de outros poluentes. O IPCC também fornece fatores de emissão desses gases em

função da quantidade consumida de diesel nos veículos e equipamentos utilizados. Além das emissões diretas durante o consumo de diesel, também devem ser levadas em conta as emissões que ocorrem durante a obtenção do diesel, o qual inclui as emissões correspondentes às operações desde a extração do petróleo até a colocação do combustível a disposição do consumidor. Segundo dados do *Ecoinvent* (IFU/IFEU, 2006), durante a obtenção do diesel ocorrem principalmente emissões de CO₂ e CH₄. Cabe ressaltar que os estudos realizados no Brasil não incluem as emissões correspondentes ao consumo de combustível durante o transporte de insumos agrícolas (calcário, fertilizantes e defensivos agrícolas) e industriais (produtos químicos) por parte dos fornecedores.

Com respeito ao consumo de insumos agrícolas, os estudos nacionais incluem o consumo de calcário, fertilizantes, defensivos agrícolas e mudas de cana-de-açúcar. Durante a utilização de calcário calcítico (CaCO₃) ou dolomítico (CaMg(CO₃)₂), ocorrem emissões de CO₂, já que os carbonatos contidos se dissolvem e liberam bicarbonatos (2HCO₃⁻), os quais evoluem em CO₂ (IPCC, 2006) e água (H₂O). Na aplicação de fertilizantes, a adição de nitrogênio no solo, por meio de fertilizantes nitrogenados, intensifica os processos de nitrificação e desnitrificação liberando, como subproduto, N₂O para a atmosfera. Além das emissões associadas ao consumo desses insumos, também ocorrem emissões na obtenção dos mesmos. Já no caso do consumo de mudas, as emissões associadas ocorrem devido à sua produção e transporte. As emissões decorrentes da produção de mudas podem ser consideradas similares àquelas que ocorrem no processo de cultivo convencional da cana-de-açúcar (MACEDO *et al.*, 2004; SOARES *et al.*, 2009) e, portanto, as estimativas podem ser consideradas como sendo uma fração das emissões totais do cultivo comercial.

Quanto às emissões de N₂O do solo, além das emissões decorrentes da adição de fertilizantes nitrogenados, estas podem ocorrer devido à adição de outras fontes de nitrogênio, tais como (IPCC, 2006): adubos orgânicos e resíduos de colheitas anteriores que retornam ao solo, o qual inclui forragem e restos de culturas que capturam nitrogênio. Segundo Soares *et al.* (2009), também podem ocorrer emissões de N₂O (e CH₄) pela adição de vinhaça ao solo durante o cultivo da cana-de-açúcar. Dentre os estudos brasileiros somente alguns consideram as emissões de N₂O resultantes da aplicação ou retorno de resíduos orgânicos ao solo. Nesse sentido, Seabra (2008) inclui as emissões de N₂O devidas à aplicação de vinhaça, torta de filtro e palha remanescente no solo. Já Soares *et al.* (2009) considera somente a aplicação de vinhaça.

O IPCC (2006) indica uma fator de emissão de N₂O em função da quantidade de N adicionada ao solo. No caso de adição de N por meio de fertilizantes sintéticos, fertilizantes orgânicos e resíduos de colheitas anteriores, as emissões de N₂O são de aproximadamente 0,016 kg (ou seja, 1% de N₂O-N) por kg de N contido no fertilizante ou no resíduo. No entanto, este fator de emissão é contestado por Crutzen *et al.* (2007), que sustentam que as emissões de N₂O são da ordem de 0,047 kg a 0,079 kg (ou seja, 3% a 5% de N₂O-N) por kg de N adicionado ao solo. Esse estudo mostra controvérsias quanto ao real efeito mitigador do aquecimento global que os biocombustíveis podem fornecer. Nesse sentido, considerando o fator de emissão colocado por Crutzen *et al.* (2007), os biocombustíveis (incluindo aqueles produzidos a partir do milho, beterraba e cana-de-açúcar) teriam um efeito favorável ao aquecimento global em lugar de um efeito mitigador, devido às altas emissões de N₂O. Esse efeito “aquecedor” seria mais acentuado nos biocombustíveis produzidos a partir de culturas que capturam maior quantidade de N. Assim, a beterraba, que possui 39 g N/kg, teria o maior efeito aquecedor, seguido pelo milho, que possui 15 g N/kg, e pela cana-de-açúcar, que possui 7,3 g N/kg (CRUTZEN *et al.*, 2007). No entanto, esse estudo é contestado por Ammann *et al.* (2007), que esclarecem que o fator de emissão obtido por Crutzen *et al.* (2007) possui um valor alto devido a que considera que as emissões totais de N₂O provenientes da agricultura estão relacionados unicamente ao nitrogênio fixado a partir de fertilizantes sintéticos e processos biológicos, enquanto que o fator de emissão fornecido pelo IPCC (2006) considera todos os tipos de fertilizantes de nitrogênio aplicados no solo, o qual inclui, além da aplicação de fertilizantes sintéticos e processos biológicos, o uso de fertilizantes orgânicos reciclados (resíduos de colheitas anteriores e estrume) e manejo específico de resíduos de produção animal. Dessa forma, Ammann *et al.* (2007) sustentam que o fator de emissão fornecido pelo IPCC (2006) é o adequado para avaliar a emissão de N₂O em sistemas agrícolas e, por conseguinte, na produção de biocombustíveis. Cabe ressaltar que atualmente o aclamado efeito mitigador do aquecimento global atribuído ao uso de biocombustíveis em substituição a combustíveis fósseis é resultado de estudos, em sua maioria, baseados em fatores de emissão de N₂O fornecidos pelo IPCC.

A aplicação de torta de filtro e vinhaça no cultivo de cana-de-açúcar também provoca emissões de N₂O, devido à adição do nitrogênio contido nesses resíduos ao solo. Não existem muitos estudos que indiquem fatores de emissão de N₂O a partir da vinhaça e da torta de filtro. Dentre os estudos brasileiros de levantamento de emissões de GEE na produção de etanol, Seabra (2008) considera o fator de emissão de N₂O para a aplicação de resíduos

agrícolas fornecido pelo IPCC (2006), para o cálculo de emissões de N₂O provenientes da aplicação de vinhaça e torta de filtro. Soares *et al.* (2009) também utilizam esse mesmo fator de emissão para o cálculo das emissões de N₂O da vinhaça e da torta de filtro. Os mesmos autores sugerem também um fator de emissão (baseado em experiência própria) para as emissões de CH₄ da vinhaça, sustentando que 0,2% do carbono contido na vinhaça é emitido como CH₄.

Durante a queima da cana-de-açúcar antes da colheita, assim como na queima de resíduos agrícolas, tais como o palhico, ocorrem emissões de CO₂, N₂O e CH₄ (MACEDO *et al.*, 2004; SOARES, *et al.*, 2009). No entanto, as emissões de CO₂ não devem ser consideradas na estimativa, já que tais emissões serão compensadas pela captura de CO₂ durante o próximo cultivo (IPCC, 2006).

Embora a consideração das emissões correspondentes a mudanças no uso da terra para produção de bioetanol seja importante na estimativa de GEE, poucos estudos incluem este aspecto na quantificação de emissões. As emissões devido a mudanças no uso do solo podem ser diretas (IPCC, 2006) ou indiretas (GNANSOUNOU, 2008; KIM *et al.*, 2009). As emissões diretas incluem o aumento ou diminuição dos estoques de carbono devido à instalação de cultivos dedicados à produção de bioetanol, assim como o aumento ou diminuição das emissões de GEE associadas ao manejo do solo, em comparação com o uso anterior da terra. As emissões indiretas são aquelas que derivam do deslocamento de atividades agrícolas para outras áreas de cultivo, devido à instalação e expansão de cultivos dedicados à produção de bioetanol, por causa do aumento da demanda de biocombustíveis. A estimativa das emissões indiretas de GEE devido a mudanças no uso do solo é ainda um aspecto controverso que precisa de maiores estudos que possam resultar em metodologias consistentes. Uma vez que as mudanças no uso do solo podem ser atribuídas não somente ao aumento da demanda dos biocombustíveis, mas também a mudanças na demanda de outros produtos associados ao uso da terra, dentre os aspectos que limitam a estimativa adequada das emissões indiretas do uso do solo estão a falta de critérios apropriados de alocação de cargas ambientais entre os diferentes produtos que concorrem com os biocombustíveis pelo uso do solo (KIM, *et al.*, 2009) e o impacto que os rumos das demandas futuras (locais e mundiais) de tais produtos terão sobre o uso da terra. (MATHEWS & TAN, 2009).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Antecedentes

O tema de pesquisa foi idealizado por meio da submissão de um projeto de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) ao programa “Life Cycle Initiative” promovido pela UNEP/SETAC. O projeto inicial tinha como objetivo principal avaliar a necessidade de incluir aspectos metodológicos de ACV na quantificação da emissão de gases de efeito estufa (GEE) em projetos do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). Nessa ocasião, através da submissão do projeto, foi possível adquirir o software Umberto, conceituado programa que fornece ferramentas para a ACV. Dentre essas ferramentas encontra-se o *Ecoinvent* (v2.01a) (IFU/IFEU, 2006), o qual é uma base de dados bastante completa de *inputs* e *outputs* do ciclo de vida de milhares de materiais e processos diversos. Quanto ao *output* de gases, o *Ecoinvent* considera as emissões diretas e indiretas, incluindo a emissão de GEE.

Tendo em vista a abrangência do projeto inicial apresentado à UNEP/SETAC, decidiu-se focar a pesquisa em um processo mais específico, desse modo, o estudo evoluiu para a avaliação da emissão de GEE no processo de produção de etanol.

De modo geral, a pesquisa foi realizada em quatro etapas: (1) revisão bibliográfica; (2) estimativa inicial das emissões de GEE; (3) identificação de etapas produtivas para a produção de etanol e estimativa das emissões em tais etapas; e (4) identificação de cenários tecnológicos para produção de etanol e estimativa das emissões em tais cenários. A seguir mostram-se os aspectos metodológicos relacionados a cada uma dessas etapas.

4.2 Pesquisa bibliográfica

Para a avaliação da emissão de GEE decorrentes da produção de etanol de cana, primeiramente foi necessário conhecer as particularidades e os aspectos tecnológicos envolvidos em tal processo, para o qual foi realizada uma pesquisa bibliográfica centrada principalmente nas operações de agricultura e industrialização de cana-de-açúcar para produção de etanol e suas fontes de emissão de gases. Procurou-se focar as informações no Estado de Minas Gerais. A referida pesquisa bibliográfica forneceu dados a respeito de alguns fatores de emissão de GEE empregados para a estimativa das emissões na obtenção do etanol de cana-de-açúcar.

4.3 Estimativa inicial das emissões de GEE

Para consecução do objetivo de pesquisa, foi realizada uma estimativa inicial das emissões de GEE, com o intuito de identificar pontos ou fontes de emissão relevantes nas etapas de agricultura e industrialização da cana-de-açúcar. Posteriormente, essas informações serviram para um levantamento mais detalhado das emissões de GEE por meio de uma pesquisa de campo.

Nesta fase de estimativa inicial foi realizado um contato com o Sindicato da Indústria do Açúcar e do Álcool de Minas Gerais (SIAMIG/SINDAÇÚCAR-MG) onde foram obtidas informações cadastrais das usinas associadas. Com esses dados, em seguida contactou-se a Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM), onde foram solicitados os processos de licenciamento e relatórios de controle ambiental das usinas associadas à SIAMIG/SINDAÇÚCAR. Do total de usinas associadas, foi possível consultar 32 processos, uma vez que os restantes não foram achados na seção de arquivos da FEAM em Belo Horizonte. Dentre os processos consultados, foram selecionadas 9 usinas para coleta de dados. A seleção foi feita levando em conta que a pesquisa está focada exclusivamente em usinas produtoras de álcool, sejam estas anexas ou autônomas²¹, de modo que foram excluídos processos referentes a usinas açucareiras. Procurou-se tomar dados de destilarias cujo processo de licenciamento tenha sido registrado de forma relativamente recente, de modo que foram descartados processos anteriores a 1990.

A TAB. 5 e a FIG. 21 mostram alguns dados das usinas pesquisadas nesta fase do trabalho e a localização das mesmas no Estado de Minas Gerais.

Para a estimativa inicial da emissão de GEE, foram aplicadas algumas técnicas da metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida – ACV – (EEA, 1997; USEPA, 2006), principalmente no que se refere ao estabelecimento do objetivo e escopo, e recomendações do Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC (2006). De modo geral, as emissões de GEE foram calculadas segundo a equação (IPCC, 2006):

$$Emissões = DA \times FE \quad (4.1)$$

²¹ Usinas anexas são aquelas que produzem açúcar e álcool. Já as usinas autônomas produzem somente álcool.

Tabela 5 – Dados das usinas pesquisadas

Usina nº	Coord. Geográficas (Lat. S; Long. W)	Altitude (m)	Município	Temperatura média anual °C ⁽¹⁾	Solos
1	19° 54' 02"; 49° 42' 35"	~500 ⁽¹⁾	Itapagipe	23,8	Argilosos
2	20° 18' 00"; 42° 41' 15"	431	Rio Casca	21,2	Latossolo vermelho amarelo Podsólico vermelho amarelo
3	19° 41' 40"; 50° 19' 32"	~450 ⁽¹⁾	Iturama	24,3	Arenosos; Argilosos
4	40° 16' 04"; 17° 56' 32"	202	Serra dos Aimorés	23,1	Podsólico amarelo Latossolo vermelho escuro
5	19° 54' 23"; 48° 42' 44"	530	Pirajuba	23,8	Latossolo vermelho escuro ólico Latossolo roxo distrófico
6	19° 46' 51"; 48° 43' 56"	582	Campo Florido	23,8	Arenoso
7	19° 18' 32"; 47° 31' 27"	910	Santa Juliana	21,9	Arenoso
8	19° 59' 08"; 48° 15' 04"	-	Delta	21,9	Latossolo vermelho escuro distrófico
9	-	~600 ⁽¹⁾	Felixlândia	22,6	-

(1) Fonte: IGA, s.d.

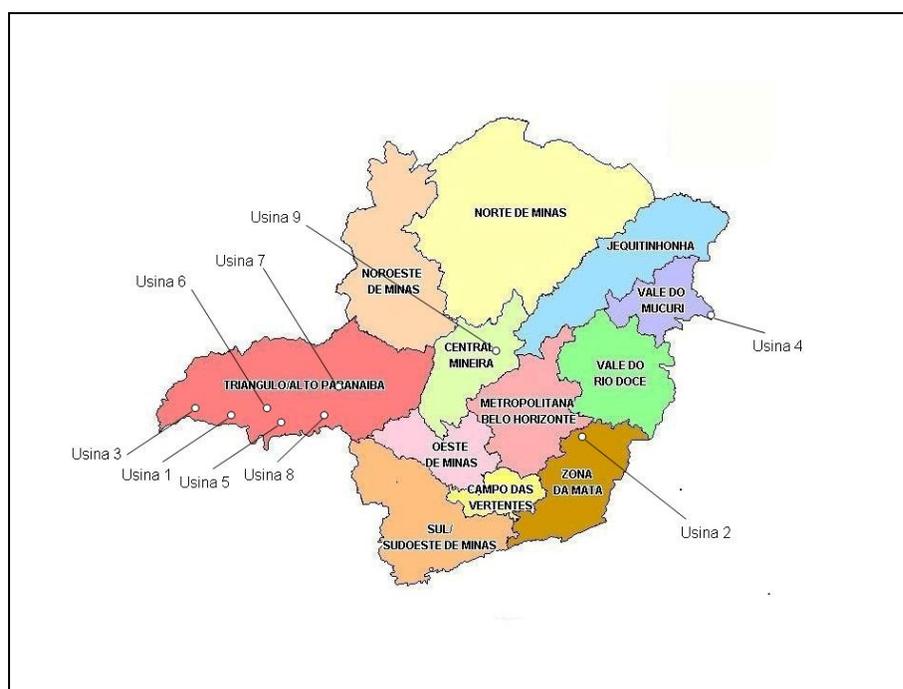


Figura 21: Localização das usinas pesquisadas

na qual:

DA = Dados da Atividade (Ex.: litros de diesel consumidos numa operação agrícola)

FE = Fator de Emissão (Ex.: kg de CO₂ emitidos por litro de diesel consumido)

A seguir mostram-se os aspectos metodológicos da ACV considerados nesta fase da pesquisa. Cabe ressaltar que tais aspectos também foram levados em conta em posteriores estimativas das emissões de GEE.

4.4 Considerações sobre o objetivo e escopo

Como foi colocado no Capítulo 2, o objetivo da pesquisa foi avaliar as emissões de GEE que ocorrem nas etapas de agricultura e industrialização de cana-de-açúcar para produção de etanol, considerando cenários tecnológicos diferentes. Para tal efeito, foi necessário definir: os GEE a serem levados em conta; uma unidade funcional; um período de base adequado; e as fronteiras do sistema avaliado.

4.4.1 Gases de efeito estufa

Para as estimativas das emissões de GEE, foram incluídas somente as emissões de CO₂, CH₄ e N₂O (gases de efeito estufa), uma vez que elas são consideradas as mais importantes em sistemas relacionados com agricultura (IPCC, 2006). Na verdade a maioria dos estudos de emissão de GEE na produção de biocombustíveis considera somente esses gases. As emissões totais foram expressas em termos de kg de CO₂ equivalente²² (kg CO₂eq).

4.4.2 Unidade funcional

A metodologia de ACV indica que, para realizar a quantificação dos *inputs* e *outputs* de materiais e energia nos processos considerados na avaliação, deve ser determinada uma unidade funcional adequada ao objeto de estudo. Os cálculos a serem realizados ao longo dos processos avaliados devem ser feitos com base em tal unidade funcional.

No caso de estudos de ACV envolvidos com sistemas agrícolas, a unidade funcional a ser utilizada pode ser determinada: em nível de fazenda, em nível de produto ou em nível de área (HAAS *et al.*, 2000). No primeiro caso, assume-se que a área a ser considerada no estudo é um terreno fixo com uma determinada área, sendo que as entradas e saídas são variáveis. No segundo caso, a área a ser considerada, juntamente com as entradas e saídas, é variável em função de unidade de produto produzido. No terceiro caso, os fluxos de entrada e de saída

²² De acordo com o IPCC (2007), a emissão de 1 kg de CH₄ equivale à emissão de 21 kg de CO₂eq; e a emissão de 1 kg de N₂O equivale à emissão de 310 kg de CO₂eq, segundo o potencial de aquecimento global para um período de 100 anos.

podem variar, juntamente com a produção, em função de unidade de área. Estudos específicos de estimação de GEE relacionados com sistemas agrícolas (SONNE, 2006; SOUSSANA *et al.*, 2007; ADLER *et al.*, 2007) mostram que a unidade funcional indicada nestes casos deve ser colocada em nível de área, considerando determinado tempo de entrada dos insumos.

Neste estudo foi considerada como unidade funcional um hectare de cana-de-açúcar cultivado por um ano ($\text{ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$), tendo em vista que grande parte dos dados de insumos agrícolas nas usinas pesquisadas estão expressos em hectare por unidade de tempo. Assim sendo, a maior parte dos dados referentes a insumos utilizados na indústria (usinas) estão colocados em termos de tonelada de cana (TC) moído por unidade de tempo. Neste último caso, é possível converter os dados em unidades de hectare por ano, levando em consideração a quantidade de cana moída e a correspondente área de corte da cana.

4.4.3 Período de base considerado

Para o cálculo de emissões, foi considerado um período de base que incluiu o pousio²³, o ciclo da cana-planta²⁴ e o ciclo da cana-soca²⁵ na etapa de agricultura (MACEDO *et al.*, 2004), uma vez que existem determinados fluxos de materiais e energia que ocorrem, por exemplo, somente durante o cultivo da cana-planta, diferente dos fluxos que ocorrem durante o cultivo da cana-soca, sendo necessário, portanto, calcular uma média ponderada (em unidades de $\text{ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$), tomando como referência o período de base considerado.

De acordo com os dados recolhidos para estimativa inicial de emissões, pôde-se constatar que o ciclo produtivo do canavial depende fortemente de dois fatores: o tipo de cana plantado (cana de ano²⁶ ou cana de ano e meio²⁷) e o número de cortes (colheitas) realizado. Com respeito ao tipo de cana plantado, foi observado que há usinas que destinam áreas de plantio tanto para a cana de ano como para a cana de ano e meio, no entanto, predominantemente, o plantio é realizado com cana de ano e meio. Em outras palavras, a área destinada ao cultivo de cana de ano é pequena em comparação com a área destinada ao plantio de cana de ano e meio. Sendo assim, para a determinação do período de base, foi levado em conta somente o plantio de cana de ano e meio. Por outro lado, foi verificado que as usinas realizam

²³ Descanso temporário dado à terra cultivada.

²⁴ Primeiro brote da cana, após o plantio.

²⁵ Rebrotos subsequentes ao corte da cana-planta.

²⁶ Cana-planta que se desenvolve em um ano.

²⁷ Cana-planta que se desenvolve em ano e meio.

predominantemente cinco cortes, sendo que há casos em que são realizados até sete cortes. Levando em conta esses dados e considerando um ciclo de 18 meses para a cana de ano e meio, e um ciclo de 12 meses entre os cortes subsequentes (ANDRADE & ANDRADE, 2007), determinou-se um ciclo produtivo do canavial de 66 meses (cinco anos e meio), levando em conta quatro cortes subsequentes à primeira colheita.

Quanto ao período de pousio, na maioria das usinas estudadas para estimativa inicial de emissões, a safra ocorre no início de maio e se estende até o final de outubro. Levando em conta que o plantio pode ocorrer nos meses de janeiro a março, considerou-se um período médio de seis meses de pousio. Somando o período de pousio com o ciclo produtivo do canavial, considerou-se um total de 6 anos como período de base para cálculo das emissões de GEE em termos da unidade funcional ($\text{ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$).

4.4.4 Fronteiras do sistema avaliado

A ACV considera os *inputs* e *outputs* que ocorrem no ciclo de vida do produto/sistema avaliado, envolvendo a extração e processamento de matérias-primas, manufatura, transporte, distribuição, uso e disposição final. No caso da produção de etanol, o ciclo começa na etapa de agricultura e termina no consumo final do etanol. No presente estudo foram consideradas somente as etapas de agricultura e processo industrial, com suas respectivas subetapas, de acordo com a FIG. 22. O cenário considerado para levantamento das emissões representa as atividades agrícolas e industriais mais empregadas nas usinas estudadas, com valores médios de consumo e produção.

No cálculo das emissões de GEE foram levadas em conta as emissões diretas – ou seja, aquelas decorrentes dos processos de agricultura e industrialização da cana-de-açúcar, assim como do consumo direto de insumos – e emissões relativas à aquisição dos insumos, ou seja, aquelas emissões associadas aos processos específicos para extração de matérias primas, produção e transporte de tais insumos.

Com base na equação 4.1 e nas características específicas das atividades correspondentes à agricultura e industrialização da cana-de-açúcar, de modo geral, a estimativa inicial das emissões de GEE foi calculada aplicando a seguinte equação:

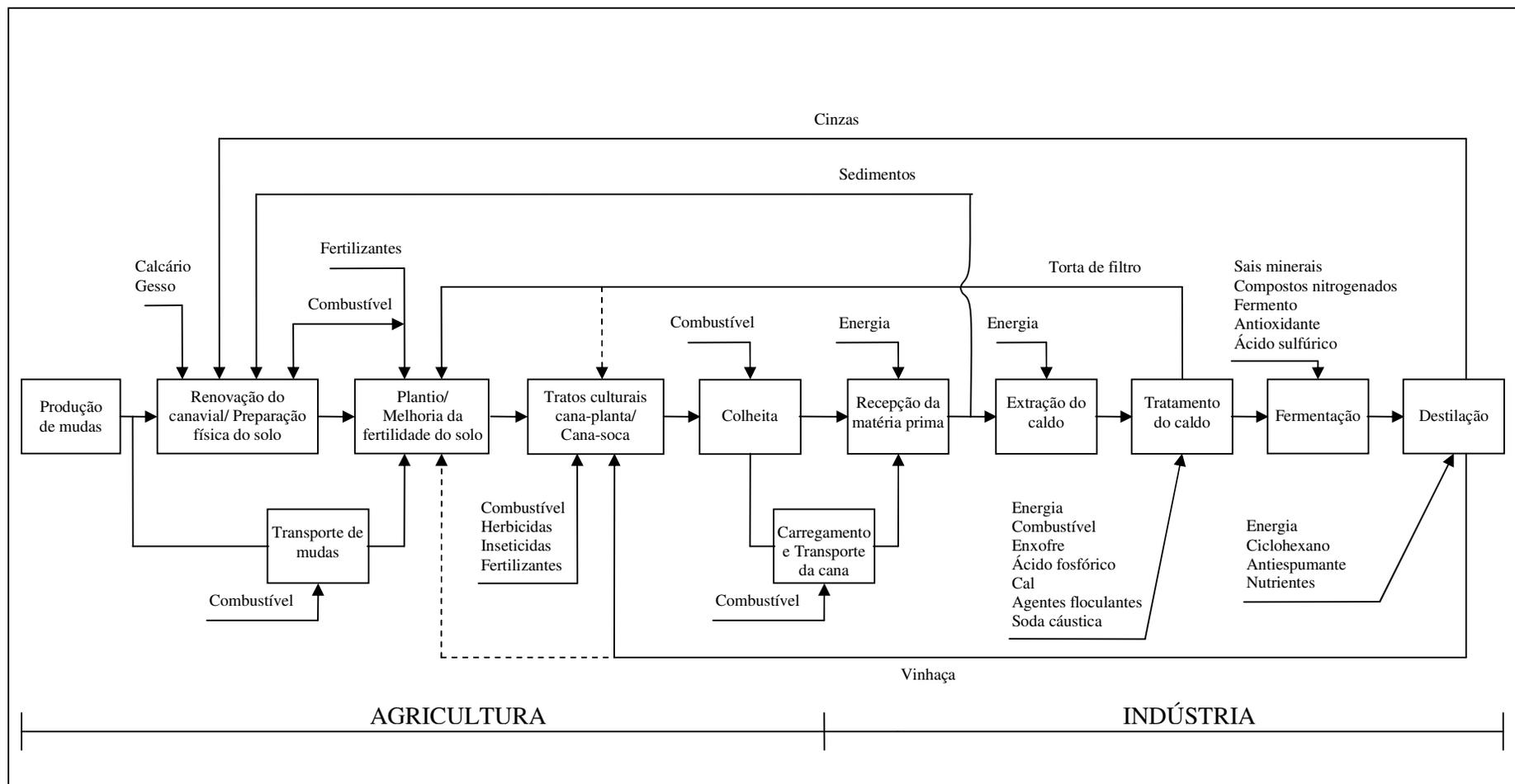


Figura 22: Fronteiras do sistema avaliado

$$E_i = \frac{(I_j \times nc \times FE_j)}{6} \quad (4.2)$$

na qual:

E_i = emissões de GEE (kg CO₂eq/ha·ano) correspondentes a uma categoria ou atividade i considerada no cálculo das emissões; i = consumo de combustível nas operações agrícolas; consumo de combustível no transporte de mudas; consumo de combustíveis no transporte de torta de filtro, cinzas e sedimentos; consumo de combustível no transporte de cal e fertilizantes; consumo de combustível na fertirrigação; consumo de combustíveis na colheita mecânica; consumo de combustíveis no carregamento e transporte da cana-de-açúcar; consumo de cal e fertilizantes; consumo de defensivos agrícolas; queima do canavial; liberação de N₂O do solo; produção de mudas; e consumo de produtos químicos na etapa industrial; I_j = quantidade consumida do insumo j na categoria ou atividade em questão; nc = número de ciclos nos quais a quantidade I_j é consumida; FE_j = fator de emissão de GEE correspondente ao insumo j ; j = combustível, cal, fertilizantes, defensivos agrícolas, cana a ser queimada durante a colheita e produtos químicos usados na etapa industrial. O número de ciclos (nc) varia dependendo se o insumo j é utilizado somente no ciclo da cana planta ($nc = 1$), nos quatro ciclos da cana-soca ($nc = 4$) ou nos ciclos da cana-planta e cana-soca ($nc = 5$). O divisor 6 representa o período de base considerado (seis anos).

Na estimativa inicial, as emissões totais foram calculadas usando a seguinte equação:

$$E_T = \sum E_i \quad (4.3)$$

na qual:

E_T = Emissões totais de GEE; E_i = emissões de GEE correspondentes a uma categoria ou atividade i considerada no cálculo das emissões, segundo a equação 4.2.

Os fatores de emissão aplicados foram obtidos de duas fontes: (1) do Ecoinvent; e (2) quando disponíveis, do IPCC (2006). A base de dados do Ecoinvent foi utilizada principalmente para o fornecimento de fatores de emissão correspondentes à obtenção de insumos agrícolas e industriais, assim como aqueles correspondentes ao transporte de tais insumos. O IPCC (2006) fornece fatores de emissão para os principais processos agrícolas, tais como uso de cal, queima de resíduos agrícolas e liberação de N₂O do solo. Nesses casos, foram utilizados os fatores de emissão recomendados pelo IPCC. Os dados de consumo de combustíveis em

veículos e equipamentos agrícolas que não foram possíveis coletar nas usinas pesquisadas foram baseados em Macedo et al. (2004). Para o cômputo final das emissões os GEE foram classificados em sete categorias: consumo de combustível; consumo de cal e fertilizantes; consumo de defensivos agrícolas; emissão de N₂O do solo; emissões na queima do canavial; produção de mudas; e emissões na industrialização da cana-de-açúcar.

4.5 Identificação de etapas produtivas para a produção de etanol e estimativa das emissões em tais etapas

A estimativa inicial das emissões de GEE serviu para identificar fontes de emissão relevantes nas etapas de agricultura e industrialização da cana-de-açúcar. Posteriormente, realizou-se um levantamento mais detalhado e atualizado das emissões, focando as estimativas nas fontes de emissão identificadas na estimativa inicial. Nesta fase da pesquisa identificaram-se variáveis tecnologias associadas às fontes de emissão previamente determinadas e realizou-se a estimativa de emissões de GEE correspondentes. Cada etapa produtiva está constituída de determinadas atividades agrícolas e industriais adotadas pelas usinas pesquisadas. Para realizar esta parte do estudo, foi feita uma pesquisa de campo em três usinas localizadas no Estado de Minas Gerais, onde, com base em informações de tais usinas, foram identificadas as atividades agrícolas e industriais atualmente realizadas. Desta forma foram coletados dados atuais de consumo de insumos para produção de etanol, levando em conta cada atividade. Procurou-se focar o levantamento de dados naquelas etapas onde ocorre a maior parte das emissões, com base nos resultados obtidos na estimativa inicial de GEE.

A pesquisa de campo consistiu em visitas a três usinas contatadas por meio do SIAMIG/SINDAÇÚCAR. Durante as visitas foram realizadas entrevistas aos encarregados dos setores de agricultura e indústria, objetivando a coleta de dados necessários para o levantamento das emissões de GEE. Nessa oportunidade também foram realizadas observações de práticas agrícolas e industrialização nas usinas visitadas. Assim mesmo, por meio do SIAMIG/SINDAÇÚCAR foi enviado um questionário a todas as usinas cadastradas nessa instituição. O questionário aplicado nesta fase da pesquisa está detalhado no ANEXO D.

Durante a estimativa inicial de GEE e durante a pesquisa de campo, pôde-se constatar que as emissões referentes à etapa industrial representam, em média, menos de 3% do total de emissões. Por esse motivo, a coleta e análise de dados da etapa de agricultura foi realizada

com maior ênfase durante a pesquisa de campo, uma vez que as emissões nessa etapa representam mais do 97% do total.

Do total de questionários enviados às usinas cadastradas no SIAMIG/SINDAÇÚCAR, somente obteve-se resposta de uma usina que forneceu dados da etapa de agricultura. Dessa forma, o total de usinas pesquisadas no estudo foi de treze; nove usinas pesquisadas por meio de dados fornecidos pela FEAM; três usinas visitadas durante a pesquisa de campo; e uma usina pesquisada com dados fornecidos por meio do questionário.

Por motivos de sigilo, os dados cadastrais das usinas estudadas na pesquisa de campo não foram divulgadas no presente relatório.

Esta fase da pesquisa serviu para identificar etapas produtivas de agricultura e industrialização e realizar estimativas das emissões de GEE correspondentes a tais etapas. Como explicado anteriormente, cada etapa produtiva está constituída de determinadas atividades agrícolas e industriais realizadas pelas usinas pesquisadas. Para realizar a estimativa das emissões de GEE correspondentes às atividades agrícolas e industriais, foi utilizada a seguinte equação:

$$E_{ij} = I_{mj} \times FE_m \quad (4.4)$$

na qual:

E_{ij} = emissões de GEE (kg CO₂eq/ha) correspondente à atividade agrícola/industrial j presente na etapa produtiva i ; i = manutenção da área de cultivo, produção de mudas, aplicação de corretivos, preparo do solo e plantio, tratos culturais em soqueira, adubação no plantio, adubação em soqueira, aplicação de defensivos agrícolas, queima do canavial, colheita, transporte de cana e produção de álcool; j = operações de manutenção na área de cultivo, produção de mudas, aplicação de calcário e gesso, cultivo convencional, cultivo mecanizado, cultivo mínimo, operações em soqueira, adubação no plantio – cana de ano e meio em área de vinhaça, adubação no plantio – cana de ano em área de vinhaça, adubação no plantio – cana de ano e meio em área sem vinhaça, adubação no plantio – cana de ano em área sem vinhaça, adubação com torta de filtro no plantio, adubação em soqueira – área de vinhaça com cana queimada, adubação em soqueira – área de vinhaça com cana crua, adubação em soqueira – área sem vinhaça com cana queimada, adubação em soqueira – área sem vinhaça com cana crua, adubação torta de filtro em soqueira, consumo de defensivos agrícolas, queima do canavial para colheita manual, sem queima do canavial para colheita mecânica, colheita

manual, colheita mecânica, transporte de cana e industrialização; I_{mj} = quantidade(s) consumida(s) do(s) insumo(s) m nas atividades j presentes em cada etapa produtiva; m_j = combustível, calcário, gesso, fertilizantes, defensivos agrícolas, cana a ser queimada durante a colheita; e produtos químicos na etapa industrial; FE_m = fator de emissão de GEE correspondente ao insumo I_{mj} .

O Quadro 14, a seguir, mostra as etapas produtivas e atividades agrícolas e industriais consideradas na estimativa das emissões de GEE.

Etapas produtivas (i)	Atividades agrícolas e industriais (j)
Manutenção da área de cultivo	• Operações de manutenção na área de cultivo
Produção de mudas	• Produção de mudas
Aplicação de corretivos	• Aplicação de calcário e gesso
Preparo do solo e plantio	• Cultivo convencional • Cultivo mecanizado • Cultivo mínimo
Tratos culturais em soqueira	• Operações em soqueira
Adubação no plantio	• Cana de ano e meio em área de vinhaça • Cana de ano em área de vinhaça • Cana de ano e meio em área sem vinhaça • Cana de ano em área sem vinhaça • Adubação com torta de filtro
Adubação em soqueira	• Área de vinhaça com cana queimada • Área de vinhaça com cana crua • Área sem vinhaça com cana queimada • Área sem vinhaça com cana crua • Adubação com torta de
Aplicação de defensivos agrícolas	• Consumo de defensivos agrícolas
Queima do canavial	• Queima do canavial para colheita manual • Sem queima do canavial para colheita mecânica
Colheita	• Colheita manual • Colheita mecânica
Transporte de cana	• Transporte de cana
Produção de álcool	• Industrialização de cana-de-açúcar

Quadro 14: Etapas produtivas e atividades agrícolas e industriais na produção de etanol de cana-de-açúcar

4.6 identificação de cenários tecnológicos para produção de etanol e estimativa das emissões em tais cenários

A partir das etapas produtivas e atividades agrícolas e industriais apresentadas no Quadro 14, foram identificados cenários tecnológicos para a produção de etanol. Cada cenário foi composto de determinadas atividades agrícolas e industriais, começando pelas operações de manutenção na área de cultivo, até chegar à industrialização de cana-de-açúcar. Uma vez

identificados os cenários tecnológicos, procedeu-se à estimativa das emissões de GEE em cada cenário. Tais emissões foram calculadas, de modo geral, a partir da seguinte equação:

$$E_k = \frac{(\sum E_{ij} \times nc)}{b_n} \quad (4.5)$$

na qual:

E_k = emissões de GEE (kg CO₂eq/ha·ano) correspondentes ao cenário tecnológico k ; E_{ij} = emissões de GEE (kg CO₂eq/ha) correspondentes à atividade agrícola/industrial j presente na etapa produtiva i , segundo a equação 4.4; nc = número de ciclos nos quais as emissões E_{ij} ocorrem, dependendo do período de base (b_n) considerado; b_n = período de base n considerado para a estimativa das emissões de GEE no cenário E_k .

O período de base (b_n) na equação 4.5 varia devido ao número médio de cortes realizados no canal na usinas estudadas durante a pesquisa de campo: 5,63 cortes em áreas sem irrigação e 7 cortes em áreas com irrigação. O período de base também é afetado pelo tipo de cana (cana de ano e meio e cana de ano) e o período normal de pousio, que nas usinas pesquisadas foi determinado em 4,67 meses (0,39 anos). Dessa maneira, lembrando que o ciclo da cana de ano e meio é de 18 meses e o da cana de ano é de 12 meses, o período de base (b_n) corresponde às seguintes situações agrícolas observadas durante a pesquisa de campo: (b_1) sem pousio/cana de ano e meio/5,63 cortes = 6,13 anos; (b_2) sem pousio/cana de ano e meio/ 7 cortes = 7,5 anos; (b_3) sem pousio/cana de ano/5,63 cortes = 5,63 anos; (b_4) sem pousio/cana de ano/7 cortes = 7 anos; (b_5) com pousio/cana de ano e meio/5,63 cortes = 6,52 anos; (b_6) com pousio/cana de ano e meio/7 cortes = 7,89 anos; (b_7) com pousio/cana de ano/5,63 cortes = 6,02 anos; (b_8) com pousio/cana de ano/7 cortes = 7,39 anos.

4.7 Análise de Variância

Para avaliar as diferenças existentes entre os cenários tecnológicos identificados, em termos de emissões de GEE, foram realizadas análises de variância (ANOVA) com intervalo de confiança de 5% ($\alpha = 0,05$). As análises de variância também serviram para determinar grupos de cenários tecnológicos semelhantes e, assim, classificá-los de acordo com diferentes níveis de emissões de GEE.

5 RESULTADOS

Como colocado anteriormente, a pesquisa foi realizada em quatro etapas: revisão bibliográfica; estimativa inicial das emissões de GEE; identificação de etapas produtivas para a produção de etanol e estimativa das emissões em tais etapas; e identificação de cenários tecnológicos para produção de etanol e estimativa das emissões em tais cenários. A seguir mostram-se os resultados da pesquisa, começando pela estimativa inicial das emissões.

5.1 *Estimativa inicial das emissões de GEE*

A estimativa inicial das emissões de GEE foi realizada usando a equação 4.2, para o cálculo das emissões correspondentes às atividades de agricultura e industrialização da cana-de-açúcar, e a equação 4.3, para o cálculo das emissões totais. A seguir descrevem-se os dados e resultados obtidos durante a estimativa inicial das emissões de GEE.

5.1.1 Consumo de combustível

5.1.1.1 Operações agrícolas

Nas usinas estudadas, as operações agrícolas caracterizam-se pelo cultivo semi-mecanizado (sulcação e adubação mecanizada, com plantio manual) e colheita manual com queima prévia do canavial. A prática de colheita mecanizada foi identificada nas usinas mais modernas, no entanto, mesmo nessas usinas, a colheita manual com queima do canavial é ainda a prática predominante. Foram encontrados dados a respeito dos equipamentos agrícolas utilizados, no entanto não foram achados dados de consumo de combustíveis nem da fração de área trabalhada, motivo pelo qual se adotaram os dados de consumo de combustíveis relatados em Macedo *et al.* (2004): 102,63 L/ha para o plantio e 9,11 L/ha para os tratos culturais da cana-soca. As emissões totais (emissões diretas + emissões na obtenção do diesel; TAB. 6 e TAB. 7) no consumo de combustível são de 3,01 kg CO₂eq/L. Levando em conta a equação 4.2, as emissões para o consumo de diesel nas operações agrícolas são:

$$E_{OA} = \frac{(102,63 + 9,11 \times 4) \frac{\text{L}}{\text{ha}} \times \frac{3,01 \text{ kg CO}_2\text{eq}}{\text{L}}}{6 \text{ anos}} = 69,77 \text{ kg CO}_2\text{eq/ha}\cdot\text{ano}$$

Tabela 6 – Fatores de emissão de gases de efeito estufa para o diesel

Fatores de emissão			Valor calorífico TJ/Gg	Densidade ⁽¹⁾ (kg/L)	Emissão de GEE (kg CO ₂ eq/L)
Kg CO ₂ /TJ	kg CH ₄ /TJ	Kg N ₂ O/TJ			
74100	4,15	28,6	43	0,742	2,65

(1) Ministério de Minas e Energia – MME, 2008.

Fonte: IPCC, 2006.

Tabela 7 – Emissão de GEE na obtenção do diesel

Fatores de emissão		Densidade (kg/L)	Emissões na obtenção diesel (kg CO ₂ eq/L)
Kg CO ₂ /kg	Kg CH ₄ /kg		
0,46	0,0019	0,742	0,37

Fonte: Ecoinvent (IFU/IFEU, 2006).

5.1.1.2 Transporte de mudas

Para o transporte de mudas foi considerada uma distância de 5 km, com base na área agrícola média das usinas pesquisadas (10500 ha). São utilizadas, em média, 12 t de mudas por hectare. Segundo dados da pesquisa, o transporte normalmente ocorre em caminhões de 12 t, que consomem 2,3 km/L. Levando em conta que o transporte de mudas ocorre uma vez a cada seis anos, a emissão total de GEE é:

$$E_{TM} = \frac{2 \times \left(5 \text{ km} \times \frac{\text{L}}{2,3 \text{ km}} \right) \times \frac{12 \text{ t}}{12 \text{ t} \times \text{ha}} \times 3,01 \frac{\text{kg CO}_2 \text{eq}}{\text{L}}}{6 \text{ anos}} = 2,18 \text{ kg CO}_2 \text{eq/ha} \cdot \text{ano}$$

5.1.1.3 Transporte de torta de filtro, cinzas e sedimentos

Todas as usinas pesquisadas destinam a totalidade da torta de filtro, cinzas e sedimentos, gerados na etapa industrial, para sua utilização em áreas de lavoura da cana. A taxa média de geração das usinas pesquisadas é de 2051,63 kg/ha·ano, 659,60 kg/ha·ano e 1634,31 kg/ha·ano (total = 4345,54 kg/ha·ano), respectivamente. O transporte é realizado em caminhão basculante com capacidade de 8 t e consumo de 2,5 km/L. Levando em conta a distância média entre as usinas pesquisadas e a área agrícola (12 km) as emissões correspondentes são:

$$E_{TF} = 2 \times \left(12 \text{ km} \times \frac{\text{L}}{2,5 \text{ km}} \right) \times \frac{4345,54 \text{ kg}}{\text{ha} \times \text{ano} \times 8000 \text{ kg}} \times 3,01 \frac{\text{kg CO}_2 \text{eq}}{\text{L}} = 15,70 \text{ kg CO}_2 \text{eq/ha} \cdot \text{ano}$$

Note-se que neste caso não foi necessária a divisão das emissões pelo período de base de seis anos, já que as taxas de geração de torta de filtro, cinzas e sedimentos fornecidas pelas usinas pesquisadas são anuais.

5.1.1.4 Transporte de cal e fertilizantes

Com base nos dados de consumo da TAB. 8 (3640 kg de carga), considerando a utilização de um caminhão de 12 t com consumo de 2,5 km/L e 25 km de distância entre o fornecedor e a lavoura, a emissão de GEE correspondente a esta categoria é:

$$E_{TCF} = \frac{2 \times \left(25 \text{ km} \times \frac{\text{L}}{2,5 \text{ km}} \right) \times \frac{3640 \text{ kg}}{12000 \text{ kg} \times \text{ha}} \times 3,01 \frac{\text{kg CO}_2\text{eq}}{\text{L}}}{6 \text{ anos}} = 3,04 \text{ kg CO}_2\text{eq/ha}\cdot\text{ano}$$

5.1.1.5 Fertirrigação

Todas as empresas pesquisadas realizam fertirrigação, isto é, aplicação de vinhaça e águas residuárias oriundas do processo industrial na lavoura, principalmente nos tratos culturais da cana-soca. A área média fertirrigada é de 32%, com taxa média de aplicação de 215 m³/ha. Foram observadas três formas de aplicação: aplicação direta com caminhões tanque (6%); caminhões tanque + conjuntos moto-bomba (34%); e canais de irrigação + conjuntos moto-bomba (60%). No primeiro caso, os caminhões tanque utilizados têm capacidade de 12 m³, percorrem uma distância média de 5 km, e consomem 2,8 km/L de diesel. Dessa forma, o cálculo da emissão de GEE neste caso é:

$$E_{F1} = \frac{2 \times \left(5 \text{ km} \times \frac{\text{L}}{2,8 \text{ km}} \right) \times \frac{215 \text{ m}^3}{12 \text{ m}^3 \times \text{ha}} \times 0,32 \times 0,06 \times 4 \times 3,01 \frac{\text{kg CO}_2\text{eq}}{\text{L}}}{6 \text{ anos}} = 2,47 \text{ kg CO}_2\text{eq/ha}\cdot\text{ano}$$

No caso de fertirrigação com caminhões tanque + conjuntos moto-bomba, a capacidade dos caminhões é de 15 m³, com distância média percorrida de 7 km e consumo de 2,2 km/L. Segundo dados da pesquisa, foi levado em conta um conjunto moto-bomba com potência de 90 cv, com consumo de 16,5 L/h e vazão de 190 m³/h. O cálculo da emissão de GEE é:

$$E_{F2} = \frac{\left[2 \times \left(7 \text{ km} \times \frac{\text{L}}{2,2 \text{ km}} \right) \times \frac{215 \text{ m}^3}{15 \text{ m}^3 \times \text{ha}} + 16,5 \frac{\text{L}}{\text{h}} \times \frac{\text{h}}{190 \text{ m}^3} \times \frac{215 \text{ m}^3}{\text{ha}} \right] \times 0,32 \times 0,34 \times 4 \times 3,01 \frac{\text{kg CO}_2\text{eq}}{\text{L}}}{6 \text{ anos}} = 23,99 \text{ kg CO}_2\text{eq/ha}\cdot\text{ano}$$

No caso de fertirrigação com canais de irrigação + conjuntos moto-bomba, levando em conta as mesmas características do conjunto moto-bomba anterior, as emissões correspondentes são:

$$E_{F3} = \frac{16,5 \frac{\text{L}}{\text{h}} \times \frac{\text{h}}{190 \text{ m}^3} \times \frac{215 \text{ m}^3}{\text{ha}} \times 0,32 \times 0,6 \times 4 \times 3,01 \frac{\text{kg CO}_2 \text{eq}}{\text{L}}}{6 \text{ anos}} = 7,19 \text{ kg CO}_2 \text{eq. ha} \cdot \text{ano}$$

5.1.1.6 Colheita mecânica

Não foram encontrados dados da proporção de colheita manual e colheita mecânica nas usinas pesquisadas, motivo pelo qual foram usados dados do Centro de Tecnologia Canavieira – CTC (2009). Segundo esses dados, em Minas Gerais ocorre 63,3% de colheita manual e 36,7% de colheita mecânica. Na colheita mecânica, normalmente são utilizadas colhedoras com transbordo, as quais têm capacidade de 45 t/h e 35 t/h, com consumo de 40,4 L/h e 9 L/h, respectivamente. Levando em conta a produtividade média das usinas pesquisadas (82,11 t cana/ha²⁸) e a proporção de colheita mecânica (36,7%), a emissão de GEE é:

$$E_{CM} = \frac{\left[\left(\frac{\text{h}}{45 \text{ t}} \times 82,11 \frac{\text{t}}{\text{ha}} \times 40,4 \frac{\text{L}}{\text{h}} \right) + \left(\frac{\text{h}}{35 \text{ t}} \times 82,11 \frac{\text{t}}{\text{ha}} \times 9 \frac{\text{L}}{\text{h}} \right) \right] \times 5 \times 0,367 \times 3,01 \frac{\text{kg CO}_2 \text{eq}}{\text{L}}}{6 \text{ anos}}$$

$$= 87,30 \text{ kg CO}_2 \text{eq/ha} \cdot \text{ano}$$

5.1.1.7 Carregamento após corte manual e transporte da cana-de-açúcar

As usinas pesquisadas realizam carregamento mecânico após o corte manual da cana-de-açúcar. O carregamento é realizado por carregadeiras que têm capacidade de 46 t/h e consumo de 7,10 L/h. O transporte de cana, da área de corte até as usinas, ocorre em caminhões com e sem reboque, com consumo médio de 20,4 mL/t-km e distância percorrida de 24 km (ida e volta). Considerando a produtividade média das usinas pesquisadas (82,11 t/ha) e a fração da área dedicada a colheita manual (0,633) as emissões correspondentes ao carregamento (E_{CC}) e transporte (E_{TC}) são:

$$E_{CC} = \frac{\frac{\text{h}}{46 \text{ t}} \times 7,10 \frac{\text{L}}{\text{h}} \times 82,11 \frac{\text{t}}{\text{ha}} \times 5 \times 0,633 \times 3,01 \frac{\text{kg CO}_2 \text{eq}}{\text{L}}}{6 \text{ anos}} = 20,12 \text{ kg CO}_2 \text{eq/ha} \cdot \text{ano}$$

²⁸ A produtividade da cana não inclui o peso de ponteiros e folhas.

$$E_{TC} = \frac{20,4 \frac{\text{ml}}{\text{t} \times \text{km}} \times \frac{\text{L}}{1000 \text{ ml}} \times 24 \text{ km} \times \frac{82,11 \text{ t}}{\text{ha}} \times 5 \times 3,01 \frac{\text{kg CO}_2 \text{ eq}}{\text{L}}}{6 \text{ anos}} = 100,84 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/ha} \cdot \text{ano}$$

5.1.2 Consumo de calcário e fertilizantes

Nas usinas pesquisadas, não foi possível achar quantidades utilizadas para todas as fórmulas de adubo empregadas, com exceção daquelas indicadas na TAB. 8. Foi levado em conta o uso de N na forma amoniacal; P₂O₅ na forma de superfosfato simples e K₂O na forma de cloreto de potássio, que são as fontes mais comuns desses fertilizantes no Brasil (OLIVEIRA *et al.*, 2007). Quanto ao calcário, o do tipo dolomítico é o mais utilizado. A emissão de GEE correspondente ao consumo de calcário e fertilizantes é:

$$E_{CF} = \frac{\frac{1129,49 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}}{\text{ha} \times \text{ano}} + \frac{298,20 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}}{\text{ha} \times \text{ano}} \times 4}{6} = 387,05 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/ha} \cdot \text{ano}$$

Tabela 8 – Emissão de GEE na obtenção de cal e fertilizantes

Insumo	Consumo (kg/ha)		Fator de emissão (kg CO ₂ eq/kg) ⁽¹⁾	Emissão de GEE (kg CO ₂ eq/ha)	
	Plantio	Cana-soca		Plantio	Cana-soca
Calcário	1520	-	0,50 ⁽²⁾	760	-
Fertilizantes	440 kg (0-28-18)	420 kg (20-00-20)			
N	-	84	3,03	-	254,52
P ₂ O ₅	123	-	2,67	328,41	-
K ₂ O	79	84	0,52	41,08	43,68
TOTAL				1129,49	298,20

(1) *Ecoinvent*

(2) Representa as emissões na obtenção do calcário (0,02 kgCO₂/kg) – *Ecoinvent*, e as emissões do calcário no solo (0,48 kgCO₂eq/kg) – IPCC (2006)

Do total de emissões correspondentes ao consumo de calcário e fertilizantes (387,05 kg CO₂eq/ha·ano), 188,25 CO₂eq/ha são devidas ao consumo de calcário e 198,80 CO₂eq/ha·ano se devem ao consumo de fertilizantes.

5.1.3 Consumo de defensivos agrícolas

Os defensivos agrícolas utilizados (herbicidas e inseticidas) foram classificados de acordo com seu ingrediente ativo/grupo químico, uma vez que os fatores de emissão disponíveis estão expressos em função desses parâmetros. A TAB 9, a seguir, mostra o tipo de defensivo

agrícola, o consumo e os fatores de emissão correspondentes. Com base nesses dados, a emissão de GEE no consumo de defensivos agrícolas é:

$$E_{DA} = \frac{30,39 \text{ kg CO}_2\text{eq}}{\text{ha}} \times 5 = 25,33 \text{ kg CO}_2\text{eq/ha}\cdot\text{ano}$$

Tabela 9 – Emissão de GEE na obtenção de defensivos agrícolas

Defensivo agrícola (ingrediente ativo/grupo químico)	Consumo (kg/ha)	Fator de emissão ⁽¹⁾ (kg CO ₂ eq/kg)	Emissão de GEE (kg CO ₂ eq/ha)
Diuron	0,36	6,94	2,50
2,4-D (Amina; Picloran)	0,17	3,22	0,55
Derivados de uréia	0,77	9,11	7,01
Glifosato	0,27	15,77	4,26
MSMA	0,17	3,20	0,54
Carbamatos	0,85	6,91	5,87
Triazinas	1,17	7,81	9,13
Outros	0,07	7,57 ⁽²⁾	0,53
TOTAL			30,39

(1) *Ecoinvent*

(2) Média dos fatores de emissão

5.1.4 Emissão de GEE devido à queima antes e após a colheita

Nesta categoria, adotaram-se os fatores de emissão para queima de resíduos agrícolas recomendados pelo IPCC (2006): 2,7 g CH₄/kg e 0,07 g N₂O/kg de massa seca (ponteiros e folhas), ou seja, 82,82 g CO₂eq/kg, com fator de combustão de 0,80. Como explicado anteriormente, a liberação de CO₂ durante a queima da biomassa não é levada em conta na quantificação dos GEE porque o carbono liberado será reassimilado pela vegetação (cana-de-açúcar) durante o próximo cultivo. Segundo Seabra (2008), uma tonelada de cana contém 140 kg (massa seca) de ponteiros e folhas (palha), os quais são queimados para colheita manual, ficando depois o palhiço; considerando esses dados, e com base na produtividade média das usinas pesquisadas (82,11 t/ha²⁹), a quantidade de biomassa submetida à queima é da ordem de 13,37 t/ha. Por outro lado, não foi possível encontrar dados do destino de ponteiros, folhas secas e do palhiço nas usinas pesquisadas. Por esse motivo, na presente estimativa considerou-se que tais resíduos são também queimados. Levando em conta a fração de cana queimada em Minas Gerais (68,4%) (CTC, 2011) as emissões correspondentes são:

²⁹ Não inclui o peso de ponteiros e folhas

$$E_{OC} = \frac{13,37 \frac{\text{t}}{\text{ha}} \times \frac{82,82 \text{ g CO}_2\text{eq}}{\text{kg}} \times \frac{1000\text{kg}}{1\text{t}} \times \frac{1 \text{ kg CO}_2\text{eq}}{1000 \text{ g CO}_2\text{eq}} \times 0,80 \times 0,684 \times 5}{6 \text{ anos}} = 504,93 \text{ kg CO}_2\text{eq/ha}\cdot\text{ano}$$

5.1.5 Emissão de N₂O do solo

Como explicado anteriormente, a adição de nitrogênio no solo, por meio de fertilizantes nitrogenados, intensifica os processos de nitrificação e desnitrificação liberando, como subproduto, N₂O à atmosfera. As emissões de N₂O são da ordem de 20 g por kg de N aplicado no solo (IPCC, 2006; UNFCCC, 2006). Com base nos dados da TAB. 8, as emissões correspondentes ao N₂O liberado do solo são:

$$E_N = \frac{\frac{84 \text{ kg N}}{\text{ha}} \times \frac{20 \text{ g N}_2\text{O}}{\text{kg N}} \times \frac{1 \text{ kg N}_2\text{O}}{1000 \text{ g N}_2\text{O}} \times \frac{296 \text{ kg CO}_2\text{eq}}{1 \text{ kg N}_2\text{O}} \times 4}{6 \text{ anos}} = 331,52 \text{ kg CO}_2\text{eq/ha}\cdot\text{ano}$$

5.1.6 Produção de mudas

Não foram encontrados dados detalhados do processo de produção de mudas. No entanto, verificou-se que a tecnologia empregada nesse processo é praticamente a mesma aplicada à lavoura canavieira para corte comercial, sendo que a colheita de mudas é inteiramente manual sem queima prévia, motivo pelo qual não há emissões devidas à combustão nesta fase. As áreas resultantes da multiplicação da cana proveniente dos viveiros de mudas são, em média, 10 a 15 vezes maiores em comparação às áreas de tais viveiros (média de 12,5). Nesse sentido, para o cálculo das emissões de GEE devidas à produção de mudas, foi considerada uma fração (1/12,5 = 0,08) das emissões totais correspondentes à agricultura, desconsiderando as emissões devidas ao transporte de cana (já que as emissões de transporte de mudas foram calculadas separadamente), à queima do canavial e colheita mecânica (uma vez que, como explicado anteriormente, a colheita de mudas de cana-de-açúcar é normalmente realizada de forma manual, sem queima). As emissões resultantes são de 81,45 kg CO₂eq/ha·ano.

5.1.7 Emissões na etapa industrial

Toda a energia utilizada nas usinas pesquisadas é auto-gerada a partir da queima do bagaço de cana, sendo assim não há emissão de GEE devido ao uso de combustíveis fósseis na etapa de industrialização. As emissões diretas de GEE estão associadas principalmente à liberação de

CO₂ durante a queima do bagaço e fermentação do caldo de cana, mas estas emissões, como explicado anteriormente, não são levadas em conta na quantificação dos GEE porque o carbono liberado será re-assimilado pela vegetação (cana-de-açúcar) durante o próximo cultivo (IPCC, 2006). No entanto, existem emissões associadas à obtenção dos produtos químicos utilizados para a produção do etanol (TAB. 10). Os dados de produtos químicos utilizados na etapa industrial foram obtidos de usinas autônomas e usinas anexas. A TAB. 10, a seguir, mostra a média de consumo dos produtos químicos utilizados para produção de álcool. Com base nesses dados, a emissão de GEE correspondente ao consumo de produtos químicos resulta em 42,32 kg CO₂eq/ha·ano.

Tabela 10 – Consumo de produtos químicos na industrialização do etanol

Produto Químico	Consumo (kg/ha·ano)⁽¹⁾	Fator de emissão⁽²⁾ (kg CO₂eq/kg)	Emissões de GEE (kg CO₂eq/ ha·ano)
Fosfatos	0,02	1,58	0,03
Sulfitos	0,10	1,42	0,14
Ácido sulfúrico	28,71	0,14	4,02
Bactericidas	0,78	3,91	3,05
Ciclohexano	2,53	0,91	2,30
Fermento	7,20	1,01	7,27
Soda cáustica	4,62	1,11	5,13
Sulfatos	0,53	0,78	0,41
Superfosfato simples	0,18	2,67	0,48
Uréia	1,30	3,35	4,36
Ácido fosfórico	3,67	1,45	5,32
Cal	44,83	0,01	0,45
Polímeros	0,21	2,71	0,57
Ácido clorídrico	1,11	0,88	0,98
Sal	0,37	1,17	0,43
Soda cáustica	0,08	1,11	0,09
Outros ⁽³⁾	4,83	1,51 ⁽⁴⁾	7,29
TOTAL			42,32

(1) Consumo calculado com base na quantidade de produto químico utilizado na indústria (kg/t cana) e na produtividade da área agrícola de cada usina (t cana/ha)

(2) *Ecoinvent*

(3) Produtos químicos cujo fator de emissão não foi identificado

(4) Média dos fatores de emissão

Cabe ressaltar que o cálculo das emissões de GEE resultantes da obtenção de produtos químicos na etapa industrial corresponde somente aos produtos utilizados para produção de etanol. As usinas anexas também utilizam produtos químicos para a produção de açúcar, no entanto tais produtos foram excluídos da análise e somente foram levados em conta os produtos usados na produção de álcool.

A seguir, a TAB. 11 a seguir e a FIG. 23 mostram o resumo de resultados da estimativa inicial de GEE para as etapas de agricultura e industrialização.

Tabela 11 – Emissões de GEE na agricultura e industrialização da cana-de-açúcar

Categoria	Emissões de GEE (kg CO₂eq/ha·ano)	
Consumo de combustível		332,60
Operações agrícolas	69,77	
Transporte de insumos	20,92	
Fertirrigação	33,65	
Colheita, carregamento e transporte da cana	208,26	
Consumo de calcário e fertilizantes		387,05
Consumo de calcário	188,25	
Consumo de fertilizantes	198,80	
Consumo de defensivos agrícolas		25,33
Queima do canavial/palhiço		504,93
N ₂ O liberado do solo		331,52
Produção de mudas		81,45
Uso de produtos químicos na etapa industrial		42,32
TOTAL		1705,20

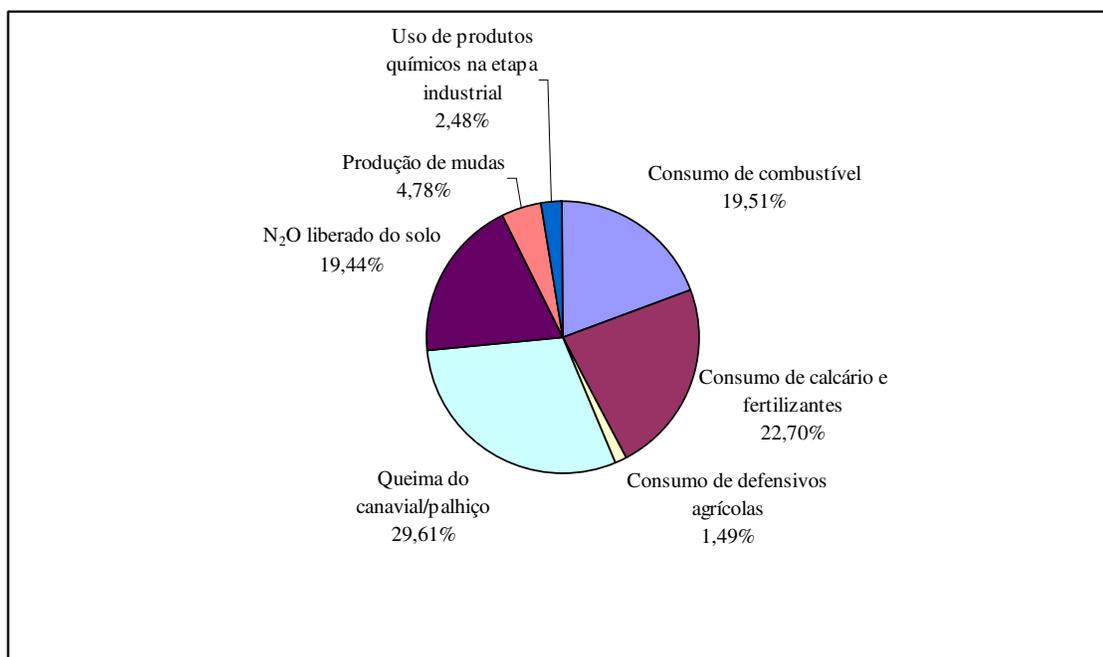


Figura 23: Contribuição de cada categoria ao total de emissões

Os resultados da estimativa inicial de GEE mostram que a maior parte da emissão de GEE durante as etapas de agricultura e industrialização da cana-de-açúcar para produção de etanol ocorre principalmente durante a queima do canavial e do palhiço, onde há emissão de CH₄ e N₂O. Aqui, cabe ressaltar que as emissões decorrentes da queima dependem muito da

quantidade de biomassa a ser submetida a tal prática. Nesse sentido, é preciso determinar criteriosamente a quantidade de biomassa efetivamente queimada.

Outra fonte importante de emissões é a aplicação de calcário no solo, o qual é usado em grande quantidade na lavoura. Essa fonte de emissão também merece muita atenção, uma vez que as emissões resultantes são expressivas para o uso de um único produto (calcário); as quantidades reais de consumo devem ser pesquisadas detalhadamente. A aplicação de fertilizantes nitrogenados, os quais promovem a liberação de N_2O do solo, também resulta em quantidades importantes de emissão de GEE. Nesse aspecto, pode-se dizer que a emissão total de GEE é muito sensível à quantidade de fertilizantes de nitrogênio adicionados no solo, uma vez que, além de apresentarem fator de emissão alto, estes contribuem tanto para as emissões associadas ao consumo de fertilizantes quanto à correspondente emissão de N_2O do solo. Por essa razão, a determinação da quantidade de fertilizantes para o cálculo das emissões deve também ser bastante criteriosa. O uso de combustíveis fósseis também apresenta um volume importante de emissões de GEE, com maior proporção para as operações de colheita mecanizada, carregamento e transporte da cana. A maior mecanização das operações agrícolas, a qual é uma tendência do setor, resultará no aumento das emissões de GEE na categoria de uso de combustíveis fósseis. O consumo de defensivos agrícolas é o que menos contribui (1,49%) para a emissão total de GEE, no entanto, os fatores de emissão desses defensivos são bastante elevados, motivo pelo qual o aumento do seu consumo pode resultar em incrementos importantes no total de emissões.

Tendo identificado as principais fontes de emissão de GEE na agricultura e industrialização da cana-de-açúcar, a seguinte fase da pesquisa foi focada principalmente nas categorias de queima do canavial/palhiço, consumo de fertilizantes, consumo de calcário, consumo de combustível e emissões de N_2O do solo.

5.2 Identificação de etapas produtivas para a produção de etanol e estimativa das emissões em tais etapas

Como explicado anteriormente, uma vez identificadas as fontes de emissão responsáveis pela maior parte das emissões, realizou-se um estudo mais detalhado por meio de uma pesquisa de campo, focando a coleta de dados nas fontes identificadas na estimativa inicial das emissões. Nesta fase foram coletados dados de um total de quatro usinas, as quais serão chamadas de usina 10, usina 11, usina 12 e usina 13. A TAB. 12 mostra um resumo de dados de tais usinas.

Tabela 12: Dados das usinas estudadas na pesquisa de campo

Descrição	Usina 10	Usina 11	Usina 12	Usina 13	Totais
Área total (ha)	16000	23000	15000	19155	73155
Área de cana de ano e meio (ha)	2240	3450	1500	1464	8654
Área de cana de ano (ha)	480	1550	750	2196	4976
Área de soqueira (ha)	12480	17000	12750	14640	56870
Área de pousio (ha)	800	1000	0	855	2655
Área de torta de filtro no plantio (ha)	800	1250	1000	0	3050
Área torta de filtro em soqueira (ha)	0	1250	0	2105	3355
Área de vinhaça no plantio (ha)	192	2500	520	0	3212
Área de vinhaça em soqueira (ha)	1728	4250	2080	2379	10437
Área de irrigação suplementar plantio (ha)	240	0	0	0	240
Área de irrigação suplementar socaria (ha)	2160	0	0	0	2160
Área de plantio mecânico	0	0	0	3660	3660
Área de cultivo mínimo (ha)	1904	0	0	1464	3368
					Média
Produtividade da cana não irrigada (t/ha)	75	90	101	92	89,5
Produtividade da cana irrigada (t/ha)	?	?	96 ⁽²⁾	110	103
n° de cortes da cana não irrigada	5	6	5,5	6	5,63
n° de cortes da cana irrigada	7	8	7	6	7
Período de pousio (meses)	6	4	0	4	4,67
Área com cana crua					54,50% ⁽¹⁾
Área com cana queimada					45,50% ⁽¹⁾
Área de colheita manual					71,20% ⁽¹⁾
Área de colheita mecânica					29,80% ⁽¹⁾

(1) Dados do CTC (2011)

(2) Normalmente a produtividade da cana em áreas irrigadas é maior em comparação a áreas não irrigadas, no entanto, na Usina 12, a irrigação (fertirrigação com vinhaça) é realizada para melhorar a produção em áreas de baixa produtividade, por isso, neste caso, a produtividade é menor em comparação a áreas não irrigadas.

Nesta fase da pesquisa, identificaram-se as etapas produtivas e atividades agrícolas e industriais associadas às fontes mais importantes de emissão de GEE. Como explicado anteriormente, cada etapa produtivas está constituída de determinadas atividades agrícolas e industriais praticadas pelas usinas pesquisadas.

De acordo com os resultado da pesquisa de campo, foram identificadas as seguintes etapas produtivas nas usinas pesquisadas: manutenção da área de cultivo, produção de mudas, aplicação de corretivos, preparo do solo e plantio, tratos culturais em soqueira, adubação no plantio, adubação em soqueira, aplicação de defensivos agrícolas, queima do canavial, colheita, transporte de cana e produção de álcool. A seguir mostram-se os dados colhidos nas usinas pesquisadas nesta fase do estudo, para cada etapa produtiva e cada atividade agrícola e industrial (vide Quadro 14), assim como as emissões de gases de GEE correspondentes. De modo geral, as emissões de GEE relativas a cada etapa produtiva foram estimadas mediante a equação 4.4.

5.2.1 Manutenção da área de cultivo

Nas usinas pesquisadas sempre é realizada a manutenção da área antes do plantio, a qual consiste na confecção de carregadores, terraços e micro-bacias. As emissões de GEE dependem principalmente do consumo de combustível, o qual depende da capacidade de trabalho dos equipamentos e da fração de área trabalhada. Para a estimativa das emissões nesta operação e nas operações de agricultura e transporte relatadas em diante foi levado em conta o fator de emissão do diesel determinado anteriormente (3,02 kg CO₂eq/L). Assim mesmo, de modo geral, para o cálculo das emissões de GEE nesta categoria e daqui em diante foi utilizada a equação 4.4. A TAB 13 mostra dados dos veículos utilizados para as operações de manutenção, segundo a pesquisa de campo, assim como a fração da área trabalhada e as emissões de GEE correspondentes.

Por outro lado, como colocado anteriormente, as cinzas e sedimentos gerados durante a industrialização da cana-de-açúcar são enviados, na sua totalidade, à área agrícola. Esses resíduos são enviados principalmente a áreas de recuperação de áreas erodidas, acerto de terraços e acerto de carregadores e estradas, entre outros. Por isso, as emissões correspondentes ao transporte de cinzas e sedimentos foram incluídas nas operações de manutenção da área antes do plantio. Para o cálculo das emissões nesta categoria foram usados dados de geração de cinzas e sedimentos das usinas pesquisadas durante a estimativa inicial de GEE (ANEXO E), com distância média de transporte das usinas estudadas na pesquisa de campo. A TAB 13, a seguir, também mostra as emissões médias de GEE correspondentes ao transporte de cinzas e sedimentos e as emissões totais resultantes.

Tabela 13: Emissões de GEE na manutenção da área de cultivo

Operações de manutenção	Equipamento	Consumo (L diesel/ha)	Fração da área trabalhada			
			Usina 10	Usina 11	Usina 12	Usina 13
Confecção de carregadores	Motoniveladora	6,25	1,00	1,00	1,00	1,00
Confecção de terraços	Motoniveladora	6,25	0,90	1,00	0,90	1,00
Confecção de micro-bacias	Pá-carregadeira	2,50	0,20	0,20	0,50	1,00
Encabeçamento de terraços	Motoniveladora	6,25	0,00	0,00	1,00	1,00
Emissões nas operações de manutenção (kg CO ₂ eq/ha)			37,25	39,13	58,32	63,96
Emissões no transporte de cinzas e sedimentos (kg CO ₂ eq/ha)			17,19	17,19	17,19	17,19
Emissões totais de GEE (kg CO₂eq/ha)			54,44	56,32	75,51	81,15

5.2.2 Produção de mudas

Para o cálculo das emissões correspondentes à produção de mudas, foi utilizada a mesma metodologia da estimativa inicial de GEE, onde as emissões resultantes representam uma fração (0,08) das emissões totais. De acordo com a pesquisa de campo, a produção de mudas é realizada com cana de ano e meio, sem irrigação, com colheita manual e sem queima prévia do canavial. Sendo assim, para o cálculo das emissões correspondentes a esta categoria, foram consideradas somente as emissões referentes a tais práticas, com dados coletados durante a pesquisa de campo. A TAB 14, a seguir, mostra o resultado para as emissões de GEE na produção de mudas. Os *inputs* e dados de entrada, incluindo os dados de consumo de insumos para a estimativa dessas emissões estão mostrados ao longo da seção 5.2 deste capítulo.

Tabela 14: Emissões de GEE na produção de mudas

Operação	Emissões de GEE (kg CO ₂ eq/ha)			
	Usina 10	Usina 11	Usina 12	Usina 13
Operações de manutenção	4,36	4,51	6,04	6,49
Aplicação de calcário e gesso	228,30	75,16	109,82	97,21
Cultivo convencional	19,35	27,64	17,17	24,17
Adução de cana de ano e meio, em área sem vinhaça	85,67	128,38	88,71	52,54
Aplicação de defensivos agrícolas	2,43	2,43	2,43	2,43
Colheita manual	2,79	3,35	3,72	3,28
Total	342,9	241,46	227,88	186,12

Por outro lado, no cálculo das emissões de GEE referentes à produção de mudas, foram incluídas as emissões decorrentes do transporte das mudas até a usina. Aqui foram considerados os mesmos dados de transporte utilizados na estimativa inicial de GEE, com dados de distância percorrida entre a área de produção de mudas e a área de plantio coletados na pesquisa de campo. Com base nesses dados, a TAB. 15, a seguir, mostra as emissões resultantes do transporte de mudas, incluindo as emissões na produção das mesmas e emissões totais.

Tabela 15: Emissões de GEE no transporte e produção de mudas

Veículo / Capacidade	Carga (t mudas/ha)	Consumo (km/L diesel)	Distância (km)			
			Usina 10	Usina 11	Usina 12	Usina 13
Caminhão 12 t	12	2,3	15	15	12	10
Emissões no transporte de mudas (kg CO ₂ eq/ha) ⁽¹⁾			39,26	39,26	31,41	26,17
Emissões na produção de mudas (kg CO ₂ eq/ha) ⁽¹⁾			342,9	241,46	227,88	186,12
Emissões totais de GEE (kg CO₂eq/ha)			382,16	280,72	259,29	212,29

(1) As emissões em kg CO₂eq correspondem a um hectare de produção de cana-de-açúcar

5.2.3 Aplicação de corretivos

Conforme dados da pesquisa de campo, diferentemente dos dados coletados na estimativa inicial de GEE, durante a reforma do canavial são aplicadas quantidades consideráveis de calcário dolomítico e gesso. Da mesma forma, também são aplicados tais corretivos em soqueira, normalmente durante o terceiro corte. Sendo assim, a aplicação de corretivos gera quantidades importantes de GEE, principalmente o CO₂ originado a partir da dissolução do calcário do solo. A TAB 16, a seguir, mostra as quantidades aplicadas de calcário e gesso e as emissões de GEE resultantes durante a reforma e plantio nas usinas estudadas durante a pesquisa de campo.

Tabela 16: Emissões de GEE na aplicação de corretivos

Corretivo	Fator de emissão (kg CO ₂ eq/kg)	Usina 10		Usina 11		Usina 12		Usina 13	
		Quantidade (kg/ha)	Fração da área aplicada						
Calcário									
Aplicação durante a reforma do canavial	0,50 ⁽²⁾	5000	1	2000	0,9	3000	0,80	2000	1,00
Aplicação em soqueira ⁽¹⁾	0,50 ⁽²⁾	2500	0,2	2000	0,2	2000	0,15	2200	0,2
Gesso									
Aplicação durante a reforma do canavial	1,87×10 ⁻³	1500	1	500	0,9	1500	0,40	1000	1,00
Aplicação em soqueira ⁽¹⁾	1,87×10 ⁻³	1000	0,2	2000	0,2	1000	0,05	1300	0,15
Emissões de GEE (kg CO₂eq/ha)		2753,18		1101,59		1351,22		1222,23	

(1) Os corretivos são aplicados em soqueira normalmente durante o terceiro corte

(2) Representa as emissões na obtenção do calcário (0,02 kgCO₂/kg) – *Ecoinvent*, e as emissões do calcário no solo (0,48 kgCO₂eq/kg) – IPCC (2006)

Também foram calculadas as emissões de transporte dos corretivos e outros insumos agrícolas desde as instalações dos fornecedores até a área de aplicação na lavoura. Nesse sentido, foram averiguadas as distâncias de transporte e o tipo de veículo normalmente utilizado para esse fim. Segundo a pesquisa de campo, os corretivos são transportados pelos fornecedores e diretamente aplicados na área agrícola. Já outros insumos tais como fertilizantes e defensivos agrícolas são transportados e armazenados em áreas de estocagem das usinas. Posteriormente, quando necessário, os insumos estocados são carregados e transportados à área de aplicação na lavoura. Com base na pesquisa de campo, a TAB. 17, a seguir, mostra dados dos veículos normalmente utilizados para o transporte de insumos e os fatores de emissão de GEE correspondentes.

Tabela 17: Veículos utilizados para transporte de insumos agrícolas e seus fatores de emissão de GEE

Insumo	Veículo	Fator de emissão (CO ₂ eq/tkm) ⁽¹⁾	Veículo
	Fornecedor - usina		Usina – lavoura
Gesso	Caminhão 27 t	0,13	-
Calcário	Caminhão 27 t	0,13	-
Fertilizantes	Caminhão 27 t	0,13	Caminhão 15 t
Defensivos agrícolas	Caminhão 15 t	0,12	Trator

(1) *Ecoinvent* (IFU/IFEU, 2006)

As emissões de GEE referentes ao transporte de corretivos foram calculadas com base em dados da TAB. 17, na carga transportada e na distância entre os fornecedores e a área de aplicação na lavoura. A carga transportada foi calculada com base em dados da TAB. 16. A TAB. 18, a seguir, mostra esses dados e as emissões correspondentes, além das emissões totais resultantes, incluindo a aplicação e transporte de corretivos.

Tabela 18: Emissões de GEE no transporte de corretivos

Corretivo	Veículo	Fator de emissão ⁽¹⁾ (kg CO ₂ eq/tkm)	Usina 10		Usina 11		Usina 12		Usina 13	
			Carga Total (kg/ha) ⁽²⁾	Distância (km) ⁽³⁾						
Calcário	Caminhão 27t	0,13	5500	150	2200	20	2700	150	2440	220
Gesso	Caminhão 27t	0,13	1700	400	850	250	650	500	1195	380
Emissões no transporte de corretivos			391,30		66,69		189,80		257,64	
Emissões na aplicação de corretivos			2753,18		1101,59		1351,22		1222,23	
Emissões totais de GEE (kg CO₂eq/ha)			3144,48		1168,28		1541,02		1479,87	

(1) *Ecoinvent* (IFU/IFEU, 2006)

(2) Carga total calculada com base na TAB. 16

(3) Distância compreendida entre o fornecedor e a área de aplicação na lavoura

5.2.4 Preparo do solo e plantio

Durante a pesquisa de campo foram observadas as seguintes práticas de preparo do solo e plantio nas usinas estudadas: cultivo convencional (FIG. 24), cultivo mínimo e plantio mecanizado. O cultivo convencional é semi-mecanizado; suas principais características são a sulcação e adubação mecanizada com plantio manual. O cultivo mínimo diferencia-se do cultivo mecanizado principalmente em que a eliminação das soqueiras é realizada totalmente de forma química e, além disso, não são realizadas gradagens pesadas no solo. Já o plantio mecânico tem a principal característica de usar plantadoras mecânicas para realizar a sulcação, adubação, distribuição de mudas, fechamento do sulco e aplicação de herbicida em

uma única operação. A seguir mostram-se os dados coletados durante a pesquisa de campo e as emissões de GEE resultantes para o preparo do solo e plantio.



Figura 24: Área de plantio de cana-de-açúcar

Fonte: Pesquisa de campo

5.2.4.1 Cultivo convencional

A maior parte da área de plantio (51,56%)³⁰ das usinas pesquisadas é cultivada sob regime de cultivo convencional. As operações realizadas nesta categoria são similares em todas as usinas pesquisadas, no entanto existem variações importantes na fração de área trabalhada em cada usina. Assim mesmo, há variação em algumas operações, principalmente em função do tipo de cana plantado (cana de ano ou cana de ano e meio). Nesse sentido, se a cana é de ano e meio, a eliminação química das soqueiras é predominante; já se a cana é de ano, é preferida a eliminação mecânica. Nesses casos, a fração de área trabalhada foi calculada mediante a média ponderada proporcional à área de cana de ano e meio e cana de ano presentes na área de soqueira. Por outro lado, nas operações de cultivo foi incluída a área trabalhada correspondente à aplicação de calcário e gesso em soqueira.

Para o cálculo das emissões de GEE no preparo do solo e plantio, incluindo cultivo convencional, cultivo mínimo e plantio mecanizado, foram extraídos dados de consumo de combustível de equipamentos agrícolas relatados em Macedo *et al.* (2004). A TAB. 19, a seguir, mostra esses dados, a fração de área trabalhada em cada operação agrícola e as emissões de GEE resultantes.

³⁰ A proporção de área agrícola dedicada ao cultivo convencional e outras práticas foi determinada com base nos dados de área agrícola relacionados na TAB. 12.

Tabela 19: Emissões de GEE no cultivo convencional

Operações	Equipamento	Consumo (L diesel/ha) ⁽¹⁾	Fração da área trabalhada ⁽²⁾			
			Usina 10	Usina 11	Usina 12	Usina 13
Aplicação de calcário	Caminhão distribuidor de calcário	3,73	1,20	1,10	0,95	1,15
Aplicação de gesso	Caminhão distribuidor de gesso	3,73	1,20	1,10	0,45	1,15
Eliminação mecânica das soqueiras	Eliminador mecânico de soqueira	11,09	0,41	0,21	0,20	0,70
Eliminação química das soqueiras	Aplicador de herbicida	1,6	0,59	0,79	0,80	0,30
Gradagem Pesada I	Grade 18 discos ×32"	21,23	0,36	1,00	0,30	0,30
Subsolagem	Subsolador	26	1,00	1,00	0,60	1,00
Gradagem Pesada II	Grade 20 discos ×26"	20,44	0,00	0,70	0,00	1,00
Gradagem de acabamento	Grade 40 discos ×20"	9,38	0,00	1,00	1,00	0,00
Sulcação e adubação	Sulcador-adubador duplo	13,64	1,00	1,00	1,00	1,00
Adubação com torta de filtro	Carreta para adubação com torta de filtro	5,33	0,29	0,25	0,44	0,00
Distribuição de mudas	Carreta para plantio	6,67	1,00	1,00	1,00	1,00
Fechamento do sulco/aplicação de inseticida	Cobridor de mudas com discos	2,67	1,00	1,00	1,00	1,00
Aplicação de herbicida	Aplicador de herbicida	1,6	1,00	1,00	1,00	1,00
Cultivo mecânico (quebra do meio)	Cultivador para quebra do meio	6,15	1,00	1,00	0,70	1,00
Emissões de GEE (kg CO₂eq/ha)			241,89	345,49	214,61	302,09

(1) Dados baseados em Macedo *et al.* (2004)

(2) Inclui a fração de área trabalhada durante o 1º e 3º cortes da cana-de-açúcar

5.2.4.2 Plantio mecanizado

Dentre as usinas estudadas na pesquisa de campo, somente uma (Usina 13) pratica plantio mecanizado. Nesse sentido, do total da área de plantio das usinas pesquisadas, somente 26,85% é destinada ao plantio mecânico. A plantadora utilizada é do tipo PCP (plantadora de cana picada) tracionada a trator; as mudas são abastecidas por um caminhão de transbordo. Como explicado anteriormente, a plantadora mecânica realiza a sulcação, adubação, distribuição de mudas, fechamento do sulco e aplicação de inseticida em uma única operação. Sendo assim, algumas operações convencionais são simplificadas, resultando em menor utilização de alguns equipamentos agrícolas (TAB. 20), o qual, por sua vez, resulta em menores quantidades emitidas de GEE.

Tabela 20: Emissões de GEE no plantio mecânico

Operações	Equipamento	Consumo (L diesel/ha) ⁽¹⁾	Fração da área trabalhada Usina 13
Aplicação de calcário	Caminhão distribuidor de calcário	3,73	1,15
Aplicação de gesso	Caminhão distribuidor de gesso	3,73	1,15
Eliminação mecânica das soqueiras	Eliminador mecânico de soqueira	11,09	0,70
Eliminação química das soqueiras	Aplicador de herbicida	1,6	0,30
Gradagem Pesada I	Grade 18 discos ×32"	21,23	0,30
Subsolagem	Subsolador	26	1,00
Gradagem Pesada II	Grade 20 discos ×26"	20,44	1,00
Gradagem Pesada III	Grade 20 discos ×26"	20,44	0,00
Gradagem de acabamento	Grade 40 discos ×20"	9,38	0,00
Sulcação, adubação, distribuição de mudas, fechamento do sulco e aplicação de inseticida	Plantadora	15,99 ⁽²⁾	1,00
Transbordo para distribuição de mudas	Caminhão de transbordo	6,43	1,00
Aplicação de herbicida	Aplicador de herbicida	1,6	1,00
Cultivo mecânico (quebra do meio)	Cultivador para quebra do meio	6,15	1,00
Emissões de GEE (kg CO₂eq/ha)			300,40

(1) Dados baseados em Macedo *et al.* (2004)

(2) Consumo médio do trator, segundo Lopes *et al.* (2003)

5.2.4.3 Cultivo mínimo

No preparo de solo e plantio, o cultivo mínimo é a atividade agrícola menos empregada nas usinas pesquisadas. Esta prática corresponde a 24,71% da área total destinada ao plantio, sendo que somente duas das quatro usinas estudadas na pesquisa de campo realizam cultivo mínimo. Neste caso, como colocado anteriormente, algumas operações agrícolas são eliminadas, resultando naquelas citadas na TAB. 21. Uma das usinas (Usina 13) realiza cultivo mínimo com plantio mecanizado; dessa forma, algumas operações de cultivo mínimo são realizadas conjuntamente pela plantadora mecânica. A TAB. 21, a seguir, também mostra a fração de área trabalhada no regime de cultivo mínimo e as emissões de GEE resultantes.

Tabela 21: Emissões de GEE nas operações de cultivo mínimo

Operações	Equipamento	Consumo (L diesel/ha) ⁽¹⁾	Fração da área trabalhada			
			Usina 10	Usina 11	Usina 12	Usina 13
Aplicação de calcário	Carreta distribuidora de calcário	3,73	1,20			1,15
Aplicação de gesso	Carreta distribuidora de gesso	3,73	1,20			1,15
Eliminação química das soqueiras	Aplicador de herbicida	11,09	1,00			1,00
Subsolagem	Subsolador	26	0,70			0,70
Sulcação e adubação	Sulcador-adubador duplo	13,64	1,00			0,00
Distribuição de mudas	Carreta para plantio	6,67	1,00			0,00
Fechamento do sulco e aplicação de inseticida	Cobridor de mudas com discos	2,67	1,00	Não pratica	Não pratica	0,00
Sulcação, adubação, distribuição de mudas, fechamento do sulco e aplicação de inseticida ⁽²⁾	Plantadora	15,99 ⁽³⁾	0,00			1,00
Transbordo para distribuição de mudas ⁽²⁾	Caminhão de transbordo	6,43	0,00			1,00
Aplicação de herbicida	Aplicador de herbicida	1,6	1,00			1,00
Cultivo mecânico (quebra do meio)	Cultivador para quebra do meio	6,15	0,70			1,00
Emissões de GEE (kg CO₂eq/ha)			202,05	-	-	204,80

(1) Dados baseados em Macedo *et al.* (2004)

(2) Operação realizada durante o plantio mecânico

(3) Dados extraídos de Lopes *et al.* (2003)

5.2.5 Tratos culturais em soqueira

As operações em soqueira consistem basicamente no cultivo tríplice e na aplicação de herbicida. Algumas usinas pesquisadas (Usinas 10 e 13) realizam aplicação de torta de filtro em parte da área de soqueira. Nesse caso não é realizado o cultivo tríplice. Um aspecto importante dos tratos culturais em soqueira nas usinas pesquisadas é o fato de que toda a palha remanescente após a colheita, seja manual ou mecânica, é deixada no solo. Isto faz com que o nitrogênio contido na palha retorne ao solo, resultando em emissões de N₂O provocadas pela atividade microbiana. Estas emissões foram consideradas juntamente com as emissões correspondentes à colheita manual e mecânica e serão discutidas posteriormente. A TAB. 22, a seguir, mostra as operações em soqueira e suas respectivas emissões de GEE.

Tabela 22: Emissões de GEE nas operações em soqueira

Operações	Equipamento	Consumo (L diesel/ha) ⁽¹⁾	Fração da área trabalhada			
			Usina 10	Usina 11	Usina 12	Usina 13
Cultivo triplice operação	Cultivador triplice	7,08	0,93	1,00	1,00	0,86
Adubação com torta de filtro	Carreta para adubação com torta de filtro	5,33	0,07	0,00	0,00	0,14
Aplicação de herbicida	Aplicador de herbicida	1,6	1,00	1,00	1,00	1,00
Emissões de GEE (kg CO₂eq/ha)			25,76	26,13	26,13	25,39

(1) Dados baseados em Macedo *et al.* (2004)

5.2.6 Adubação no plantio

As práticas de adubação no plantio são variadas nas usinas pesquisadas, principalmente em função do tipo de cana (cana de ano ou cana de ano e meio), da fertirrigação (áreas com vinhaça e áreas sem vinhaça) e da adubação com torta de filtro; a quantidade de adubo utilizada depende dessas variáveis. Para o cálculo das emissões de GEE nesta categoria, foram incluídas as emissões correspondentes à (1) obtenção dos fertilizantes, (2) transporte e (3) emissões de N₂O do solo, devido à aplicação de fertilizantes nitrogenados, incluindo a aplicação de vinhaça. Foram utilizados os mesmos fatores de emissão levados em conta na estimativa inicial de GEE (3,02 kg CO₂eq/kg para o fertilizante nitrogenado; 2,66 kg CO₂eq/kg para o fertilizante P₂O₅; e 0,51 kg CO₂eq/kg para o fertilizante K₂O), extraídos do *Ecoinvent* (IFU/IFEU, 2006). Da mesma forma, o fator de emissão de N₂O considerado foi de 20 g por kg de N adicionado ao solo (IPCC, 2006; UNFCCC, 2006).

Para o cálculo das emissões no transporte de fertilizantes, a estimativa da carga transportada foi realizada levando em conta três situações presentes nas usinas pesquisadas:

1. Quando a adubação requer somente N, a fórmula mais empregada é 45-00-00. Dessa forma, existe uma fração inerte de 55% no adubo³¹.
2. Quando a adubação requer somente P, a fórmula mais empregada é 00-18-00, sendo a fração inerte de 72% neste caso.

³¹ A fórmula de adubo 45-00-00 indica presença de 45% de fertilizante N no adubo, o restante (55%) corresponde à fração inerte do mesmo.

3. Para o caso em que são utilizados adubos que contêm mais de um fertilizante (formulação NPK), foi determinada a fração média dos componentes inertes presentes na formulação dos adubos utilizados pelas usinas pesquisadas: 00-14-40; 00-21-30; 00-25-15; 00-28-18; 05-25-30; 06-18-36; 08-22-30; 09-26-25; 14-20-24; 08-20-20; 20-00-20 (para cana-planta)³² e 14-00-18; 16-00-30; 18-00-27; 18-00-36; 18-07-30; 20-00-20; 20-00-24; 22-00-30; 20-08-25; 35-14-00; 20-00-26 (para cana-soca). Dessa forma, foi determinada uma fração média de 52,45% de fertilizante nos adubos utilizados na cana-planta (47,55 de fração inerte) e 46,91% para os adubos utilizados em cana-soca (53,09% de fração inerte); o restante corresponde à fração inerte. A carga total transportada em cada caso foi determinada adicionando-se a fração inerte ao total de fertilizante empregado em cada situação.

Por outro lado, durante a pesquisa de campo foi observado que a maioria das usinas realizam adubação complementar durante a operação de quebra do meio. As emissões correspondentes a tal adubação foram incluídas na adubação durante o plantio.

Levando em conta essas considerações, a seguir mostram-se os dados colhidos durante a pesquisa de campo e as emissões de GEE resultantes nas seguintes situações de adubação no plantio observadas nas usinas pesquisadas: adubação de cana de ano e meio em área de vinhaça; adubação de cana de ano e meio em área sem vinhaça; adubação de cana de ano em área de vinhaça; adubação de cana de ano em área sem vinhaça; e adubação com torta de filtro.

5.2.6.1 Adubação de cana de ano e meio em área de vinhaça

Nas usinas estudadas durante a pesquisa de campo, a adubação com vinhaça substituiu totalmente a utilização de fertilizantes potássicos sintéticos. No entanto, existe certa variação nas quantidades de vinhaça aplicadas, a qual contribui para a variação nas emissões de N₂O devido ao N contido na vinhaça. Assim mesmo, observa-se uma certa relação entre a quantidade de vinhaça aplicada e a quantidade utilizada de fertilizante nitrogenado. Nesse sentido, quanto maior a quantidade aplicada de vinhaça, menor a quantidade de fertilizante N. A quantidade total de N aplicado na adubação, seja por meio da vinhaça ou por meio do fertilizante, mostra-se importante para o cálculo de emissões de GEE, já que o fator de emissão de N₂O do solo devido à adição de N é alto. A carga total de fertilizante transportada

³² As fórmulas dos adubos citados expressam o conteúdo (%) de N, P₂O₅ e K₂O, respectivamente.

(incluindo a fração inerte) e a distância de transporte também afetam consideravelmente o resultado final das emissões. As emissões resultantes mostram-se sensíveis a esses fatores. A TAB. 23, a seguir, mostra as quantidades de adubo aplicadas nas usinas pesquisadas, a distância percorrida para o transporte dos fertilizantes e as emissões de GEE resultantes.

Tabela 23: Emissões de GEE devido ao uso de fertilizantes em áreas de cana de ano e meio e de vinhaça

Fertilizante	Quantidade de adubo utilizado (kg/ha)			
	Usina 10	Usina 11	Usina 12	Usina 13
N	0	40	70	25
P (P ₂ O ₅)	207	200	120	125
K (K ₂ O)	0	0	0	0
Carga total (kg/ha) ⁽¹⁾	207	240	190	150
Distância de transporte dos fertilizantes (km) ⁽²⁾	316,5	330	85	220
Emissões de GEE (kg CO₂eq/ha)⁽³⁾	645,2535	940,06	972,61	579,36

(1) Não inclui a fração inerte

(2) Inclui a distância entre o fornecedor e a área de estocagem da usina e a distância entre a área de estocagem da usina e a área de aplicação na lavoura

(3) Inclui as emissões referentes à obtenção dos fertilizantes; emissões de transporte dos fertilizantes, incluindo a carga correspondente à fração inerte; e as emissões referentes à liberação de N₂O do solo devido à aplicação dos fertilizantes.

Por outro lado, uma vez que a adubação com vinhaça (FIG. 25) resulta também na emissão de GEE devido ao uso de equipamentos necessários para a fertirrigação, nesta categoria também foram consideradas as emissões correspondentes ao uso de veículos e conjuntos motobomba, em função do método de fertirrigação. Nesse sentido, os dados colhidos durante a estimativa inicial de GEE foram atualizados na pesquisa de campo. Dos métodos de aplicação de vinhaça observados na pesquisa de campo, a aplicação por meio de caminhões tanque e conjuntos motobomba é o mais frequente (58,75% da área de aplicação de vinhaça), seguido pela aplicação por canais de irrigação e conjuntos motobomba (39,75% da área de vinhaça). Já a aplicação direta por meio de caminhões tanque é o método menos utilizado (1,5% da área de aplicação de vinhaça). Quanto às emissões de GEE, estas variam principalmente em função da lâmina de vinhaça aplicada, e da distância percorrida pelo caminhão-tanque, dependendo do método de fertirrigação. As tabelas 24, 25 e 26, a seguir, mostram os veículos e equipamentos utilizados, as lâminas de vinhaça aplicadas e as emissões de GEE resultantes em cada método de fertirrigação observado na pesquisa de campo.



Figura 25: Aplicação de vinhaça por meio de conjunto motobomba

Fonte: Pesquisa de campo

Tabela 24: Emissões de GEE na aplicação de vinhaça com caminhões-tanque e conjuntos motobomba

Veículo/Equipamento	Consumo de diesel (L/km) ⁽¹⁾	Usina 10		Usina 11		Usina 12		Usina 13	
		Lâmina aplicada (m ³ /ha)	Distância percorrida (km)	Lâmina aplicada (m ³ /ha)	Distância percorrida (km)	Lâmina aplicada (m ³ /ha)	Distância percorrida (km)	Lâmina aplicada (m ³ /ha)	Distância percorrida (km)
Caminhão-tanque 60m ³	1,3	215	16,5	70	25	96	25	170	5
Emissões kg (CO₂eq/ha)		273,79		135,06		185,23		65,60	
Conjunto motobomba com potência de 90 cv e vazão de 190 m ³ /h	16,5	215	-	70	-	96	-	170	-
Emissões kg (CO₂eq/ha)		56,20		18,30		25,09		44,44	
Emissões totais de GEE (kg (CO₂eq/ha))		329,99		153,36		210,32		110,04	

(1) Dados baseados em Macedo *et al.* (2004)

Tabela 25: Emissões de GEE na aplicação de vinhaça por meio de canais de irrigação

Equipamento	Consumo de diesel (L/h) ⁽¹⁾	Lâmina de vinhaça aplicada (m ³ /ha)			
		Usina 10	Usina 11	Usina 12	Usina 13
Conjunto motobomba com potência de 90 cv e vazão de 190 m ³ /h	16,5	215,00	70,00	96,00	Não pratica
Emissões de GEE (kg CO₂eq/ha)		56,20	18,30	25,09	-

(1) Dado baseado em Macedo *et al.* (2004)

Tabela 26: Emissões de GEE na aplicação de vinhaça com caminhões-tanque

Veículo	Consumo de diesel (L/km) ⁽¹⁾	Usina 10		Usina 11		Usina 12		Usina 13	
		Lâmina aplicada (m ³ /ha)	Distância percorrida (km)						
Caminhão- tanque 15m ³	2,2	215	16,5	Não aplica		Não aplica		Não aplica	
Emissões de GEE kg (CO₂eq/ha)		647,15		-		-		-	

(1) Dado baseado em Macedo *et al.* (2004)

Tendo em vista que nem todas as usinas praticam os três métodos de aplicação de vinhaça acima relacionados, para a estimativa das emissões de GEE na adubação em áreas de vinhaça foi calculada uma média ponderada das emissões decorrentes dos métodos de aplicação de vinhaça, em função da área de aplicação correspondente a cada método. Dessa forma, a média ponderada das emissões correspondentes aos métodos de aplicação de vinhaça é de 145 kg CO₂eq/ha.

Como explicado anteriormente, a aplicação de vinhaça implica na adição de N ao solo, o qual também resulta na emissão de N₂O. A quantidade de N₂O liberada à atmosfera depende do conteúdo de N na vinhaça. Nesse sentido, para o cálculo de emissões de GEE nesta categoria, o teor de N contido na vinhaça foi baseado em Almeida *et al.* (2007) e Macedo & Macedo *apud* Seabra (2008): 0,36 kg/m³. Levando em conta o teor de N na vinhaça e o fator de emissão de N₂O, a TAB. 27, a seguir, mostra as emissões de N₂O do solo (expressada em kg CO₂eq) resultantes da aplicação de vinhaça nas usinas pesquisadas.

Tabela 27: Emissões de N₂O na aplicação de vinhaça

Operação	Lâmina de vinhaça aplicada (m ³ /ha)			
	Usina 10	Usina 11	Usina 12	Usina 13
Aplicação de vinhaça	215	70	96	170
Emissões de GEE (kg CO₂eq/ha)	479,88	156,24	214,27	379,44

5.2.6.2 Adubação de cana de ano e meio em área sem vinhaça

Diferentemente da adubação de cana de ano e meio em área de vinhaça, a adubação em área sem vinhaça ocorre com aplicação de fertilizantes potássicos nas usinas pesquisadas. Como explicado anteriormente, a vinhaça é rica em K, elemento que não está presente em áreas sem

vinhaça, portanto é necessário a aplicação de fertilizantes sintéticos de potássio nessas áreas. Em algumas usinas (usinas 1 e 2) observa-se aumento da quantidade de fertilizante N em áreas sem vinhaça, em comparação com áreas de vinhaça. A TAB. 28, a seguir, mostra as quantidades de adubo aplicadas em áreas de cana de ano e meio sem vinhaça e as emissões de GEE resultantes.

Tabela 28: Emissões de GEE na adubação de cana de ano e meio em área sem vinhaça

Fertilizante	Quantidade de adubo utilizado (kg/ha)			
	Usina 10	Usina 11	Usina 12	Usina 13
N	40	80	70	25
P (P ₂ O ₅)	204,4	250	150	125
K (K ₂ O)	180	220	100	125
Carga total (kg/ha) ⁽¹⁾	424,4	550	320	275
Distância de transporte dos fertilizantes (km) ⁽²⁾	316,5	330	85	220
Emissões de GEE (kg CO₂eq/ha)⁽³⁾	1070,89	1604,77	1108,88	656,74

(1) Não inclui a fração inerte

(2) Inclui a distância entre o fornecedor e a área de estocagem da usina; e a distância entre a área de estocagem da usina e a área de aplicação na lavoura

(3) Inclui as emissões referentes à obtenção dos fertilizantes; emissões de transporte dos fertilizantes, incluindo a carga correspondente à fração inerte; e as emissões referentes à liberação de N₂O do solo devido à aplicação dos fertilizantes

5.2.6.3 Adubação de cana de ano em área de vinhaça

Nas usinas pesquisadas não foram observadas diferenças entre a adubação de cana de ano e a adubação de cana de ano e meio, ambas em áreas de vinhaça. Dessa forma, as emissões de GEE resultantes nesta categoria são as mesmas apresentadas na seção 5.2.6.1. No entanto, a adubação de cana de ano e meio e a adubação de cana de ano, seja em áreas de vinhaça ou não, afetará a estimativa das emissões de GEE na agricultura e industrialização da cana-de-açúcar, uma vez que, no presente estudo, tal estimativa depende do período de base (b_n), segundo a equação 4.5; tal período de base é diferente para cana de ano e meio e cana de ano. Por essa razão, as emissões correspondentes à adubação de cana de ano e meio e cana de ano, embora sejam iguais, foram tratadas de forma separada.

5.2.6.4 Adubação de cana de ano em área sem vinhaça

Nesta categoria, de todas as usinas estudadas na pesquisa de campo, somente a Usina 10 apresenta diferenças em comparação com a adubação de cana de ano e meio em área de vinhaça. No entanto, como explicado anteriormente, embora a maioria das usinas aplique as mesmas quantidades de adubo para cana de ano e meio e cana de ano, isso resultará em

estimativas diferentes de GEE devido a diferenças no período de base (b_n). A TAB. 29, a seguir, mostra as quantidades de adubo aplicadas nesta categoria, assim como as emissões de GEE correspondentes.

Tabela 29: Emissões de GEE na adubação de cana de ano em área sem vinhaça

Fertilizante	Quantidade de adubo utilizado (kg/ha)			
	Usina 10	Usina 11	Usina 12	Usina 13
N	84	80	70	25
P (P ₂ O ₅)	204,4	250	150	125
K (K ₂ O)	144	220	100	125
Carga total (kg/ha) ⁽¹⁾	432,4	550	320	275
Distância de transporte dos fertilizantes (km) ⁽²⁾	316,5	330	85	220
Emissões de GEE (kg CO₂eq/ha)⁽³⁾	1459,46	1604,77	1108,88	656,74

(1) Não inclui a fração inerte

(2) Inclui a distância entre o fornecedor e a área de estocagem da usina e a distância entre a área de estocagem da usina e a área de aplicação na lavoura

(3) Inclui as emissões referentes à obtenção dos fertilizantes; emissões de transporte dos fertilizantes, incluindo a carga correspondente à fração inerte; e as emissões referentes à liberação de N₂O do solo devido à aplicação dos fertilizantes.

5.2.6.5 Adubação com torta de filtro

Quase todas as usinas estudadas na estimativa inicial de GEE e na pesquisa de campo realizam adubação com torta de filtro durante o plantio. Segundo dados da estimativa inicial, a aplicação de torta de filtro é realizada normalmente logo após sua geração; caso não seja possível aplicá-la nesse momento, ela é armazenada em área aberta, porém protegida de águas pluviais e aplicada à brevidade possível, para manter sua umidade natural. Segundo esses dados, a torta de filtro possui umidade de 65% a 75% (média = 70%).

Segundo dados colhidos durante a pesquisa de campo, a adubação com torta de filtro substitui totalmente a adubação com fertilizantes sintéticos, ou seja, não são utilizados fertilizantes adicionais nessas áreas. Dessa forma, as emissões de GEE nesta categoria compreendem aquelas correspondentes ao transporte da torta de filtro e às emissões de N₂O do solo. Estas últimas dependem do teor de N presente na torta. Nesse sentido, a TAB. 30, mostra o conteúdo de N na torta de filtro, segundo diferentes autores.

Com base na TAB. 30, para o cálculo das emissões de N₂O, foi levado em conta o teor médio de 1.15% de N contido na torta de filtro em massa seca. Considerando esses dados, a distância de transporte e a quantidade de torta de filtro aplicada nas usinas pesquisadas, a TAB. 31 mostra as emissões de GEE resultantes.

Tabela 30: Conteúdo de N em torta de filtro

Autor	Teor de N
Ferreira <i>et al.</i> <i>Apud</i> Santos (1988)	1,1% a 1,4% (matéria seca) → Média = 1,25%
Koffler & Donzelli <i>apud</i> Nardin 2007	0,9 g/100g (Mínimo); 1,45 g/100g (Médio); 2,7 g/100g (Máximo). (massa seca)
Pereira <i>et al.</i> 2005	6,5 kg/t (massa seca)
Macedo & Macedo <i>apud</i> SEABRA (2008)	12,5 kg/t (massa seca)

Tabela 31: Emissões de GEE na aplicação de torta de filtro no plantio

Veículo / Distância de transporte	Consumo (km/L) ⁽¹⁾	Quantidade de torta de filtro aplicada (t/ha)			
		Usina 10	Usina 11	Usina 12	Usina 13
Caminhão basculante 8 t	2,5	30,00	10,00	16,00	Não
Distância média entre a usina e a lavoura (km)		16,5	30	25	prática
Emissões de GEE no transporte (kg CO₂eq/ha)		149,00	90,30	120,40	-
Emissões N₂O do solo (kg CO₂eq/ha)		641,7	213,9	342,24	-
Emissões totais de GEE (kg CO₂eq/ha)		790,70	304,20	462,64	-

(1) Consumo de diesel baseado em Macedo *et al.* (2004)

5.2.7 Adubação em soqueira

A adubação em soqueira varia principalmente em função do tratamento prévio dado à área em questão, isto é, em função de se a área foi submetida a queima prévia à colheita ou se a área foi submetida a aplicação de vinhaça. Cabe ressaltar que a adubação em soqueira é indistinta para cana de ano e meio e cana de ano. Assim mesmo, foi observada adubação com torta de filtro em soqueira em duas das usinas estudadas na pesquisa de campo. Dessa forma, as opções consideradas nesta categoria foram: adubação em área de vinhaça com cana queimada; adubação em área de vinhaça com cana crua; adubação em área sem vinhaça com cana queimada; adubação em área sem vinhaça com cana crua; e adubação com torta de filtro. Para a estimativa das emissões de GEE, foram considerados os mesmos fatores de emissão, as mesmas suposições e as mesmas fontes de emissão levadas em conta na estimativa realizada para a adubação no plantio (seção 5.2.6). Os resultados são mostrados a seguir.

5.2.7.1 Adubação em área de vinhaça com cana queimada

Da mesma forma que ocorre na adubação durante o plantio, a adubação de soqueira mediante aplicação de vinhaça dispensa a utilização de fertilizante de potássio, nutriente que é provido pela própria vinhaça. Por outro lado, nem todas as usinas possuem áreas de queima do canavial; é o caso da Usina 13 da pesquisa de campo, a qual efetua 100% de colheita mecânica, não realizando, portanto, queima do canavial. As emissões nesta categoria compreendem: aquelas referentes à obtenção e transporte de fertilizantes, o qual depende da quantidade de adubo aplicada e a distância de transporte dos fertilizantes, respectivamente; as emissões devido ao uso de veículos e equipamentos para aplicação de vinhaça; e as emissões de N₂O devido ao conteúdo de N nos fertilizantes e na vinhaça aplicados, conforme a TAB. 32, a seguir.

Tabela 32: Emissões de GEE na adubação de soqueira em área de vinhaça com cana queimada

Emissões de GEE na obtenção, transporte e aplicação de fertilizantes				
Fertilizante/Distância de transporte	Quantidade de adubo utilizada (kg/ha)			
	Usina 10	Usina 11	Usina 12	Usina 13
N	99	100	100	Não Prática
P (P ₂ O ₅)	0	0	25	
K (K ₂ O)	0	0	0	
Carga Total (kg/ha) ⁽¹⁾	99	100	125	-
Distância de transporte dos fertilizantes (km) ⁽²⁾	316,5	330	85	-
Emissões de GEE na obtenção, transporte e aplicação de fertilizantes (kg CO₂eq/ha)⁽³⁾	930,88	941,07	994,39	
Emissões de GEE nas operações de aplicação de vinhaça (kg CO₂eq/ha)⁽⁴⁾	140,95	140,95	140,95	-
Emissões de N ₂ O do solo devido à aplicação de vinhaça (kg CO ₂ eq/ha)				
Teor de N da vinhaça (kg/m ³)	Quantidade de vinhaça aplicada (m ³ /ha)			
0,36	215,00	70,00	96,00	-
Emissões de N₂O do solo (kg CO₂eq/ha)	479,88	156,24	214,27	-
Emissões totais de GEE (kg CO₂eq/ha)	1551,71	1238,26	1349,61	-

(1) Não inclui a fração inerte

(2) Inclui a distância entre o fornecedor e a área de estocagem da usina e a distância entre a área de estocagem da usina e a área de aplicação na lavoura

(3) Inclui as emissões referentes à obtenção dos fertilizantes; emissões de transporte dos fertilizantes, incluindo a carga correspondente à fração inerte; e as emissões referentes à liberação de N₂O do solo devido à aplicação do fertilizante de N.

(4) Média ponderada das emissões correspondentes aos métodos de aplicação de vinhaça, conforme dados da seção 5.2.6.1.

5.2.7.2 Adubação em área de vinhaça com cana crua

Em comparação à adubação realizada em áreas de vinhaça com cana queimada, observa-se certo aumento na dosagem de N e P, aplicado por meio de fertilizantes, em áreas de vinhaça com cana crua. A estimativa das emissões de GEE neste caso leva em conta as mesmas considerações da seção anterior, segundo a TAB. 33, a seguir.

Tabela 33: Emissões de GEE na adubação de soqueira em área de vinhaça com cana crua
Emissões de GEE na obtenção, transporte e aplicação de fertilizantes

Fertilizante/Distância de transporte	Quantidade de adubo utilizada (kg/ha)			
	Usina 10	Usina 11	Usina 12	Usina 13
N	121,5	130	100	100
P (P ₂ O ₅)	0	0	125	30
K (K ₂ O)	0	0	0	0
Carga Total (kg/ha) ⁽¹⁾	99	100	125	130
Distância de transporte dos fertilizantes (km) ⁽²⁾	316,5	330	85	220
Emissões de GEE na obtenção, transporte e aplicação de fertilizantes (kg CO₂eq/ha)⁽³⁾	1142,45	1223,39	1265,10	1017,65
Emissões de GEE nas operações de aplicação de vinhaça (kg CO₂eq/ha)⁽⁴⁾	140,95	140,95	140,95	140,95
Emissões de N₂O do solo devido à aplicação de vinhaça (kg CO₂eq/ha)				
Teor de N da vinhaça (kg/m³)	Quantidade de vinhaça aplicada (m³/ha)			
0,36	215,00	70,00	96,00	170
Emissões de N₂O do solo (kg CO₂eq/ha)	479,88	156,24	214,27	379,44
Emissões totais de GEE (kg CO₂eq/ha)	1763,28	1520,58	1620,32	1538,04

(1) Não inclui a fração inerte

(2) Inclui a distância entre o fornecedor e a área de estocagem da usina e a distância entre a área de estocagem da usina e a área de aplicação na lavoura

(3) Inclui as emissões referentes à obtenção dos fertilizantes; emissões de transporte dos fertilizantes, incluindo a carga correspondente à fração inerte; e as emissões referentes à liberação de N₂O do solo devido à aplicação do fertilizante de N.

(4) Média ponderada das emissões correspondentes aos métodos de aplicação de vinhaça, conforme dados da seção 5.2.6.1.

5.2.7.3 Adubação em área sem vinhaça com cana queimada

Como visto anteriormente, em áreas onde a vinhaça não é aplicada há aumento na quantidade de fertilizante de potássio utilizado na adubação. Isto não é diferente em áreas de soqueira com cana queimada nas usinas pesquisadas. Uma vez que não há aplicação de vinhaça nessas áreas, as emissões de GEE ocorrem em função da obtenção e transporte dos fertilizantes, assim como das emissões de N₂O do solo devido à aplicação de fertilizantes de N. A TAB. 34, a seguir, mostra esses dados e as emissões de GEE resultantes.

Tabela 34: Emissões de GEE na adubação em área sem vinhaça com cana queimada

Fertilizante	Quantidade de fertilizante utilizada (kg/ha)			
	Usina 10	Usina 11	Usina 12	Usina 13
N	100	100	100	
P (P ₂ O ₅)	0	20	25	
K (K ₂ O)	130	150	100	Não prática
Carga total (kg/ha) ⁽¹⁾	230	270	225	
Distância de transporte dos fertilizantes (km) ⁽²⁾	316,5	330	85	
Emissões de GEE (kg CO₂eq/ha)⁽³⁾	1028,65	1101,08	1050,10	

(1) Não inclui a fração inerte

(2) Inclui a distância entre o fornecedor e a área de estocagem da usina e a distância entre a área de estocagem da usina e a área de aplicação na lavoura

(3) Inclui as emissões referentes à obtenção dos fertilizantes; emissões de transporte dos fertilizantes, incluindo a carga correspondente à fração inerte; e as emissões referentes à liberação de N₂O do solo devido à aplicação do fertilizante de N.

5.2.7.4 Adubação em área sem vinhaça com cana crua

Em comparação à adubação em área de vinhaça com cana queimada, a adubação na mesma área com cana crua apresenta leve aumento no uso de fertilizantes nitrogenados e diminuição no uso de fertilizantes de potássio. As emissões de GEE são também resultantes da obtenção e transporte dos fertilizantes, além das emissões de N₂O do solo devido ao uso de fertilizantes nitrogenados, como mostra a TAB 35, a seguir.

Tabela 35: Emissões de GEE na adubação em área sem vinhaça com cana crua

Fertilizante	Quantidade de fertilizante utilizada (kg/ha)			
	Usina 10	Usina 11	Usina 12	Usina 13
N	120	130	100	100
P (P ₂ O ₅)	0	20	25	30
K (K ₂ O)	120	100	100	100
Carga total (kg/ha) ⁽¹⁾	240	250	225	230
Distância de transporte dos fertilizantes (km) ⁽²⁾	316,5	330	85	220
Emissões de GEE (kg CO₂eq/ha)⁽³⁾	1209,70	1348,53	1050,10	1080,85

(1) Não inclui a fração inerte

(2) Inclui a distância entre o fornecedor e a área de estocagem da usina e a distância entre a área de estocagem da usina e a área de aplicação na lavoura

(3) Inclui as emissões referentes à obtenção dos fertilizantes; emissões de transporte dos fertilizantes, incluindo a carga correspondente à fração inerte; e as emissões referentes à liberação de N₂O do solo devido à aplicação do fertilizante de N.

5.2.7.5 Adubação com torta de filtro

Da mesma forma que a adubação com torta de filtro no plantio, as usinas pesquisadas não utilizam fertilizantes sintéticos na adubação com torta de filtro em área de soqueira. Somente duas das usinas estudadas na pesquisa de campo realizam esse tipo de adubação. Para a estimativa das emissões de GEE nesta categoria, foram feitas as mesmas considerações

levadas em conta na seção 5.2.6.5, de modo que as emissões resultantes compreendem basicamente o transporte da torta de filtro desde a usina até a área de aplicação e as emissões de N₂O provenientes do N contido da torta de filtro, segundo a TAB. 36, a seguir.

Tabela 36: Emissões de GEE na adubação com torta de filtro em soqueira

Veículo / Distância de transporte	Consumo (km/L) ⁽¹⁾	Quantidade de torta de filtro aplicada (t/ha)			
		Usina 10	Usina 11	Usina 12	Usina 13
Caminhão basculante 8 t	2,5	Não	10	Não	20
Distância média entre a usina e a lavoura (km)		prática	30	prática	10
Emissões de GEE no transporte (kg CO₂eq/ha)		-	90,30	-	60,20
Emissões N₂O do solo (kg CO₂eq/ha)		-	213,9	-	427,80
Emissões totais de GEE (kg CO₂eq/ha)		-	304,20	-	488,00

(1) Dado baseado em Macedo *et al.* (2004)

5.2.8 Consumo de defensivos agrícolas

Para o cálculo das emissões GEE nesta categoria foram levadas em conta as mesmas considerações da seção 5.1.3. Uma vez que tais emissões representam uma pequena parte das emissões totais, como pode ser observado na TAB. 11, a pesquisa de campo não incluiu o levantamento de dados no consumo de defensivos agrícolas. No entanto, foi realizado um maior detalhamento dos dados colhidos na estimativa inicial de GEE, levando em consideração o consumo específico de defensivos em cada usina pesquisada durante a estimativa inicial³³. Assim mesmo, alguns fatores de emissão dos defensivos agrícolas foram atualizados. A TAB. 37 mostra os resultados na estimativa de GEE para esta categoria.

5.2.9 Queima do canavial

Quase todas as usinas estudadas na pesquisa de campo realizam queima do canavial antes da colheita manual. Somente uma usina (Usina 13) não realiza tal prática, devido a que toda a colheita é realizada mecanicamente, com cana crua. Como visto na seção de estimativa inicial das emissões de GEE, uma tonelada de cana contém 140 kg (massa seca) de ponteiros e folhas secas (SEABRA, 2008), os quais são queimados para colheita manual, ficando depois o palhiço. Dessa forma, a quantidade de palhiço submetida a queima depende da produtividade

³³ Na fase de estimativa inicial de GEE, somente foi possível coletar dados de consumo de defensivos agrícolas de duas (Usina 4 e Usina 6) das nove usinas pesquisadas.

Tabela 37: Emissões de GEE no uso de defensivos agrícolas

Defensivo	Fator de emissão (kg CO ₂ eq/kg) ⁽¹⁾	Consumo (kg/ha)	
		Usina 4	Usina 6
Ametrina	7,81	0,91	0,28
Diuron	6,94	0,46	0,25
Tebuthiuron	9,11	0,46	0,1
Glifosato	15,77	0,15	0,39
Diuron+Hexazinona	8,46	1,22	0,71
Etilenoxi	3,86	0	0,02
2,4-D amina	3,2	0	0,29
2,4-D+Picloran	3,2	0	0,04
MSMA	4,12	0	0,42
Imazapic	7,08	0	0,04
Isoxazole	7,08	0	0,01
Fipronil	7,08	0	0,05
Metribuzin	7,81	0	0,02
Clomaxone+Ametrina	7,81	0	0,14
Aldicarb	6,91	0	1,7
Emissões de GEE (kg CO₂eq/ha)		27,18	33,56

(1) *Ecoinvent* (IFU/IFEU, 2006)

(toneladas de cana/ha) de cada usina. Nesse sentido, a produtividade na área agrícola pode variar em áreas irrigadas e não irrigadas. Por esse motivo, para o cálculo das emissões de GEE, foi considerada uma média ponderada da produtividade em tais áreas. Somente as Usinas 12 e 13 forneceram dados da produtividade em áreas irrigadas, motivo pelo qual a média ponderada foi levada em conta somente nessas usinas. Por outro lado, de acordo com os dados coletados na pesquisa de campo, cada usina apresenta diferentes graus de eficiência na queima do canavial, de modo que a quantidade de palha submetida a queima é ainda menor. Também foi levado em conta que a palha não queimada retorna e permanece no solo, já que esta não é aleirada (segundo dados da pesquisa de campo), contribuindo assim para a adição de N e a consequente emissão de N₂O. O teor de N da palha não queimada foi baseado em Linero & Lamônica (2005), segundo os quais existe 0,5% de N na palha remanescente. Levando em conta essas considerações, as tabelas 38 e 39, a seguir, mostram os dados e estimativas de GEE referentes à queima do canavial e emissões devido à adição de N no solo por causa da palha remanescente, respectivamente.

Tabela 38: Emissões de GEE devido à queima do canavial antes da colheita

Quantidade de palha (kg/t de cana) ⁽¹⁾	Fator de emissão (g CO ₂ eq/kg de palha) ⁽²⁾	Usina 10		Usina 11		Usina 12		Usina 13
		Produtividade (t cana/ha) ⁽³⁾	Eficiência na queima (%)	Produtividade (t cana/ha) ⁽³⁾	Eficiência na queima (%)	Produtividade (t cana/ha) ⁽³⁾	Eficiência na queima (%)	Não pratica
140	82,82	75	90	90	85	100 ⁽⁴⁾	90	-
Emissões de GEE (kg CO₂eq/ha)		910,06		1031,40		1213,41		-

(1) SEABRA (2008)

(2) IPCC (2006)

(3) Não inclui o peso de ponteiros e folhas secas

(4) Média ponderada em áreas irrigadas e não irrigadas

Tabela 39: Emissões de GEE devido à palha remanescente após queima do canavial

Teor de N na palha (%) ⁽¹⁾	Quantidade de palha (kg/t de cana) ⁽²⁾	Usina 10		Usina 11		Usina 12		Usina 13
		Produtividade (t cana/ha) ⁽³⁾	Palha remanescente (%)	Produtividade (t cana/ha) ⁽³⁾	Palha remanescente (%)	Produtividade (t cana/ha) ⁽³⁾	Palha remanescente (%)	Não pratica
0,5	140	75	10	90	15	100 ⁽³⁾	10	-
Emissões de GEE (kg CO₂eq/ha)		37,85		68,13		50,47		-

(1) LINERO & LAMÔNICA (2005)

(2) SEABRA (2008)

(3) Não inclui o peso de ponteiros e folhas secas

(4) Média ponderada em áreas irrigadas e não irrigadas

**Figura 26:** Cana queimada aguardando carregamento e palha remanescente

Fonte: Pesquisa de campo

5.2.9.1 Áreas sem queima do canavial

Todas as usinas pesquisadas possuem áreas onde a queima do canavial antes da colheita não é realizada. Essas áreas são normalmente destinadas à colheita mecânica. Nessas áreas existe uma maior quantidade de palha remanescente que fica no solo após a colheita (FIG. 27), uma vez que não houve queima do canavial. Nesse sentido, para o cálculo das emissões de GEE foram considerados 140 kg de palha remanescente por cada tonelada de cana (SEABRA, 2008). As emissões de GEE neste caso correspondem somente ao aumento do N no solo, por meio da palha remanescente, resultando na emissão de N₂O. Levando em conta essas considerações, a TAB. 40, a seguir, mostra as emissões resultantes para áreas sem queima do canavial.

Tabela 40: Emissões de GEE devido à palha remanescente em áreas sem queima do canavial

		Usina 10	Usina 11	Usina 12	Usina 13
Teor de N na palha (%) ⁽¹⁾	Quantidade de palha (kg/t de cana) ⁽²⁾	Produtividade (t cana/ha) ⁽³⁾			
0,5	140	75	90	100 ⁽⁴⁾	94 ⁽⁴⁾
Emissões de GEE (kg CO₂eq/ha)		378,49	454,19	504,65	474,37

(1) LINERO & LAMÓNICA (2005)

(2) SEABRA (2008)

(3) Não inclui o peso de ponteiros e folhas secas

(4) Média ponderada em áreas irrigadas e não irrigadas



Figura 27: Área sem queima do canavial e palha remanescente após colheita mecânica
Fonte: Pesquisa de campo

5.2.10 Colheita

Quase todas as usinas estudadas durante a pesquisa de campo realizam colheita manual e mecânica. Nesse caso, a área correspondente à colheita manual é maior em comparação à área de colheita mecânica. Normalmente a colheita manual é realizada com queima prévia do canavial. Já a colheita mecânica é normalmente realizada com cana crua. Somente uma das usinas estudadas na pesquisa de campo (Usina 13) realiza colheita 100% mecânica. A seguir são apresentados dados da pesquisa de campo para ambos os tipos de colheita.

5.2.10.1 Colheita manual

Como visto no levantamento inicial das emissões de GEE, depois de realizada a queima do canavial a cana é carregada mecanicamente por meio de carregadeiras. Para isso, os cortadores de cana, depois de realizar o corte, deixam a cana amontoada no solo, pronta para ser carregada. As carregadeiras mecânicas (FIG. 28) normalmente colocam a cana diretamente no meio de transporte a ser utilizado para levar a cana até a usina. Depois de realizado o carregamento da cana, a palha remanescente (palhiço) fica no solo, a qual permanece na área de cultivo. Para a estimativa da emissões de GEE nesta categoria (TAB. 41), foi considerada a produtividade das usinas estudadas durante a pesquisa de campo, uma vez que tais emissões variam em função do consumo de combustível nas carregadeiras, o qual depende da quantidade de cana carregada por hectare. As emissões de GEE devido à palha remanescente já foram consideradas na seção 5.2.9 e as emissões correspondentes ao transporte da cana até a usina serão consideradas mais adiante.

Tabela 41: Emissões de GEE no carregamento de cana

Veículo	Capacidade (t cana/h) ⁽¹⁾	Consumo (L diesel/h) ⁽¹⁾	Produtividade média (t cana/ha)			
			Usina 10	Usina 11	Usina 12	Usina 13
Carregadeira de cana	46,00	7,10	75	90	100 ⁽²⁾	Não pratica
Emissões de GEE (kg CO₂eq/ha)			34,84	41,81	46,46	-

(1) MACEDO *et al.* (2004)

(2) Média ponderada em áreas irrigadas e não irrigadas



Figura 28: Carregadeira utilizada no carregamento de cana-de-açúcar

Fonte: Pesquisa de campo

5.2.10.2 Colheita mecânica

Todas as usinas estudadas durante a pesquisa de campo realizam colheita mecânica como parte das práticas de agricultura da cana-de-açúcar. As Usinas 10, 11 e 12 realizam esse tipo de colheita somente em parte da área de corte da cana. Já a Usina 13 realiza colheita mecânica em 100% da área de corte. Foi observado que a colheita mecânica consiste basicamente na operação de corte da cana por meio das colheitadeiras, as quais depositam a cana cortada diretamente no caminhão de transbordo. Posteriormente, quando os caminhões de transbordo ficam cheios, a cana colhida é transportada até os caminhões que realizam o transporte até a usina (FIG. 29). Dessa forma, as emissões de GEE nas operações de colheita mecânica ocorrem em função do consumo de combustível nas colheitadeiras e nos caminhões de transporte (TAB. 42) (as emissões correspondentes ao transporte de cana até a usina serão tratadas em outra categoria).

Tabela 42: Emissões de GEE na colheita mecânica

Operação/veículo	Capacidade (t cana/h) ⁽¹⁾	Consumo (L diesel/h) ⁽²⁾	Produtividade média (t cana/ha)			
			Usina 10	Usina 11	Usina 12	Usina 13
a) Colheita						
Colhedora de cana	45,00	40,40	75	90	100 ⁽²⁾	94 ⁽²⁾
Emissões de GEE (kg CO₂eq/ha)			202,67	243,21	270,23	254,02
b) Transbordo						
Caminhão de transbordo	35,00	9,00	75	90	100 ⁽²⁾	94 ⁽²⁾
Emissões de GEE (kg CO₂eq/ha)			58,05	69,66	77,40	72,76

(1) MACEDO et al. (2004)

(2) Média ponderada em áreas irrigadas e não irrigadas



Figura 29: a) Colheita mecânica de cana-de-açúcar; b) Operação de transbordo da cana colhida

5.2.11 Transporte de cana

Durante a pesquisa de campo foi observado o uso de três tipos de veículos para o transporte da cana colhida até a usina: caminhões de 27 t (“Romeu e Julieta”); caminhões de 45 t (“treminhão”); e caminhões de 58 t (“treminhão”). O tipo de transporte mais utilizado é o caminhão de 58 t, (57,25% dos casos), seguido pelo caminhão de 28 t (24,75% dos casos) e o caminhão de 45 t (18% dos casos). As emissões de GEE dependem do consumo de diesel por parte dos caminhões, a distância percorrida e a carga transportada por hectare de cana colhida. Esta última variável depende da produtividade (t cana/ha) de cada usina. A TAB. 43 mostra essas variáveis e as emissões de GE resultantes.

Tabela 43: Emissões de GEE no transporte de cana

Veículo	Consumo de diesel (km/L) ⁽¹⁾	Usina 10		Usina 11		Usina 12		Usina 13	
		Distância de transporte (km)	Produtividade (t/ha)						
Caminhão 28t	1,6	16,5	75	20	90	25	100 ⁽²⁾	Não pratica	
Emissões de GEE (kg CO₂eq/ha)		166,29		241,88		335,94		-	
Caminhão 45t	1,2	16,5	75	Não aplica		25	100 ⁽²⁾	Não pratica	
Emissões de GEE (kg CO₂eq/ha)		137,96		-		278,70		-	
Caminhão 58t	1,1	Não pratica		40	90	25	100 ⁽²⁾	15	94 ⁽³⁾
Emissões de GEE kg (CO₂eq/ha)		-		328,36		228,03		128,61	

(1) Macedo *et al.* (2004)

(2) Média ponderada em áreas irrigadas e não irrigadas

Tendo em vista que nem todas as usinas pesquisadas praticam todas as formas de transporte acima citadas, para facilitar a estimativa das emissões de GEE foi calculada uma média ponderada das emissões de transporte de cana: 229,61 kg CO₂eq/ha.



Figura 30: Veículos utilizados no transporte de cana-de-açúcar

Fonte: Pesquisa de campo

5.2.12 Industrialização

Como pode ser observado na FIG. 23, na seção 5.1.7, as emissões de GEE provenientes da industrialização da cana-de-açúcar representam uma pequena parte das emissões totais (2,48%). Por esse motivo, a pesquisa de campo não incluiu um maior detalhamento das fontes de emissão correspondentes a esta categoria. As informações obtidas durante a estimativa inicial de GEE foram confirmadas durante a pesquisa de campo, de modo que todas as usinas estudadas utilizam energia autogerada a partir do bagaço de cana. Além disso, todas as usinas estudadas na pesquisa de campo armazenam o bagaço excedente para posterior utilização na geração de energia própria (FIG. 31).

Não foram observadas fontes significativas de emissão de GEE na etapa de industrialização além da obtenção de produtos químicos para a produção de açúcar e etanol. Os dados de utilização de produtos químicos obtidos durante a estimativa inicial de GEE apresentam um maior detalhamento em comparação àqueles obtidos durante a pesquisa de campo. Por esse motivo, tais dados foram mantidos (Usinas 1 a 9) para a estimativa da emissão de GEE nesta

categoria. Dessa forma, as emissões correspondentes à industrialização de cana-de-açúcar são de 50,78 kg CO₂eq/ha³⁴.



Figura 31: Bagaço de cana-de-açúcar utilizada para autogeração de energia na produção de etanol

Fonte: Pesquisa de campo

Nesta categoria, também foram calculadas as emissões de GEE correspondentes ao transporte de produtos químicos desde os fornecedores até a usina. Uma vez que as usinas pesquisadas durante a estimativa inicial das emissões de GEE não forneceram dados de transporte desses insumos, foram utilizados dados da pesquisa de campo (TAB. 44).

Tabela 44: Emissões de GEE no transporte de produtos químicos para produção de etanol

Veículo	Carga média (kg/ha) ⁽¹⁾	Fator de emissão (CO ₂ eq/tkm) ⁽²⁾	Distância de transporte entre o fornecedor e a usina (km)			
			Usina 10	Usina 11	Usina 12	Usina 13
Caminhão 15 t	108,77	0,12	600	200	240	290
Emissões de GEE (kg CO₂eq/ha)			15,66	5,22	6,27	7,57

(1) Carga média dos produtos químicos em usinas autônomas e anexas

(2) *Ecoinvent* (IFU/IFEU, 2006)

Com base na estimativa de emissões de GEE na industrialização de cana-de-açúcar (50,78 kg CO₂eq/ha) e na TAB. 44, a média dessas emissões, incluindo o transporte de produtos químicos para produção de etanol, foi determinada em 59,46 kg CO₂eq/ha.

³⁴ Na estimativa inicial de GEE, as emissões correspondentes à industrialização de cana-de-açúcar foram de 42,32 kg CO₂eq/ha·ano, este valor corresponde a 50,78 kg CO₂eq/ha.

A TAB. 45 mostra o resumo de resultados das emissões de GEE das etapas produtivas identificadas durante a pesquisa de campo. A tabela mostra a média (entre parênteses) das emissões correspondentes a cada atividade agrícola e industrial e a ocorrência (%) de cada uma delas (entre colchetes) observada entre as usinas estudadas durante a pesquisa de campo.

Tabela 45: Emissões de GEE (kg CO₂eq/ha) nas etapas produtivas e atividades agrícolas e industriais para produção de etanol

Manutenção da área de cultivo	Produção de mudas	Aplicação de corretivos	Preparo do solo e plantio	
<ul style="list-style-type: none"> • Operações de manutenção na área de cultivo (66,86) [100%] 	<ul style="list-style-type: none"> • Produção de mudas (283,62) [100%] 	<ul style="list-style-type: none"> • Aplicação de calcário e gesso (1833,41) [100] 	<ul style="list-style-type: none"> • Cultivo convencional (276,02) [51,56%] • Cultivo mecanizado (300,40) [26,85%] • Cultivo mínimo (203,42) [24,71%] 	
Tratos culturais em soqueira	Adubação no plantio	Adubação em soqueira	Aplicação de defensivos agrícolas	
<ul style="list-style-type: none"> • Operações em soqueira (25,85) [100%] 	<ul style="list-style-type: none"> • Cana de ano e meio em área de vinhaça (1232,73) [14,96%] • Cana de ano em área de vinhaça (1232,73) [8,61%] • Cana de ano e meio em área sem vinhaça (1110,32) [34,32%] • Cana de ano em área sem vinhaça (1207,46) [19,73] • Adubação com torta de filtro (519,18) [22,38] 	<ul style="list-style-type: none"> • Área de vinhaça com cana queimada (1379,86) [12,55%] • Área de vinhaça com cana crua (1610,55) [5,80%] • Área sem vinhaça com cana queimada (1059,94) [51,81%] • Área sem vinhaça com cana crua (1172,29) [23,84%] • Adubação com torta de filtro (396,10) [5,90%] 	<ul style="list-style-type: none"> • Aplicação de defensivos agrícolas (30,37) [100%] 	
Queima do canavial	Colheita	Transporte de cana	Produção de álcool	Período de base
<ul style="list-style-type: none"> • Queima do canavial para colheita manual (1103,77) [45,50%]⁽¹⁾ • Sem queima do canavial para colheita mecânica (452,93) [54,50%]⁽¹⁾ 	<ul style="list-style-type: none"> • Colheita manual (41,04) [71,20%]⁽¹⁾ • Colheita mecânica (312,00) [29,80]⁽¹⁾ 	<ul style="list-style-type: none"> • Transporte de cana (229,61) [100%] 	<ul style="list-style-type: none"> • Industrialização de cana-de-açúcar (59,46) [100%] 	<ul style="list-style-type: none"> • b1 = 6,13 anos [49,34%] • b2 = 7,5 anos [11,85%] • b3 = 5,63 anos [28,37%] • b4 = 7 anos [6,81%] • b5 = 6,52 anos [1,86%] • b6 = 7,89 anos [0,45%] • b7 = 6,02 anos [1,07%] • b8 = 7,39 anos [0,25%]

(1) Dados baseados em CTC (2011)

De forma a obter maior representatividade, a proporção de área submetida a queima antes da colheita, assim como a proporção de colheita manual e colheita mecânica, foram baseadas em

dados do CTC (2011). No ANEXO F são mostrados esses resultados para cada usina estudada durante a pesquisa de campo.

As emissões apresentadas na tabela acima, foram obtidas com a Equação 4.4, e correspondem a cada atividade agrícola/industrial presente nas etapas produtivas que compõem o processo de produção de etanol. Cada atividade agrícola/industrial é realizada certo número de ciclos (*nc*), dependendo do cenário tecnológico em questão. As emissões totais de GEE para cada cenário tecnológico serão calculadas usando a Equação 4.5.



Figura 32: Instalações de uma usina produtora de etanol

Fonte: Pesquisa de campo

Na TAB. 45, o período de base corresponde ao tempo de duração do ciclo do canavial, ou seja, o tempo transcorrido desde o pousio até a última colheita. Como explicado anteriormente, segundo dados da pesquisa de campo (TAB. 12), o tempo médio de pousio foi determinado em 4,67 meses (0,39 anos). Cabe ressaltar que nem todas as usinas realizam a prática de pousio. Transcorrido o tempo de pousio, o ciclo da cana plantada pode ser de 1,5 anos (cana de ano e meio) ou de um ano (cana de ano) até a primeira colheita. Depois da

primeira colheita ocorrem os ciclos da cana-soca, os quais têm tempo de duração de um ano, tanto para cana de ano e meio quanto para cana de ano. O número de ciclos da cana-soca pode variar em função de áreas irrigadas ou não irrigadas. Nesse sentido, quando a cana é irrigada o número de cortes, incluindo o primeiro corte e os cortes subsequentes da cana-soca, é maior em comparação a áreas não irrigadas. Na pesquisa de campo o número de cortes em áreas não irrigadas foi determinado em 5,63 anos (TAB. 12), já o número de cortes em áreas irrigadas foi determinado em sete anos.

Levando em conta essas considerações, na TAB. 45 o período de base corresponde às seguintes situações observadas durante a pesquisa de campo:

- Área sem pousio; com cana de ano e meio; sem irrigação; 5,63 cortes; $b_1 = 6,13$ anos;
- Área sem pousio; com cana de ano e meio; com irrigação; 7 cortes; $b_2 = 7,5$ anos;
- Área sem pousio; com cana de ano; sem irrigação; 5,63 cortes; $b_3 = 5,63$ anos;
- Área sem pousio; com cana de ano; com irrigação; 7 cortes; $b_4 = 7$ anos;
- Área com pousio; com cana de ano e meio; sem irrigação; 5,63 cortes; $b_5 = 6,52$ anos;
- Área com pousio; com cana de ano e meio; com irrigação; 7 cortes; $b_6 = 7,89$ anos;
- Área com pousio; com cana de ano; sem irrigação; 5,63 cortes; $b_7 = 6,02$ anos;
- Área com pousio; com cana de ano; com irrigação; 7 cortes; $b_8 = 7,39$ anos.

Pode-se observar na TAB. 45 que a atividade que mais gera emissões de GEE é a aplicação de calcário e gesso. A aplicação desses corretivos ocorre durante a reforma do canavial e depois do segundo corte da cana-soca. Observa-se que o elevado volume de emissões neste caso ocorre principalmente devido à grande quantidade de calcário utilizado nas usinas (3210 kg/ha, em média), o qual contribui para as emissões de CO₂ no solo. Como explicado anteriormente, os carbonatos contidos no calcário se dissolvem e liberam bicarbonatos, os quais evoluem em CO₂ e H₂O, de modo que, por cada kg de calcário aplicado no solo são emitidos 0,48 kg CO₂eq (IPCC, 2006). Esses resultados contrastam com os resultados da estimativa inicial de GEE, nos quais, segundo dados das usinas pesquisadas nessa fase, a quantidade de calcário utilizada é aproximadamente 50% menor, além de que tais usinas somente forneceram dados de utilização de calcário durante a reforma do canavial. A pesquisa de campo mostra que a quantidade de calcário utilizada é maior, incluindo o uso desse

corretivo em soqueira. A pesquisa de campo também mostra que a quantidade de calcário utilizada é maior em comparação a outros estudos similares (MACEDO *et al.*, 2004; SOARES *et al.* 2009; SEABRA, 2008). Cabe ressaltar que, uma vez que a aplicação de corretivos é realizada somente duas vezes no ciclo produtivo do canavial, as emissões decorrentes dessa atividade são menores em comparação a outras atividades quando se considera o total de emissões no ciclo produtivo do canavial.

A segunda fonte de emissão mais importante é a aplicação de fertilizantes, tanto no plantio quanto em soqueira. As emissões de GEE resultantes nesta categoria, com base em dados da pesquisa de campo, são muito maiores em comparação aos resultados obtidos na estimativa inicial de GEE. Observa-se que tal diferença ocorre principalmente devido à aplicação de fertilizantes nitrogenados durante o plantio. Esses fertilizantes, além de possuir fator de emissão alto (3,03 kg CO₂eq/kg – *Ecoinvent*, IFU/IFEU, 2006), contribuem para as emissões de N₂O do solo. No caso da estimativa inicial de GEE, não foi observada aplicação desse fertilizante em áreas de plantio. Já a pesquisa de campo mostra que a quantidade de fertilizantes nitrogenados varia dependendo do tipo de cana. Outro fator que aumenta as emissões de GEE durante o uso de fertilizantes é a aplicação de vinhaça, já que o nitrogênio presente nesse fertilizante contribui para as emissões de N₂O do solo. Na pesquisa de campo foi observado que a maioria das usinas aplicam vinhaça tanto no plantio quanto em soqueira.

A terceira fonte de emissão de GEE mais importante observada na TAB. 45 é a queima do canavial antes da colheita manual. Aqui não foram observadas diferenças significantes em comparação com a estimativa inicial de GEE, a não ser um leve aumento das emissões devido à liberação de N₂O do solo por causa da adição de N por meio da palha remanescente após a colheita manual. Nesse sentido, durante a pesquisa de campo foi observado que todas as usinas estudadas deixam a palha remanescente no solo, de modo que esta não é aleirada nem queimada, senão que fica na área de colheita.

A partir dos dados da TAB. 45, especificamente os dados do ANEXO F, podem ser determinados cenários tecnológicos diferentes pra a produção de etanol. Cada cenário tecnológico está composto por distintas atividades agrícolas e industriais (TAB. 45), resultando em diferentes níveis de emissões de GEE. Cabe ressaltar que esses cenários representam práticas atuais de agricultura e industrialização, segundo dados das usinas

estudadas durante a pesquisa de campo. As emissões de GEE resultantes dos diversos cenários tecnológicos serão discutidas na seção 5.3.

5.3 Identificação de cenários tecnológicos para produção de etanol e estimativa das emissões em tais cenários

A produção de etanol, por meio dos processos de agricultura e industrialização, pode ser realizada de maneiras diferentes, dependendo da escolha de atividades agrícolas/industriais que fazem parte desses processos. Assim, a produção de etanol ocorrerá em determinado cenário tecnológico que possui características próprias. Por sua vez, o volume de emissões de GEE na produção de etanol dependerá do cenário tecnológico no qual o etanol foi produzido.

Tomando como base os dados da pesquisa de campo, os cenários tecnológicos para produção de etanol foram determinados a partir das atividades agrícolas e industriais mostradas na TAB. 45. Foram realizadas combinações compatíveis entre as diferentes atividades agrícolas e industriais, de modo que cada combinação resultasse em um processo possível de produção de etanol. Por exemplo, as operações de manutenção da área agrícola são compatíveis com todas as atividades agrícolas e industriais, uma vez que todo processo de agricultura da cana, segundo dados da pesquisa de campo, deve incluir tais operações de manutenção. Por outro lado, a agricultura com irrigação (área de vinhaça) em áreas de cana crua é incompatível com a opção de queima do canavial, já que as áreas de cana crua estão formadas por cana que não foi submetida à queima. Assim mesmo, os períodos de base considerados são compatíveis somente com determinadas atividades agrícolas e industriais. Por exemplo, o período de base b_1 (6,13 anos) não pode ser considerado para áreas com irrigação, uma vez que tais áreas são submetidas, em média, a sete cortes (segundo dados da pesquisa de campo), sendo que cada corte é realizado minimamente após um ano de tratamentos culturais da cana-de-açúcar, por tanto, nesse caso, o período de base a ser considerado deve ser igual ou maior a sete anos.

Levando em conta a compatibilidade das atividades agrícolas e industriais e os períodos de base considerados, foram identificados um total de 180 cenários tecnológicos possíveis a partir dos dados da pesquisa de campo. Todos esses cenários representam diferentes rotas tecnológicas pelas quais o etanol pode ser produzido.

Uma vez identificados os cenários tecnológicos para produção de etanol, foram realizadas estimativas das emissões de GEE correspondentes a cada cenário, levando em conta os dados

das usinas estudadas na pesquisa de campo. Para realizar tais estimativas, foi utilizada a equação 4.5, com dados das emissões de GEE resultantes em cada etapa produtiva (ANEXO F), levando em conta os períodos de base correspondentes (TAB. 45). Uma vez que as emissões em cada cenário estão estimadas em função do período de base (b_n), tais emissões estão expressas em kg CO₂eq/ha.ano.

O ANEXO G mostra as emissões de GEE resultantes para cada um dos cenários tecnológicos identificados. A FIG. 33, a seguir, mostra as emissões médias de GEE para os 180 cenários identificados (os dados do conteúdo de cada cenário, incluindo o sistema de codificação dos mesmos, estão relacionados no ANEXO G).

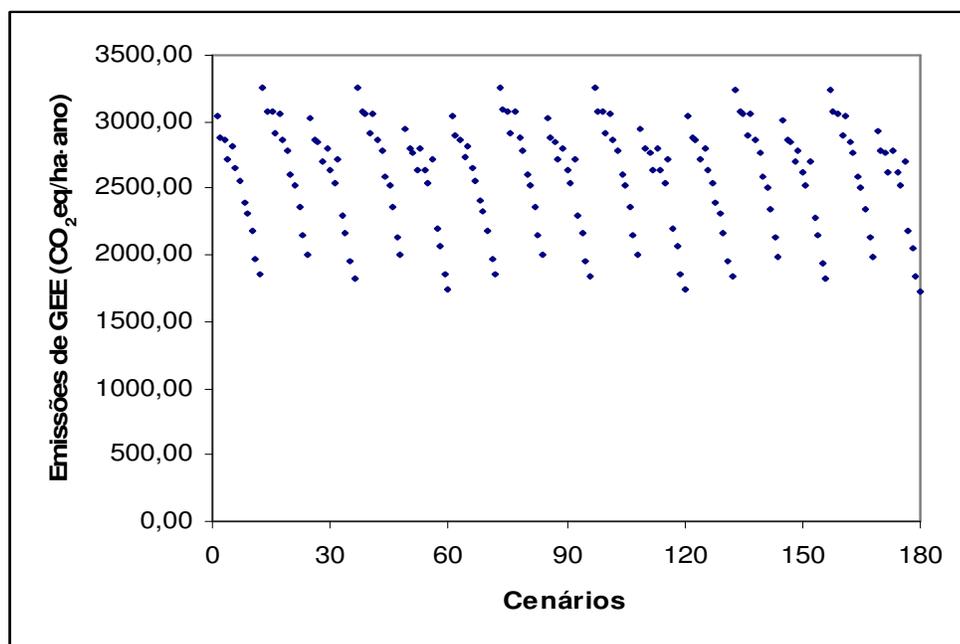


Figura 33: Emissões de GEE em função de diferentes cenários tecnológicos para produção de etanol

Pode-se observar que as emissões de GEE variam notadamente em função do cenário tecnológico considerado. A faixa de variação das emissões vai desde 1729,24 CO₂eq/ha.ano (cenário 180) a 3257,45 kg CO₂/ha.ano (cenário 97).

Dentre todos os cenários identificados, foram escolhidos alguns considerados importantes para uma análise mais detalhada. Os cenários foram escolhidos tendo em vista sua representatividade dentro do escopo dos 180 cenários identificados. O Quadro 15 mostra tais cenários escolhidos e suas características. Posteriormente é feita uma análise desses cenários.

Quadro 15: Alguns cenários tecnológicos para produção de etanol, suas características e emissões de GEE

Nº	Cenário	Descrição	Características ⁽¹⁾	Emissões médias de GEE ⁽²⁾
73	1112121111114	Cenário com maior volume de emissões	Cultivo mecanizado; com adubação para cana de ano em área de vinhaça no plantio; adubação para cana queimada em área de vinhaça em soqueira; com queima do canavial e colheita manual; industrialização de cana-de-açúcar; em área agrícola sem pousio e realização de 7 cortes de cana.	3257,45
180	1113155122115	Cenário com menor volume de emissões	Cultivo mínimo; adubação com torta de filtro no plantio e em soqueira ⁽³⁾ ; sem queima do canavial e colheita mecânica; industrialização de cana-de-açúcar; em área agrícola com pousio e realização de 5,63 cortes de cana	1729,24
29	1111133111111	Cenário mais frequente	Cultivo convencional; com adubação para cana de ano e meio em área sem vinhaça no plantio; adubação para cana queimada em área sem vinhaça em soqueira; com queima do canavial e colheita manual; industrialização de cana-de-açúcar; em área agrícola sem pousio e realização de 5,63 cortes de cana.	2797,83
136	1113122122118	Cenário menos frequente	Cultivo mínimo; adubação para cana de ano em área de vinhaça no plantio; adubação para cana crua em área de vinhaça em soqueira; sem queima do canavial e colheita mecânica; industrialização de cana-de-açúcar; em área agrícola com pousio e realização de 7 cortes de cana	2899,88

(1) As características mostram os aspectos singulares de cada cenário, o qual não inclui as operações de manutenção na área de cultivo, produção de mudas, aplicação de calcário e gesso, operações em soqueira, aplicação de defensivos agrícolas e transporte de cana, visto que tais atividades são comuns a todos os cenários identificados

(2) Emissões em kg CO₂eq/ha·ano

(3) A adubação com torta de filtro considera plantio de cana de ano e meio em áreas sem aplicação de vinhaça, que são as práticas mais frequentes nas usinas pesquisadas

5.3.1 Cenário com maior volume de emissões

No Quadro 15 pode-se observar que o cenário nº 73 possui o maior nível de emissões de GEE (3257,52 kg CO₂eq/ha·ano) em comparação ao restante dos cenários. O volume alto de emissões nesse caso ocorre, dentre outros fatores, devido ao elevado consumo de combustíveis ocasionado principalmente pelo uso de equipamentos/veículos nas operações de colheita, carregamento e transporte da cana. Nessas operações, a maior parte das emissões ocorre devido ao transporte de cana, uma vez que a colheita manual (característica do cenário nº 73) dispensa o uso de grandes quantidades de combustível. O alto volume de emissões devido ao uso de combustíveis no cenário nº 73 também se deve ao maior consumo de combustível nas operações de plantio mecânico em comparação aos outros tipos de cultivo. O plantio mecanizado exige o uso de plantadora mecânica, a qual opera em conjunto com veículos de transbordo, além de que não dispensa a realização de gradagens na área de plantio

(TAB. 20); tais operações demandam o uso de equipamentos/veículos que apresentam elevado consumo de combustível em comparação a outros equipamentos. O uso de combustível para aplicação de vinhaça tanto no plantio quanto em soqueira, práticas que não são frequentes na maioria dos cenários, também eleva o nível emissões devido ao consumo de combustíveis no cenário nº 73.

Por outro lado, as emissões no cenário nº 73 são elevadas também devido ao tipo de adubação realizada no plantio e em soqueira. Nesses casos, com adubação específica para cana queimada em áreas de vinhaça, a utilização de fertilizantes nitrogenados e a aplicação da vinhaça, os quais resultam na emissão de N_2O do solo, são fontes importantes de emissões de GEE; ambas fontes ocasionam aproximadamente 25% das emissões totais. Cabe ressaltar que as emissões de N_2O devido ao uso de fertilizantes nitrogenados é ainda maior em áreas de cana crua, no entanto essas emissões são compensadas pela colheita mecânica, onde o canavial não é submetido à queima.

A queima do canavial antes da colheita também eleva o nível de emissões no cenário nº 73. Esta queima é normalmente realizada para colheita manual e ocasiona maior quantidade de emissões de GEE em comparação à colheita mecânica. A queima do canavial representa aproximadamente um terço das emissões totais de GEE.

Com respeito ao período de base considerado no cenário nº 73 ($b_4 = 7$ anos), o fator relacionado a esse período, que eleva o nível de emissões de GEE, se deve a que nesse cenário é utilizada cana de ano durante o plantio, além de que a área agrícola não é submetida ao período de pousio. Essas práticas diminuem o ciclo do canavial, o qual é de 7 anos nesse caso. Isso, por sua vez, resulta em um menor tempo de aproveitamento dos recursos utilizados para o cultivo de cana, já que a mesma quantidade de recursos seria utilizada por 7,89 anos, caso fosse plantada cana de ano e meio com período de pousio de 4,67 anos. Dessa forma, a quantidade de recursos utilizados por hectare e por ano no cenário nº 73 é maior, contribuindo assim para o aumento do volume de emissões de GEE. De fato, em um cenário equivalente, porém com o plantio de cana de ano e meio e adoção do período de pousio (cenário nº 62), as emissões médias resultantes são de 2890,01 kg $CO_2eq/ha \cdot ano$, aproximadamente 11% a menos das emissões totais correspondentes ao cenário nº 73. A TAB. 46 e a FIG. 34, a seguir, mostram as emissões de GEE resultantes no cenário nº 73 e a contribuição de cada fonte ao total de emissões, respectivamente.

Tabela 46: Emissões de GEE na produção de etanol – cenário com maior volume de emissões

Categoria	Emissões de GEE (kg CO₂eq/ha·ano)
Consumo de combustíveis	607,43
Operações agrícolas	114,74
Aplicação de vinhaça	140,95
Transporte de insumos	81,10
Colheita, carregamento e transporte de cana	270,65
Produção de mudas	35,66
Aplicação de corretivos	229,58
Consumo de fertilizantes	353,50
Emissões de N ₂ O do solo	898,59
N ₂ O devido ao uso de fertilizantes	559,55
N ₂ O devido à aplicação de vinhaça	286,89
N ₂ O devido à palha remanescente após queima do canavial	52,15
Consumo de defensivos agrícolas	30,37
Queima do canavial	1051,62
Consumo de produtos químicos - Industrialização	50,78
TOTAL	3257,52

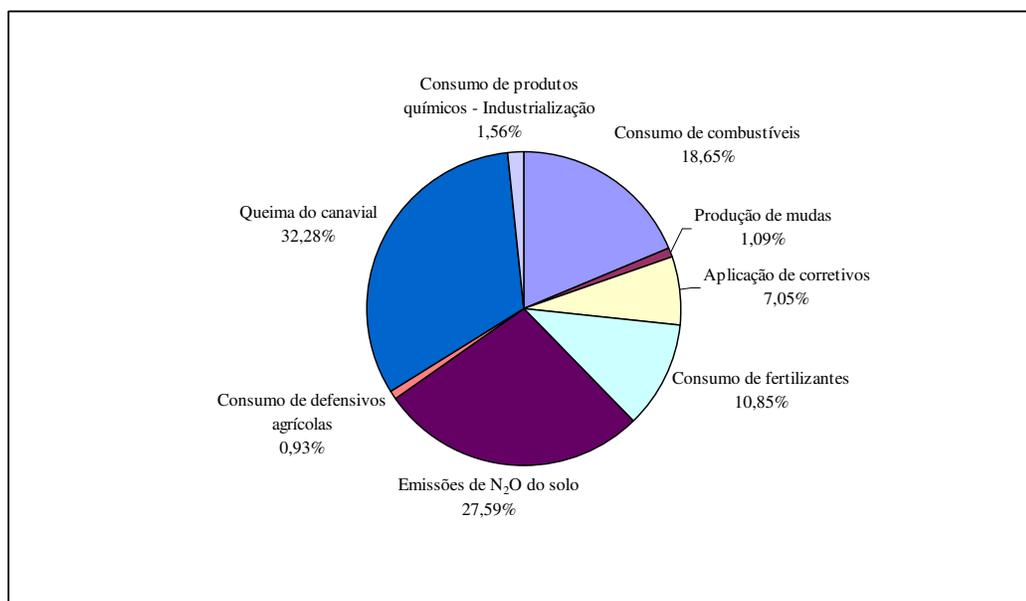


Figura 34: Contribuição de cada fonte ao total de emissões – cenário com maior volume de emissões

5.3.2 Cenário com menor volume de emissões

O cenário nº 180 é aquele que apresenta menor volume de emissões de GEE. Vários fatores contribuem para diminuição das emissões nesse caso, dentre eles pode-se destacar o menor consumo de combustíveis durante o cultivo mínimo, uma vez que nessa modalidade de

cultivo é realizada menor quantidade de operações agrícolas em comparação a outras formas de cultivo. No entanto, o consumo de combustíveis aumenta bastante nas operações de colheita, carregamento e transporte de cana, já que no cenário nº 180 é realizada colheita mecânica acompanhada de transbordo para transporte de cana. Tais operações consomem grande quantidade de combustíveis em comparação à colheita manual. Por outro lado, o elevado consumo de combustíveis durante a colheita mecânica é compensado pela baixa emissão de GEE resultante da colheita sem queima do canavial, prática que diminui expressivamente as emissões totais de GEE no cenário nº 180.

Outro fator importante que diminui o volume de emissões de GEE no cenário nº 180 é a aplicação de torta de filtro em substituição ao uso de fertilizantes sintéticos. Isso resulta em menor emissão de N_2O do solo. Nesse sentido, observaram-se diferenças quanto ao conteúdo de N aplicado em áreas de adubação com fertilizantes sintéticos e áreas de adubação com torta de filtro. Durante o plantio, considerando cana de ano e meio em área sem vinhaça, o conteúdo de N aplicado por meio de fertilizantes sintéticos é, em média, de 58,33 kg/ha (TAB. 28). Já a adubação com torta de filtro confere um total de 64,40 kg/ha ao solo no plantio (com base em dados da TAB. 31). Assim mesmo, na adubação em soqueira, em áreas de cana queimada sem aplicação de vinhaça, o uso de fertilizantes nitrogenados confere, em média, 100 kg/ha ao solo (TAB. 34). Por meio da torta de filtro, a quantidade de N colocada no solo é de 67,5 kg/ha (TAB. 36). Dessa forma, considerando o plantio e todos os cortes da cana-soca, o conteúdo de N aplicado no solo é menor quando se realiza adubação com torta de filtro. Isso diminui a emissão de N_2O do solo. Além disso, uma vez que não são utilizados fertilizantes sintéticos em áreas de torta de filtro, não há emissões correspondentes à obtenção de fertilizantes.

Outro aspecto importante que contribui para a diminuição das emissões de GEE no cenário nº 180 é a prática de colheita mecânica. Isso é normalmente realizado sem queima prévia do canavial, de modo que deixam de ser emitidas quantidades importantes de GEE. No entanto, a realização de colheita sem queima prévia resulta no aumento de N no solo, por meio da palha remanescente. Isso resulta na geração de quantidades importantes de N_2O do solo.

Finalmente, um dos fatores que mais contribui para a baixa emissão de GEE é o alto aproveitamento de recursos durante o ciclo do canavial no cenário nº 180 (6,52 anos). Nesse sentido, a utilização de cana de ano e meio no plantio, juntamente com a prática do pousio,

ajudam a estender o ciclo do canavial com maior aproveitamento de recursos por hectare por ano. A seguir (TAB. 47 e FIG. 35), mostram-se as emissões de GEE resultantes no cenário nº 180.

Tabela 47: Emissões de GEE na produção de etanol – cenário com menor volume de emissões

Categoria	Emissões de GEE (kg CO₂eq/ha·ano)
Consumo de combustíveis	694,22
Operações agrícolas	92,44
Transporte de insumos	134,10
Colheita, carregamento e transporte de cana	467,68
Produção de mudas	38,28
Aplicação de corretivos	246,48
Emissões de N ₂ O do solo	680,18
N ₂ O devido à aplicação de torta de filtro	289,08
N ₂ O devido à palha remanescente após a colheita	391,10
Consumo de defensivos agrícolas	26,22
Consumo de produtos químicos - Industrialização	43,86
TOTAL	1729,24

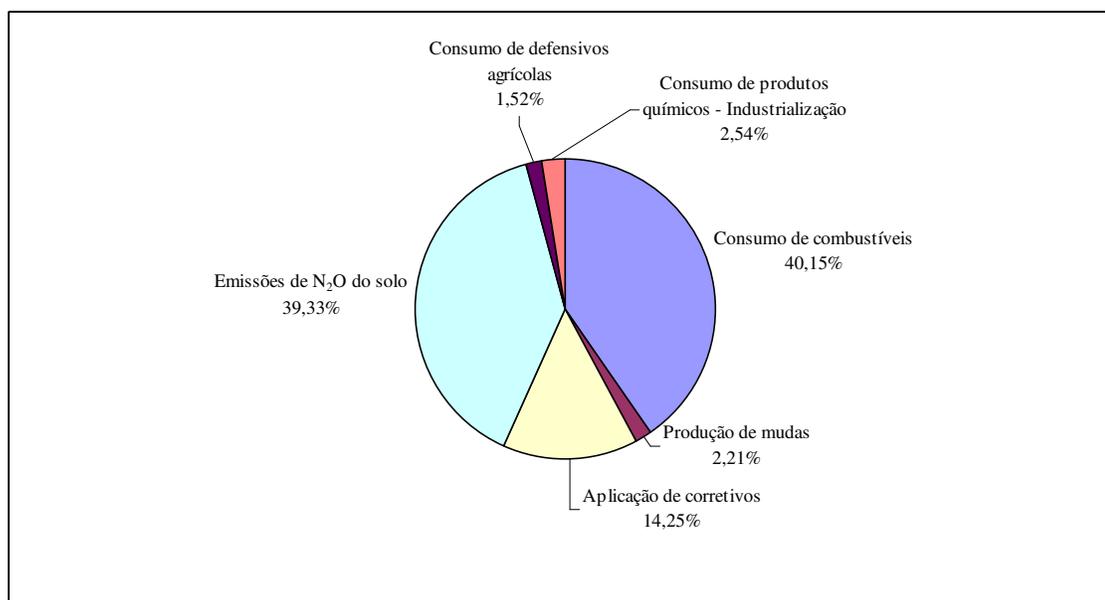


Figura 35: Contribuição de cada fonte ao total de emissões – cenário com menor volume de emissões

5.3.3 Cenário mais frequente

Na TAB. 45 pode-se observar que o processo mais utilizado de agricultura e industrialização da cana-de-açúcar para produção de etanol é aquele cujo cultivo de cana é realizado sem

pousio (96,37% da área total, conforme dados da TAB. 12), de forma convencional (56% da área dedicada a preparo do solo e plantio), com cana de ano e meio sem irrigação na área de plantio (34,32% da área), sem irrigação com cana queimada na área de soqueira (51,81% da área), com queima prévia do canavial antes da colheita (45,50% da área)³⁵ e com colheita manual (71,20% da área de colheita). O período de base compatível com essas características é b_1 (6,13 anos). Esses atributos correspondem ao cenário nº 29, que é o mais frequente.

Esse cenário caracteriza-se pela baixa emissão de GEE nas operações agrícolas, uma vez que não há emissões devido a colheita mecânica e aplicação de vinhaça. As emissões de N₂O do solo também são baixas, devido à falta de aplicação de vinhaça e baixa quantidade de palha remanescente após a colheita. No entanto, o volume de emissões aumenta principalmente devido à queima do canavial, o qual representa aproximadamente 35% do total de emissões. A TAB. 48, a seguir, e a FIG. 36 mostram o resultado de emissões de GEE para o cenário nº 29.

Tabela 48: Emissões de GEE na produção de etanol – cenário mais frequente

Categoria	Emissões de GEE (kg CO₂eq/ha·ano)	
Consumo de combustíveis		458,40
Operações agrícolas	110,17	
Transporte de insumos	99,66	
Colheita, carregamento e transporte de cana	248,57	
Produção de mudas		40,72
Aplicação de corretivos		262,16
Consumo de fertilizantes		425,64
Emissões de N ₂ O do solo		570,54
N ₂ O devido ao uso de fertilizantes	522,65	
N ₂ O devido à palha remanescente após queima do canavial	47,89	
Consumo defensivos agrícolas		27,89
Queima do canavial		965,84
Consumo de produtos químicos - Industrialização		46,64
TOTAL		2797,83

³⁵ A área submetida a queima do canavial é a menor parte da área que fará parte da colheita. No entanto essa área foi escolhida para o cenário mais frequente por ser compatível com a adubação de cana queimada e colheita manual, que são as opções tecnológicas mais frequentes na adubação e colheita da cana, respectivamente.

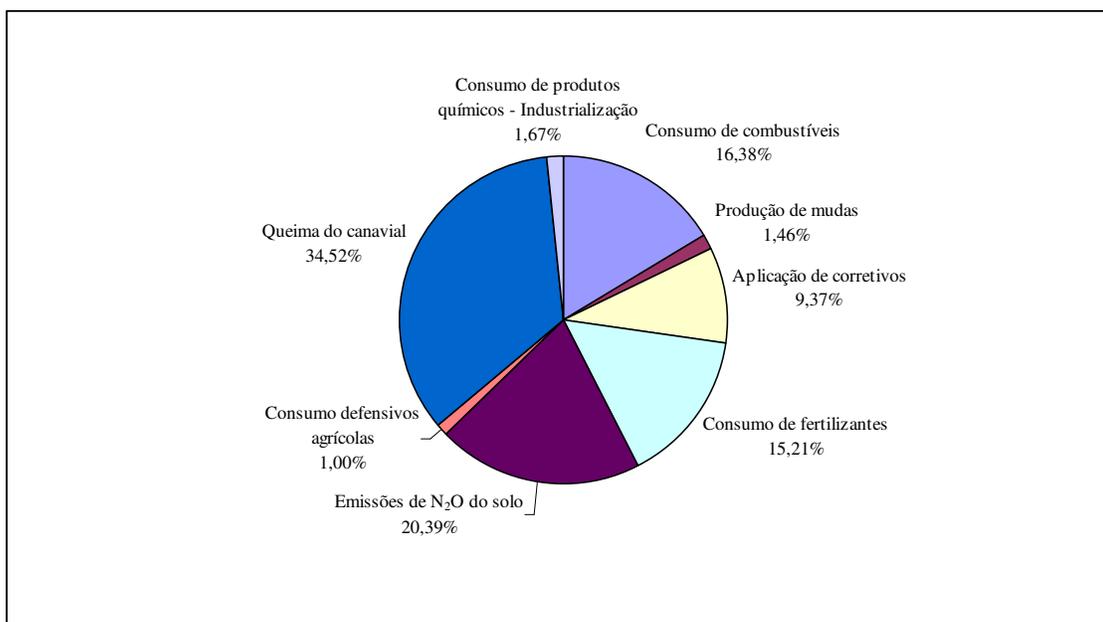


Figura 36: Contribuição de cada fonte ao total de emissões – cenário mais frequente

5.3.4 Cenário menos frequente

O cenário menos frequente para produção de etanol corresponde ao cenário nº 136, o qual está caracterizado principalmente pela realização de cultivo mínimo (24,71% da área de cultivo), plantio de cana de ano em área fertirrigada (8,61% da área de plantio), cultivo de soqueira em área de aplicação de vinhaça (5,80%) e colheita mecânica de cana crua (29,80% da área de colheita). O período de base neste caso é de 7,39 anos (b_8), que corresponde à prática de pousio antes do plantio e realização de 7 cortes de cana. No cenário nº 136, o consumo de combustíveis é alto, devido ao uso de equipamentos/veículos para aplicação de vinhaça e realização de colheita mecânica. Esse cenário também apresenta grande volume de emissões de N₂O, o qual se explica principalmente pelo alto conteúdo de N nos fertilizantes utilizados nesse cenário (média de 112,5 kg/ha, conforme a TAB. 33). Nesse sentido, segundo dados da pesquisa de campo, a adubação de cana crua em áreas de vinhaça é aquela que possui maior conteúdo de N em comparação a outros tipos de adubação, portanto, as emissões de N₂O são altas em cenários que apresentam esse tipo de adubação. Por outro lado, no cenário nº 136, a realização de colheita mecânica de cana crua resulta na deposição de quantidades importantes de palha remanescente no solo, o qual, por sua vez, resulta na emissão de um grande volume de N₂O. Essa característica é comum a todos os cenários que incluem colheita mecânica. A seguir são apresentados os resultados principais de emissões de GEE para o cenário nº 136.

Tabela 49: Emissões de GEE na produção de etanol – cenário menos frequente

Categoria	Emissões de GEE (kg CO₂eq/ha·ano)
Consumo de combustíveis	822,10
Operações agrícolas	95,56
Aplicação de vinhaça	133,51
Transporte de insumos	80,01
Colheita, carregamento e transporte de cana	513,03
Produção de mudas	33,77
Aplicação de corretivos	217,46
Consumo de fertilizantes	432,92
Emissões de N ₂ O do solo	1316,78
N ₂ O devido ao uso de fertilizantes	596,52
N ₂ O devido à aplicação de vinhaça	291,24
N ₂ O devido à palha remanescente após queima do canavial	429,02
Consumo defensivos agrícolas	28,76
Consumo de produtos químicos – Industrialização	48,10
TOTAL	2899,89

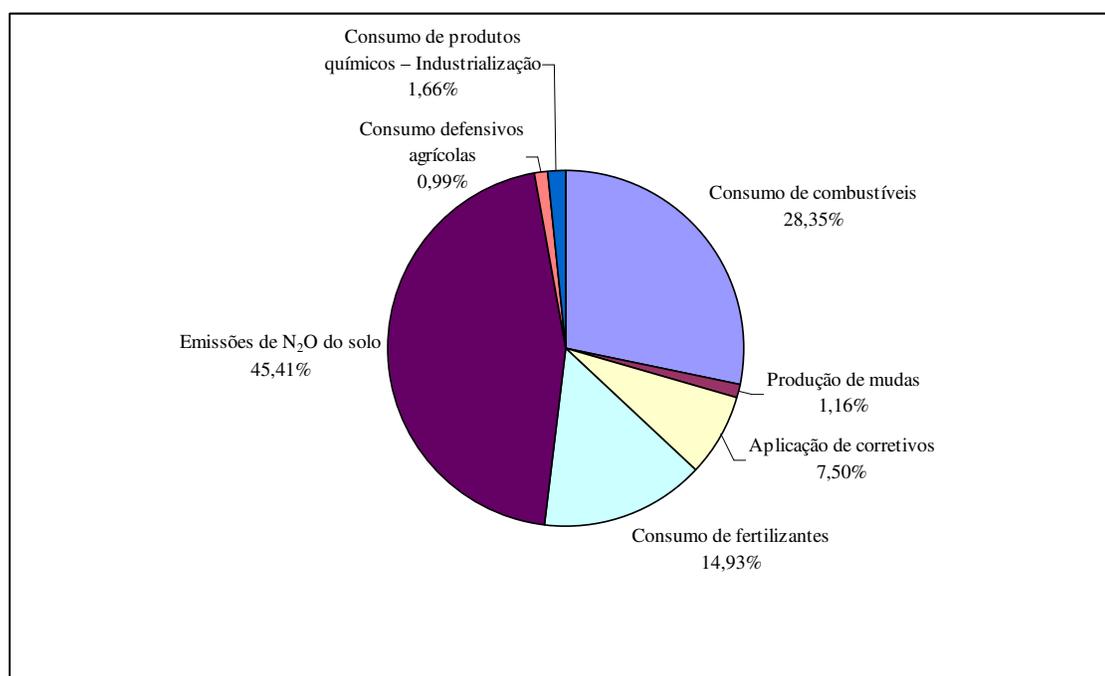


Figura 37: Contribuição de cada fonte ao total de emissões – cenário menos frequente

5.4 Análise de variância

Para avaliar as diferenças existentes entre as emissões de GEE resultantes de cada cenário tecnológico identificado na pesquisa de campo, foi realizada uma análise de variância (ANOVA) com intervalo de confiança de 5% ($\alpha = 0,05$). A análise de variância foi feita

separadamente levando em conta: a) todos os cenários identificados na pesquisa de campo e b) os cenários apresentados no Quadro 15. Nesses casos a análise de variância mostrou diferenças significativas ($p < 0,05$) entre as emissões dos cenários considerados.

No entanto, analisando por separado alguns grupos de cenários, pôde-se observar que as emissões de GEE são estatisticamente iguais em algumas situações comuns a determinados cenários, ou seja, a análise de variância mostrou que os níveis de emissões de GEE são semelhantes nesses grupos. Nesse sentido, os cenários tecnológicos foram classificados em seis grupos. Cada grupo possui, estatisticamente, o mesmo nível de emissões de GEE. Assim, de acordo com o volume de emissões estimado para cada cenário tecnológico, os grupos identificados são os seguintes: cenários mais poluentes I, II e III; e cenários menos poluentes I, II e III. Os seis cenários foram classificados de acordo com o volume de emissões em ordem decrescente, de modo que os cenários mais poluentes possuem níveis altos de emissões de GEE, sendo que os cenários menos poluentes possuem níveis menores dessas emissões. A TAB. 50, a seguir, mostra um resumo da classificação dos cenários tecnológicos para a produção de etanol. Uma lista mais detalhada é apresentada no ANEXO H.

Tabela 50: Classificação dos cenários tecnológicos segundo suas emissões de GEE

Classificação	Frequência (%)	Média de emissões de GEE (kg CO₂eq/ha·ano)⁽¹⁾
Cenários mais poluentes I	18,57	3081,36
Cenários mais poluentes II	36,09	2793,95
Cenários mais poluentes III	17,40	2552,17
Cenários menos poluentes I	12,26	2262,74
Cenários menos poluentes II	8,96	2051,44
Cenários menos poluentes III	7,72	1847,33
Média ponderada		2600,52

(1) Média ponderada dos cenários correspondentes a cada classe, segundo a frequência das atividades agrícolas e industriais específicas a cada cenário

Pode-se observar, a partir dos dados do ANEXO H, que os cenários mais poluentes (I) apresentam níveis altos de emissões de GEE principalmente devido à queima do canavial, atividade que está presente em mais de 80% dos cenários mais poluentes (I). Como visto na seção 5.3.1, as emissões devido à queima do canavial representam em torno de um terço das emissões totais em cenários onde essa prática está inserida, portanto, é a fonte de emissão mais importante nos cenários mais poluentes. Segundo dados do PAMPA (2011), em torno de 45% da cana produzida em Minas Gerais é submetida a queima, sendo que essa prática deverá ser eliminada totalmente até o ano 2014 (COPAM, 2009). Portanto, espera-se uma redução significativa das emissões de GEE à medida que a prática de queima do canavial seja

reduzida. A aplicação de vinhaça, que é efetuada preferentemente em área de soqueira e que está presente em mais de 80% dos cenários mais poluentes (I), também mostra ser uma prática poluente no que diz respeito às emissões de GEE, já que resulta em quantidades importantes de emissões de N₂O do solo. Embora a aplicação de vinhaça não seja a fonte mais importante de emissões de N₂O – a fonte mais importante dessas emissões se deve à aplicação de fertilizantes – essa prática acrescenta um volume considerável de emissões de GEE (em torno de 10%) em comparação a cenários onde não é realizada aplicação de vinhaça.

Outro aspecto importante que eleva o nível de emissões nos cenários mais poluentes (I) é o uso de cana de ano no plantio. Observa-se essa prática em mais de 70% desses cenários. Como explicado anteriormente, o plantio de cana de ano resulta em menor aproveitamento dos recursos utilizados durante o ciclo do canavial, o qual eleva o nível de emissões de GEE. O menor aproveitamento de recursos também pode ser observado através das áreas que não são submetidas ao período de pousio. No caso dos cenários mais poluentes (I), essa opção representa mais de 80% dos casos.

Os cenários mais poluentes (II) apresentam menor quantidade de emissões devidas à queima do canavial em comparação aos cenários mais poluentes (I). Assim, pode-se observar que esses cenários incluem com maior frequência a prática de colheita mecânica sem queima do canavial. Nesse sentido, mais de 55% dos cenários mais poluentes (II) apresentam esse tipo de colheita. Comparando a colheita manual com queima do canavial e a colheita mecânica sem queima, observa-se que a segunda resulta em quase 60% de emissões a menos em comparação à primeira, o qual inclui as emissões devidas à queima do canavial, consumo de combustíveis e emissões resultantes da palha remanescente no solo. Isso significa uma redução de aproximadamente 500 kg CO₂eq/ha·ano, que favorecem os cenários que apresentam maior proporção de colheita mecânica sem queima do canavial, incluindo os cenários mais poluentes (II).

Os cenários mais poluentes (II) apresentam também menor uso de vinhaça em comparação aos cenários mais poluentes (I). No primeiro caso, em torno de 60% desses cenários incluem aplicação de vinhaça, o qual favorece a redução das emissões de GEE. O plantio de cana de ano e meio e a adoção do período de pousio também favorecem a redução do volume de emissões nos cenários mais poluentes (II); observa-se que a maioria desses cenários (em torno

de 70% no caso de plantio de cana de ano e meio e 60% no caso de adoção do período de pousio) incluem essas práticas.

As principais características dos cenários mais poluentes (III) são o plantio de cana de ano e meio, o cultivo de soqueira sem irrigação com vinhaça e a realização de colheita mecânica sem queima do canavial. No primeiro caso, observa-se que todos esses cenários incluem a prática de plantio de cana de ano e meio, favorecendo assim o maior aproveitamento de recursos durante o ciclo do canavial, o qual, por sua vez, reduz significativamente o volume de emissões de GEE. Por outro lado, nenhum dos cenários mais poluentes (III) apresenta aplicação de vinhaça em soqueira, prática que é mais poluente em comparação à aplicação realizada durante o plantio. Dentre os cenários mais poluentes, a maior proporção de colheita mecânica observada ocorre nos cenários mais poluentes (III), nos quais observa-se 60% desse tipo de colheita, que, como explicado anteriormente, diminui significativamente a emissão de GEE. Nos cenários mais poluentes (III), também observa-se queima do canavial em 40% desses cenários, no entanto, as emissões resultantes dessa prática são amenizadas principalmente pela realização de adubação com torta de filtro em soqueira, atividade que reduz significativamente o volume de emissões de GEE.

Os cenários menos poluentes (I) caracterizam-se principalmente pelo cultivo de cana sem aplicação de vinhaça em soqueira, sendo que, durante o plantio, 40% dos cenários apresentam essa prática. Assim mesmo, em todos esses cenários ocorre aplicação de torta de filtro em soqueira e queima do canavial. As emissões devido à queima nesses cenários representam a principal fonte de emissões de GEE, no entanto, tais emissões são amenizadas principalmente pela adubação com torta de filtro, plantio de cana de ano e meio e adoção do período de pousio. As emissões totais nos cenários menos poluentes são muito menores quando essas práticas são realizadas em combinação com colheita mecânica sem queima do canavial; é o caso dos cenários menos poluentes (II), onde mais de 80% dos casos apresentam esse tipo de colheita. Já os cenários menos poluentes (III), que são aqueles com menor volume de emissões, têm como principal característica a realização de 100% de colheita mecânica, plantio de cana de ano e meio, aplicação de torta de filtro em soqueira e cultivo sem aplicação de vinhaça, o qual mostra que tais práticas são as que mais favorecem a redução de emissões de GEE.

5.5 Conversão de unidades: kg CO₂eq/ha·ano para kg CO₂eq/L

As unidades de medida das emissões de GEE utilizadas no estudo (kg CO₂eq/ha·ano) podem ser convertidas a kg CO₂eq/L, para poder comparar os resultados obtidos com outros estudos de estimativa de emissões de GEE de biocombustíveis, por exemplo. Para tal efeito, primeiramente deve-se multiplicar o resultado (ou resultados) obtido no estudo pelo período de base (b_n) em questão. Dessa forma serão obtidas as emissões de GEE geradas durante todo o período de base considerado, em kg CO₂eq/ha. Como explicado anteriormente, durante o período de base são realizados certo número médio de cortes para colheita da cana-de-açúcar (5,6 cortes, no caso de cana não-irrigada, e 7 cortes, no caso de cana irrigada). O resultado de emissões de GEE gerados durante todo o período de base deve ser dividido pelo número de cortes correspondente, para assim obter as emissões médias de GEE geradas durante cada corte de cana-de-açúcar (em kg CO₂eq/ha).

Finalmente, para obter o resultado de emissões em kg CO₂eq/L, basta multiplicar o resultado em kg CO₂eq/ha pela produtividade agrícola da usina em questão (em hectares por tonelada de cana-de-açúcar) e pela quantidade de cana-de-açúcar utilizada para a obtenção de etanol (em toneladas de cana-de-açúcar por litro de etanol).

A seguir é apresentado um exemplo desta conversão, considerando o resultado das emissões de GEE no cenário mais frequente: o cenário nº 29 (111113311111), com emissões de 2797,83 kg CO₂eq/ha·ano. Neste caso, o período de base considerado (vide dados e comentários da TAB. 45) é de 6,13 anos, com 5,63 cortes da cana-de-açúcar. Para maior representatividade, será considerada a produtividade média de Minas Gerais em 2010 (CONAB, 2011): 84,928 t cana/ha, para o cultivo de cana-de-açúcar, e 83,518 L/t cana, para a produção de etanol.

Considerando esses dados, a conversão de unidades é a seguinte:

$$\frac{2797,83 \text{ kg CO}_2\text{eq}}{\text{ha} \times \text{ano}} \times \frac{6,13 \text{ anos}}{5,63} \times \frac{\text{ha}}{84,928 \text{ t}} \times \frac{\text{t}}{83,518 \text{ L}} = 0,42948 \text{ kg CO}_2\text{eq/L}$$

Essas emissões também podem ser expressadas em kg CO₂eq/m³. Nesse caso, as emissões acima calculadas correspondem a 429,48 kg CO₂eq/m³. O ANEXO I mostra as emissões de GEE para todos os cenários tecnológicos identificados na pesquisa de campo, expressadas em kg CO₂eq/L.

6 CONCLUSÕES

O presente estudo mostrou que as emissões de GEE decorrentes da produção de etanol de cana-de-açúcar dependem das etapas produtivas e atividades agrícolas e industriais envolvidas no processo de produção. A partir dessas etapas e atividades ocorrem diversos cenários tecnológicos nos quais o etanol é produzido, de modo que foram determinados um total de 180 cenários e suas respectivas emissões de GEE. Dependendo do cenário tecnológico, as emissões variam entre 1729,24 kg CO₂eq/ha·ano a 3257,45 kg CO₂eq/ha·ano.

Pode-se observar que certos cenários apresentam, estatisticamente, os mesmos níveis de emissões, pelo qual tais cenários podem ser classificados segundo seu potencial poluidor, de acordo com o volume de emissões gerado. Assim, observam-se 6 diferentes tipos de cenários tecnológicos, com níveis diferentes de emissões de GEE. Dentre esses cenários, aqueles mais poluentes apresentam emissões médias de GEE da ordem de 2552,17 kg CO₂eq/ha·ano a 3081,36 kg CO₂eq/ha·ano. Já os cenários menos poluentes apresentam emissões médias de 1847,33 kg CO₂eq/ha·ano a 2262,74 kg CO₂eq/ha·ano.

Dentre as fontes de emissão que mais afetam o nível de emissões de GEE nos diversos cenários tecnológicos para produção de etanol, as mais importantes são: queima do canavial, colheita mecânica, aplicação de vinhaça, plantio de cana de ano e adubação com fertilizantes nitrogenados. A queima do canavial é a maior fonte de emissão de GEE; grande parte dos cenários mais poluidores apresentam essa prática, de modo que aproximadamente um terço das emissões totais nesses cenários é composto de emissões devido à queima. No entanto, alguns cenários menos poluidores mostram que a prática de queima do canavial pode ser amenizada principalmente pelo plantio de cana de ano e meio, uso de torta de filtro na adubação, cultivo de cana sem aplicação de vinhaça e prática do pousio.

Dentre as atividades de agricultura e industrialização, aquela que mais emite GEE é a aplicação de corretivos agrícolas (calcário e gesso), com média de 1833,41 kg CO₂eq/ha. O alto volume de emissões nesse caso deve à utilização de grandes quantidades desses corretivos (3210 kg/ha, em média) durante a reforma do canavial e depois do segundo corte da cana-soca, o qual gera emissões principalmente devido à formação de CO₂ a partir dos carbonatos presentes no calcário. No entanto, considerando todo o ciclo produtivo do canavial, uma vez que a aplicação de corretivos não é realizada durante todos os cortes da

cana-de-açúcar, as emissões devidas a essa atividade, de modo geral, não figuram entre as fontes de emissão mais importantes.

O plantio de cana de ano e meio, da mesma forma que a prática do pousio, favorece a redução das emissões totais de GEE, uma vez que essas práticas prolongam o ciclo do canavial, de modo que os recursos para a produção de etanol são utilizados por mais tempo, o qual resulta na diminuição do volume de emissões.

O uso de torta de filtro, dispensando o uso de fertilizantes sintéticos, mostra que as emissões devido ao uso de fertilizantes podem ser reduzidas a menos da metade. Isso resulta em reduções importantes no total de emissões de GEE, de modo que grande parte dos cenários menos poluentes apresentam uso de torta de filtro na adubação.

A aplicação de vinhaça, que resulta em emissões de N_2O do solo, mostrou ser uma fonte importante de emissões de GEE, principalmente quando essa prática é realizada em soqueira. Grande parte dos cenários mais poluentes apresentam aplicação de vinhaça, a qual resulta em um acréscimo de aproximadamente 10% nas emissões totais em comparação a cenários onde não existe a prática de aplicação de vinhaça.

O cenário mais poluente para a produção de etanol apresenta emissões médias de 3257,52 kg $CO_2eq/ha\cdot ano$. Esse cenário caracteriza-se principalmente pelo cultivo mecanizado com plantio de cana de ano sem pousio, aplicação de vinhaça no plantio e em soqueira, queima do canavial antes da colheita e realização de sete cortes de cana-de-açúcar. A maior parte das emissões nesse cenário se devem à queima do canavial, emissões de N_2O do solo e consumo de combustíveis. Essas fontes de emissão representam quase 80% do total de emissões nesse cenário.

O cenário com menor quantidade de emissões de GEE apresenta emissões médias de 1729,24 kg $CO_2eq/ha\cdot ano$. Esse cenário se caracteriza principalmente pelo cultivo mínimo com pousio, plantio de cana de ano e meio, adubação com torta de filtro no plantio e em soqueira, colheita mecânica sem queima do canavial e realização de 5,63 cortes de cana-de-açúcar, em média. Nesse cenário, as fontes de emissão mais importantes são: consumo de combustíveis, emissões de N_2O no solo e aplicação de corretivos. Tais fontes respondem por mais do 90% do total de emissões de GEE nesse cenário.

O cenário tecnológico mais frequente para produção de etanol atualmente praticado em Minas Gerais gera emissões médias de 2797,83. Esse cenário se caracteriza principalmente pelo cultivo convencional (semi-mecanizado) sem pousio, plantio de cana de ano e meio, sem irrigação, colheita manual com queima do canavial e média de 5,63 cortes de cana-de-açúcar. As emissões de GEE nesse cenário se devem principalmente à queima do canavial, emissões de N₂O no solo, consumo de combustíveis e aplicação de fertilizantes. Essas fontes emitem mais do 85% do total de emissões de GEE nesse cenário.

A identificação de diversos cenários tecnológicos para produção de etanol leva a estimativas diferentes de emissões de GEE. Estas diferenças poderiam ser levadas em conta em estudos de Avaliação do Ciclo de Vida de biocombustíveis, os quais devem considerar os processos envolvidos em todas as etapas de produção desses compostos. No caso do etanol, pode-se observar que as etapas de agricultura e industrialização ocorrem em cenários diferentes, o que afeta significativamente a estimativa de emissões de GEE.

REFERÊNCIAS

ADLER, P. R.; DEL GROSSO, S. J.; PARTON, W. J. Life-cycle assessment of net greenhouse-gas flux for bioenergy cropping systems. *Ecological Applications*, v. 17, n. 3, p. 675-91, abr. 2007.

AGROBYTE. *Cana-de-açúcar*. s.d. Disponível em <www.agrobyte.com.br> Acesso em Abr. 2009.

ALMEIDA, B. A.; BARRETO, G. F.; GONÇALVES, C. M. Resíduos da agroindústria canavieira no estado de Minas Gerais: usos e conservação ambiental. *Informe agropecuário*, Belo Horizonte, v. 28, n. 239, p. 96-100, jul./ago. 2007.

ANDRADE, L. A. de B.; ANDRADE, P. P. Implantação e condução de canaviais. *Informe agropecuário*, Belo Horizonte, v. 28, n. 239, p. 44-54, jul./ago. 2007.

AMMANN, C.; SPRING, C.; FISCHER, C.; LEIFELD, J.; NEFTEL, A. Interactive comment on “N₂O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels” by P. J. Crutzen *et al.* *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, v. 7, p. S4779-S4781, 2007.

BAIRD, C. Química Ambiental. 2^a. ed. Porto Alegre: Bookman, 2002.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO (org.). *Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável*. Rio de Janeiro: BNDES, 2008a. 316 p.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO (org.). *Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável – Resumo executivo*. Rio de Janeiro: BNDES, 2008b. 32 p.

BARBOSA, M. P.; SILVEIRA, L. C.; MACEDO, G. A.; PAES, J. M. Variedades melhoradas de cana-de-açúcar para Minas Gerais. *Informe agropecuário*, Belo Horizonte, v. 28, n. 239, p. 20-24, jul./ago. 2007.

BARRETO JUNIOR, M. Industrialização da cana-de-açúcar. *Informe agropecuário*, Belo Horizonte, v. 28, n. 239, p. 70-76, jul./ago. 2007.

BENEDINI, M. S.; PENATTI, C. P. Recomendação de adubação da cana-de-açúcar pela estimativa da produtividade. *Coplana*, n. 21, p. 20-21, jan. 2008.

CAMPOS, M. O setor sucroalcooleiro no Brasil e em Minas Gerais. Ituiutaba: SIAMIG/SINDAÇÚCAR, 2008.

CAMPOS FILHO, M. F.; SANTOS, M. Setor sucroalcooleiro em Minas Gerais. *Informe Agropecuário*, Belo Horizonte, v. 28, n. 239, p. 7-11, jul./ago. 2007.

CENTRO DE TECNOLOGIA CANAVIEIRA. Programa de Acompanhamento Mensal de Performance Agrícola (PAMPA) – Comparação Safra 2009/2010 × Safra 2010/2011. São Paulo: CTC, 2009.

CENTRO DE TECNOLOGIA CANAVIEIRA. Programa de Acompanhamento Mensal de Performance Agrícola (PAMPA) – Safra 2010/2011. São Paulo: CTC, 2011.

COLETI, J. T. Técnica cultural de plantio In: PARANHOS, S. B. [Coord.]. *Cana-de-açúcar: cultivo e utilização*. Campinas: Fundação Cargill, 1987. p. 284-332. *apud* ANDRADE, L. A. de B.; ANDRADE, P. P. Implantação e condução de canaviais. *Informe agropecuário*, Belo Horizonte, v. 28, n. 239, p. 44-54, jul./ago. 2007.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. *Uso de energia na indústria de açúcar e álcool em Minas Gerais*. Belo Horizonte: CEMIG, 1990. 79 p.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. *Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar, safra 2010/2011, terceiro levantamento, janeiro/2011*. Brasília: CONAB, 2011. 19 p.

CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL. Deliberação normativa nº 133 – Regulamenta a prática da queima de cana-de-açúcar para fins de colheita, e dá outras providências. Diário Executivo – Minas Gerais, 2009.

CORBINI, J. L. Operações agrícolas em tratamentos culturais. In: PARANHOS, S. B. (Coord.). *Cana-de-açúcar: cultivo e utilização*. Campinas: Fundação Cargill, 1977 *apud* ANDRADE, L. A. de B.; ANDRADE, P. P. Implantação e condução de canaviais. *Informe agropecuário*, Belo Horizonte, v. 28, n. 239, p. 44-54, jul./ago. 2007.

COSTA, E. L.; MACEDO G. A.; SIMÃO, F. R.; DINIZ, R. S. Irrigação da cana-de-açúcar. *Informe agropecuário*, Belo Horizonte, v. 28, n. 239, p. 56-63, jul./ago. 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 Discussions*, v. 7, p. 11191-11205, 2007.

DEMATTE, J. L. I. Manejo e conservação de solos na cultura da cana. *Visão Agrícola*, Piracicaba, v. 1, n. 1, p. 8-17, jan/jun. 2004.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. *Efeito da água no rendimento das culturas*. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1994, 306 p *apud* SANTOS, C. S. *Irrigação suplementar da cana-de-açúcar (Saccharum spp): Um modelo de análise de decisão para o Estado de Alagoas*. 2005. 101 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, São Paulo.

DUARTE JÚNIOR, J. B.; COELHO, F. C. A cana-de-açúcar em sistema de plantio direto comparado ao sistema convencional com e sem adubação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 12, n. 6, p.576–583, 2008.

ELETROBRÁS. *Aproveitamento energético dos resíduos da agroindústria da cana-de-açúcar*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1983. 339 p.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Cana-de-açúcar já é a segunda fonte primária de energia no Brasil. In: EPE. *Balanço Energético Nacional: Resultados preliminares*, 2008. Disponível em <www.ben.epe.gov.br> Acesso em Maio 2009.

ESTEVES, O. de A. *Análise exergética da produção do etanol da cana-de-açúcar*. 1996. 120 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Técnicas Nucleares) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. *Life Cycle Assessment: a guide to approaches, experiences and information sources*. EEA, 1997. 116 p.

FERNANDEZ, P. Metodologias de monitoramento de projetos de MDL: uma análise estrutural e funcional. 2005. 116 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

FERREIRA, E. S.; ZOTARELLI, E. M. M.; SALVIATI, L. Efeitos da utilização da torta de filtro na produtividade da cana-de-açúcar. SEMINÁRIO DE TECNOLOGIA AGRONÔMICA. 4., 1988, Piracicaba. *Anais...* Piracicaba: Corpersucar, 1988. p. 321- 331

apud SANTOS, D. E. dos. *Adubação fosfatada no plantio de cana-de-açúcar a partir de torta de filtro enriquecida com fosfato solúvel*. 1988. 36 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Universidade do Oeste Paulista, Presidente Prudente.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. *Sugar cane production*, 2009. Disponível em: <<http://faostat.fao.org>> . Acesso em Nov. 2009.

FREDLUND, D.G. & XING, A. Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 31, nº 3, p. 521-532, 1994 apud SILVA, A. M. da. *Banco de dados de curvas de retenção de água de solos brasileiros*, 2005. 141 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Universidade de São Paulo, São Carlos.

FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. *Produção e utilização de carvão vegetal*. Belo Horizonte: CETEC, 1982. 393p.

GNANSOUNOU, E.; DAURIAT A.; PANICHELLI, L.; VILLEGAS, J. *Estimating Energy and Greenhouse gas balances of biofuels: concepts and methodologies*. Lausanne: EPFL-ENAC-LASEN, 2008. 28 p.

GRAEDEL, T. E. *Streamlined Life-Cycle Assessment*. New Jersey: Prentice Hall, 1998. 310 p.

HAAS, G.; WETERICH, F.; GEIER, U. Life cycle assessment framework in agriculture on the farm level. *International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 5, n. 6, p. 345-348, 2000.

INSTITUT FÜR UMWELTINFORMATIK; INSTITUT FÜR ENERGIE & UMWELTFORSCHUNG. *Ecoinvent v2.01a for Umberto 5.5*. Hamburg: 2006. 1 CD-ROM.

INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA. *Avaliação do ciclo de vida*. s.d. Disponível em <http://acv.ibict.br/normas/normasabnt.htm/document_view> Acesso em Mar. 2008.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Agriculture, forestry and other land use*. In: INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *2006 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories*. Hayama: IGES, 2006.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION. *Environmental management: Life cycle assessment – Principles and framework* (FDIS 14040). ISO, 1997 *apud* EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. *Life Cycle Assessment: a guide to approaches, experiences and information sources*. EEA, 1997. 116 p.

INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION. *Environmental management: Life cycle assessment – Goal and scope definition and inventory analysis* (DIS 14042). ISO, 1997 *apud* UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Life Cycle Assessment: principles and practice*. Cincinnati: USEPA, 2006. 88 p.

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS APLICADAS. *Dados dos municípios – Minas Gerais*. s.d. Disponível em <<http://www.iga.br>> Acesso em Dez. 2009.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. *Conservação de energia na indústria do açúcar e do álcool - Manual de Recomendações*, 1990 *apud* ESTEVES, O. de A. *Análise exergética da produção do etanol da cana-de-açúcar*. 1996. 120 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Técnicas Nucleares) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

KADAM, K. L. Environmental benefits on a life cycle basis of using bagasse-derived ethanol as a gasoline oxygenate in India. *Energy Policy*, n. 30, p. 371-384, 2002.

KIM, H.; KIM, S. ; DALE, B. E. Biofuels, Land Use Change, and Greenhouse Gas Emissions: Some Unexplored Variables. *Environmental Science & Technology*, v. 43, n. 3, p. 961 – 967, 2009.

KOFFLER, N. F.; DONZELLI, P. L. Avaliação dos solos brasileiros para a cultura da cana-de-açúcar. In: *Cana-de-açúcar: cultivo e utilização*. Campinas, Fundação Cargill, v.1, p. 19. 1987 *apud* NARDIN, R. R. *Torta de filtro aplicada em argissolo e seus efeitos agronômicos em duas variedades de cana-de-açúcar colhidas em duas épocas*. 2007. 51 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical), Instituto Agrônomo, Campinas.

KORNDOPFER, G. H. Fósforo na cultura da cana-de-açúcar. In: *FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA*, 2004, Piracicaba. *Anais...*São Pedro: POTAFOS, 2003. p. 291-305 *apud* VITTI, G. C. *et al. Nutrição e adubação da cana-de-açúcar*. Piracicaba: ESALQ/USP, 2004, 78 p.

LISKA, A. J.; CASSMAN, K. G. Towards standardization of life-cycle metrics for biofuels: greenhouse gas emissions mitigation and net energy yield. *Journal of biobased materials and bioenergy*, v. 2, p. 187-203, 2008.

LOPES, A.; LANÇAS, K.; FURLANI, C.; NAGAOKA, A.; NETO, P.; GROTTA, D. Consumo de combustível de um trator em função do tipo de pneu, da lastragem e da velocidade de trabalho. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 7, n. 2, p. 382-386, 2003.

MACHADO, M. L.; BRITO, R. J.; SIMÃO, M. L.; ANTUNES, A.; GOMES, I. Zoneamento agropedoclimático da cana-de-açúcar sucroalcooleira para o Estado de Minas Gerais. *Informe Agropecuário*, Belo Horizonte, v. 28, n. 239, p. 12-18, jul./ago. 2007.

MACEDO, I. C.; LEAL, M. R.; SILVA, J. E. Balanço das emissões de gases de efeito estufa na produção e no uso de etanol no Brasil. SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2004. 32 p.

MACEDO, I. C.; SEABRA, J.; SILVA, J. Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020. *Biomass and Energy*, v. 32, p. 582-595. 2008.

MACEDO, I. C.; MACEDO, G. A. *Novos produtos da sacarose*. Relatório reservado. Campinas, 2005 *apud* SEABRA, J. E. A. *Avaliação técnico-econômica de opções para o aproveitamento integral da biomassa de cana no Brasil*. 2008. 298 f. Tese (Doutorado em Planejamento Energético) – Escola de Engenharia, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo *apud* SEABRA, J. E. A. *Avaliação técnico-econômica de opções para o aproveitamento integral da biomassa de cana no Brasil*. 2008. 298 f. Tese (Doutorado em Planejamento Energético) – Escola de Engenharia, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. de. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. Piracicaba: POTAFOS, 1989, 201 p *apud* OLIVEIRA, M. W. de. *et al.* Nutrição mineral e adubação da cana-de-açúcar. *Informe Agropecuário*, Belo Horizonte, v. 28, n. 239, p. 30-43, jul./ago. 2007.

MATHEWS, J. A.; TAN, H. Biofuels and indirect land use change effects: the debate continues. *Biofuels, bioproducts and biorefining*, v. 3, p. 305 – 317, 2009.

MATSUOKA, S. longevidade do efeito do tratamento térmico em canas infectadas pelo raquitismo-da-soqueira. In: CONGRESSO NACIONAL DA STAB, 3., 1984, São Paulo. *Anais...*São Paulo: STAB, 1984. p. 244-249. *apud* SILVEIRA, L. C. I. da et al. Produção de mudas de cana-de-açúcar. *Informe agropecuário*, Belo Horizonte, v. 28, n. 239, p. 25-29, jul./ago. 2007.

MELO, G. C. B. de. *Efluentes atmosféricos e qualidade do ar*. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais/Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. 71 p.

MINAS GERAIS (Estado). Deliberação normativa COPAM nº 133, de 15 de abril de 2009. Regulamenta a prática da queima de cana-de-açúcar para fins de colheita, e dá outras providências.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. *Balanco energético nacional 2008*. Disponível em <<http://www.mme.gov.br>> Acesso em Ago. 2009.

MORAES, M. D. de. Considerações sobre a indústria do etanol do Brasil. In: MINISTÉRIO DE RELAÇÕES EXTERIORES. *Biocombustíveis no Brasil: Realidades e perspectivas*. Brasília: MRE, 2008. p. 137-157. Disponível em <<http://www.dc.mre.gov.br>> Acesso em Dez. 2009.

NARDIN, R. R. Torta de filtro aplicada em argissolo e seus efeitos agrônômicos em duas variedades de cana-de-açúcar colhidas em duas épocas. 2007. 51 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical), Instituto Agrônomo, Campinas.

NETTO, C. G. Plantio direto, o sal da terra. *Jornal da UNICAMP*, São Paulo, n. 308, 2005. Disponível em < http://www.unicamp.br/unicamp/unicamp_hoje/jornal> Acesso em Out. 2009.

NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. S. *Dendroenergia: fundamentos e aplicações*. Brasília: ANEEL, 2000. 144 p.

ODUM, E. P. *Ecologia*. 3ª ed. São Paulo: Livraria Pioneira. 1977. 201pp.

OLIVEIRA, M. W. de.; FREIRE, F.; MACEDO, G. A.; FERREIRA, J. Nutrição mineral e adubação da cana-de-açúcar. *Informe Agropecuário*, Belo Horizonte, v. 28, n. 239, p. 30-43, jul./ago. 2007.

ORLANDO FILHO, J. Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil. Piracicaba: Instituto do Açúcar e do Álcool, 1983, 368 p *apud* OLIVEIRA, M. W. de. *et al.* Nutrição mineral e adubação da cana-de-açúcar. *Informe Agropecuário*, Belo Horizonte, v. 28, n. 239, p. 30-43, jul./ago. 2007.

PEREIRA, J. R.; FERREIRA G. B.; GONDIM, T. M.; SANTOS, J. W. dos; VALE, D. G. Adubação orgânica com torta de filtro de cana-de-açúcar no algodoeiro semiperene BRS 200 no Cariri cearense. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ALGODÃO, 5, 2005.

RAIJ, B. van. Nova tabela de adubação e calagem para a cana-de-açúcar. In: SEMANA DA CANA-DE-AÇÚCAR DE PIRACICABA, 2., 1997, Piracicaba. *Anais...Piracicaba: ESALQ:IAC*, 1997.

RAMÍREZ, P. K. S. *Análise de métodos de alocação utilizados em Avaliação do Ciclo de Vida*, 2009. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

RIPOLI, M. L. C.; GAMERO, C. A. Palhiço de cana-de-açúcar: ensaio padronizado de recolhimento por enfardamento cilíndrico. *Energia Agrícola*, Botucatu, v. 22, n. 1, p. 75-93, 2007.

SANTOS, C. S. Irrigação suplementar da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*): Um modelo de análise de decisão para o Estado de Alagoas. 2005. 101 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, São Paulo.

SANTOS, D. E. dos. *Adubação fosfatada no plantio de cana-de-açúcar a partir de torta de filtro enriquecida com fosfato solúvel*. 1988. 36 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Universidade do Oeste Paulista, Presidente Prudente.

SALASSIER, B. Manejo da irrigação na cana-de-açúcar. s.d. CCTA/UENF.

SEABRA, J. E. A. *Avaliação técnico-econômica de opções para o aproveitamento integral da biomassa de cana no Brasil*. 2008. 298 f. Tese (Doutorado em Planejamento Energético) – Escola de Engenharia, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo.

SEABRA, J. E. A.; MACEDO, I. C. Balanço de energia e emissões de GEE na produção do açúcar e álcool orgânicos na Usina São Francisco. São Paulo: UNICAMP. s. d.

SEAGRI. Cultura cana-de-açúcar, s.d. Disponível em <<http://www.bahia.ba.gov.br/seagri>> Acesso em Jun. 2009.

SERRANA. Calagem na cana-de-açúcar. São Paulo: ESALQ/USP, 2001. Disponível em <<http://www.serrana.com.br>> Acesso em Jun. 2009.

SILVA, A. M. da. *Banco de dados de curvas de retenção de água de solos brasileiros*, 2005. 141 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Universidade de São Paulo, São Carlos.

SILVA, C. R. U. *Balanço de energia e das emissões de gases de efeito estufa da cadeia produtiva do etanol brasileiro*. 2009. 150 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos) – Escola de Engenharia, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo.

SILVEIRA, L. C. da; PAEZ, J. M.; BARBOSA, M. H.; MACEDO, G. A. Produção de mudas de cana-de-açúcar. *Informe agropecuário*, Belo Horizonte v. 28, n. 239, p. 25-29, jul./ago. 2007.

SIMÕES, A. J. F. Biocombustíveis: a experiência brasileira e o desafio da consolidação do mercado internacional. In: MINISTÉRIO DE RELAÇÕES EXTERIORES. *Biocombustíveis no Brasil: Realidades e perspectivas*. Brasília: MRE, 2008. p. 11-33. Disponível em <<http://www.dc.mre.gov.br>> Acesso em Dez. 2009.

SINDICATO DA INDÚSTRIA DO AÇÚCAR E DO ÁLCOOL DE MINAS GERAIS. Queima da cana terá fim em 2014. *Canavial*, Belo Horizonte, n. 14, 2008.

SOARES, L. H. de B.; ALVES, B. J.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Mitigação das emissões de gases de efeito estufa pelo uso de etanol da cana-de-açúcar produzido no Brasil. Circular Técnica, n. 27, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2009.

SONNE, E. Green house emissions from forestry operations: A Life Cycle Assessment. *Journal of Environmental Quality*, v. 35, p. 1439-1450, 2006.

SOUSSANA, J.; ALLARD V.; PILEGAARD, V.; AMBUS P.; AMMAN, C.; CAMPBELL, C.; CESCHIA, E.; BROWN, J.; CZOBEL, S.; DOMINGUES, R.; FLECHARD, C.; FUHRER, J.; HENSEN, A.; HORVATH, L.; JONES, M.; KASPER, G.; MARTIN, C.; NAGY, Z.; NEFTEL, A.; RASCHI, A.; BARONTY, S.; REES, R.; SKIBA, U.; STEFANI, P.; MANCA, G.; SUTTON, M.; TUBA, Z.; VALENTINI, R. Full accounting of the

greenhouse gas (CO₂, N₂O, CH₄) budget of nine European grassland sites. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, n. 121, p. 121–134, 2007.

SUMMER, M. E.; PAVAN, M. A. Alleviating soil acidity through matter management. In: *ROTAÇÃO SOJA/MILHO NO PLANTIO DIRETO*, 2000, Piracicaba. 1 CD-ROM *apud* OLIVEIRA, M. W. de. *et al.* Nutrição mineral e adubação da cana-de-açúcar. *Informe Agropecuário*, Belo Horizonte, v. 28, n. 239, p. 30-43, jul./ago. 2007.

TANIMOTO, O. S. Produção de cana-de-açúcar em SPDP. *Revista Plantio Direto*, n. 107, set./out. 2008. Disponível em <<http://www.plantiodireto.com.br>> Acesso em Nov. 2009.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. Kyoto protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. United Nations, 1998.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. Methodological questions in CDM biofuel projects: Consultancy for the UNFCCC Secretariat. United Nations, 2006.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. CDM: proposed new methodology [NM 0082: Baseline and monitoring methodology for the production of sugar cane based anhydrous bio-ethanol for transportation using LCA] Meth Panel recommendation to the Executive Board. UNFCCC, v. 06, 2006a.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. CDM: proposed new methodology [NM 0108: Production of biodiesel from perennial non-edible oil crops for use as fuel] Meth Panel recommendation to the Executive Board. UNFCCC, v. 07.1, 2006b.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. CDM: proposed new methodology [NM 0129: Generalized baseline methodology for transportation bio-fuel production project with Life-Cycle-Assessment] Meth Panel recommendation to the Executive Board. UNFCCC, v. 06, 2006c.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. CDM: proposed new methodology [NM 0142: Baseline methodology for palm methyl ester biodiesel fuel production for transportation using life cycle approach] Meth Panel recommendation to the Executive Board. UNFCCC, v. 07, 2007.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Life Cycle Assessment: principles and practice*. Cincinnati: USEPA, 2006. 88 p.

VASCONCELOS, A. C. M. de. Dinâmica do desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar como indicativo para subsolagem no preparo de solo e no cultivo de soqueiras. 2006. Disponível em <http://www.infobibos.com/Artigos/2006_2/raiz/index.htm> Acesso em Set. 2009.

VITTI, G. C.; QUEIROZ, F. E.; OTTO, R.; QUINTINO, T. A. *Nutrição e adubação da cana-de-açúcar*. Piracicaba: ESALQ/USP, 2004, 78 p.

XAVIER, G. G. Colheita da cana-de-açúcar. *Informe agropecuário*, Belo Horizonte, v. 28, n. 239, p. 64-68, jul./ago. 2007.

GLOSSÁRIO

Álcool anidro – Solução de etanol com um teor mínimo de 99,3 INPM, medidos a 20°C. É obtido a partir da destilação azeotrópica do álcool hidratado, por meio da introdução do benzol ou toluol.

Álcool Hidratado – Solução de etanol com um teor entre 92,6 e 93,8 INPM, medidos a 20°C. É obtido a partir da destilação do vinho derivado da fermentação do mosto.

Bagacinho – Também chamado de bagacilho, é o bagaço finalmente fragmentado que é separado do caldo misto por peneiramento na saída do tandem de moendas (CEMIG, 1990).

AR – Açúcares redutores.

ART – Açúcares redutores totais.

Brix – Percentagem em massa dos sólidos dissolvidos em solução de açúcar, geralmente medido por um dosímetro calibrado a 20°C. Para altos índices de pureza, mede, aproximadamente, o teor de sacarose. Pode também ser medido por um refratômetro, sendo a pureza aparente calculada por 1/B.

Cana-planta – Primeiro brote da cana-de-açúcar.

Cana-soca – Rebrotos da cana-de-açúcar.

Flegma – Produto, ainda com impurezas, que se obtém de uma primeira destilação do sumo fermentado da cana-de-açúcar, da beterraba, de mostos etc.

INPM – Ou grau INPM, é a quantidade de álcool em massa, contida em 100 g de uma mistura hidroalcoólica, ou seja, a porcentagem em massa de álcool em solução, geralmente medida por um densímetro devidamente calibrado a 20°C (CEMIG, 1990).

Mel – Produto residual da massa cozida, onde os cristais de sacarose nela contidos foram separados por centrifugação.

Melaço – Ou mel esgotado, é o mel do qual se retira, por cristalização e centrifugação toda a sacarose técnica e economicamente possível.

Mosto – Substrato de carboidratos (caldo misto ou tratado) e nutrientes, pronto para a inoculação de leveduras, para a sua fermentação.

POL – Porcentagem de sacarose aparente contida no caldo de cana.

Pousio – Descanso temporário dado a uma terra cultivada.

Rouging – Consiste na eliminação de plantas com sintomas de doenças e plantas com mistura varietal, além do controle de pragas.

Vinho – Mosto fermentado

Xarope – Caldo de cana concentrado a partir do caldo misto e contendo, aproximadamente, 65% de açúcares. É obtido após a evaporação do caldo clarificado.

ANEXO A – Principais herbicidas registrados para uso na cultura da cana-de-açúcar no Brasil

Herbicida	Época de aplicação	Marca comercial
2,4-D	Pós e pré-emergência	DMA BR e outras
Ametrina	Pós e pré-emergência	Gesapax e outras
Atrazina	Pós e pré-emergência	Gesaprim e outras
Diuron	Pós e pré-emergência	Karmex e outras
Simazina	Pré-emergência	Gesatop e outras
Cyanazina	Pós e pré-emergência	Bladex
Metribuzin	Pós e pré-emergência	Sencor
Tebuthiuron	Pré-emergência	Combine
Atrazina + Zimazina	Pré-emergência	Triamex
Ametrina + Diuron	Pós e pré-emergência	Ametron
Hexazinone + Diuron	Pós e pré-emergência	Valpar K e Advance
Trifluralina	Pré-emergência	Treflan e outras
Pendimethalin	Pré-emergência	Herbadox
Alachlor	Pré-emergência	Laço e outras
Halosulfuron	Pré-emergência	Sempre
Imazapyr	Pré-emergência	Contain
Imazapic	Pré-emergência	Plateau
Isoxafrutole	Pré-emergência	Provence
Clomazone	Pré-emergência	Gamit
Sulfentrazone	Pré-emergência	Boral
Oxyfluorfen	Pré-emergência	Goal
MSMA	Pré-emergência	Daconate e outras
MSMA + Diuron	Pré-emergência	Fortex
Flazasulfuron	Pós e pré-emergência	Katana

ANEXO B – Principais doenças da cana-de-açúcar e suas formas de controle

Doença	Agente causal	Sintoma	Transmissão	Controle
Mosaico	Vírus	Aparência mosaicada das folhas, principalmente nas mais novas, com diferentes graus e proporções de manchas verde-normal e verde-pálido. As touceiras afetadas têm o seu desenvolvimento retardado em relação às plantas saudáveis, os entrenós ficam curtos, os colmos ficam finos, ocorrendo um superperfilhamento da touceira.	Toletes e pulgões	Por meio de variedades resistentes ou tolerantes; <i>rouging</i> (erradicação de touceiras infectadas nos viveiros e em áreas de plantio comercial) realizado no período de dois a seis meses pós-plantio, numa frequência de 30 dias.
Carvão	Fungo	Aparecimento de um apêndice semelhante a um chicote, produzido no ápice dos colmos, que libera um pó preto, que constitui os esporos do fungo. Os colmos afetados são mais finos que os normais. Ocorre a emissão de um grande número de rebentos, os colmos crescem pouco e não têm valor industrial.	Toletes e ventos, chuvas, equipamentos, homens. Um único chicote é capaz de liberar milhões de esporos, que podem infectar plantas saudáveis, e aqueles que caem no solo atuam como inóculos para novos plantios ou soqueiras	Variedades resistentes ou tolerantes e <i>rouging</i> , realizado como mencionado para controle do mosaico, mas com o cuidado adicional de colocar um saco plástico sobre o chicote, fazendo-se um amarrão, para evitar que os esporos do fungo espalhem-se, quando for feito o arranquio das touceiras infectadas.
Raquitismo da soqueira	Bactéria	Externamente, não existem sintomas visíveis. Internamente, nos colmos infectados, ocorrem feixes vasculares de cor laranja a vermelha, próximos aos nós, causando obstruções dos vasos do xilema, com menor translocação de seiva bruta para a parte aérea, o que provoca um menor desenvolvimento das touceiras.	Toletes e podões	Tratamento térmico, 50.5°C/2 horas ou 52°C/30 minutos (tolete, minitolete ou gema); desinfecção de podões com solução de creolina, lisol ou formol a 10% ou flambagem (fogo) dos podões.
Podridão vermelha	Fungo	Externamente, na nervura principal das folhas, há formação de manchas alongadas de cor vermelho-intensa. Internamente, associado ao ataque da broca, encontram-se colmos avermelhados, manchados com ilhas	Toletes, ventos e chuvas	Variedades resistentes ou tolerantes; tratamento térmico (como mencionado para controle do raquitismo) e controle da broca. Como a broca é o principal facilitador da penetração do fungo no colmo, desenvolvendo a podridão interna, medidas

		brancas (<i>Colletotrichum</i>). ou totalmente avermelhados (<i>Fusarium</i>)		para seu controle também são importantes no controle da podridão-vermelha.
Ferrugem	Fungo	Formação de pústula de cor marrom e halo amarelo, principalmente na parte inferior da folha. As pústulas se rompem e liberam esporos de cor ferruginosa. A cor do canavial, de longe, fica amarronzada em variedades suscetíveis. A ferrugem atinge principalmente canaviais mais novos. Com o desenvolvimento da cana-de-açúcar, os sintomas diminuem, chegando mesmo a desaparecerem.	Ventos e chuvas	Variedades resistentes ou tolerantes
Escaldadura das folhas	Bactéria	Brotação lateral dos colmos. Cortando-se os colmos longitudinalmente, observam-se vasos avermelhados na região nodal. As folhas apresentam-se enroladas e engruvinhadas no cartucho, total ou parcialmente secas.	Toletes e podões	Variedades resistentes; <i>rouging</i> e desinfecção de podões, como descrito para o controle do raquitismo-da-soqueira.

ANEXO C – Principais pragas da cana-de-açúcar e suas formas de controle

Praga	Espécie e Descrição	Tipo de dano	Necessidade de controle	Controle
Broca-comum	A espécie de broca que predomina nos canaviais do Brasil é a <i>Diatraea Saccharalis</i> . O adulto é uma mariposa de cor amarelo-palha, cuja fêmea faz a postura nas folhas. Após a eclosão dos ovos, as larvas de cor amarelo-palha e cabeça marrom, caminham em direção aos colmos, perfurando-os e abrindo galerias no sentido ascendente. Quando o ataque se dá em cana nova, pode ocorrer morte da gema apical, com seca da última folha, aparecendo o sintoma conhecido como coração morto. Quando a larva vai-se transformar em pupa, abre outro orifício para garantir sua saída. As pupas transformam-se em adultos que, após o acasalamento, vão reiniciar o ciclo. O ciclo evolutivo completa da broca é de, aproximadamente, 70 dias.	Podem ser diretos, proporcionando perda de peso da cana, pelas galerias construídas, morta da gema apical, coração morto, e quebra da cana, pela ação de ventos e menor resistência; ou diretos, pois através dos orifícios abertos nos colmos, ocorre a penetração de fungos, <i>Fusarium</i> ou <i>Colletotrichum</i> , que causam podridão-vermelha e invertem a sacarose armazenada nos colmos.	Nos levantamentos no pátio, devem ser retirados o equivalente a cinco canas por carga, tomadas casualmente nos veículos de transporte, que chegam ao pátio da indústria. Quando feitos nas áreas de campo, amostram-se cinco pontos casualizados de 25 canas, totalizando 125 canas, que representam até 50 ha. Em ambos os métodos, as canas são abertas longitudinalmente, contando-se o total de entrenós e aqueles atacados pelo complexo broca/podridão-vermelha, anotando-se os dados. De posse destes, calcula-se o índice de infestação (I.I.), como nível de dano econômico, a partir do qual medidas de controle devem ser adotadas.	O método de controle mais usado, por ser de grande eficiência, é biológico. Para isso utiliza-se um inimigo natural específico – <i>Cothesia flavipes</i> , que é multiplicado em laboratórios das usinas e liberado nos canaviais, onde parasitam as larvas da broca. A fêmea da <i>C. flavipes</i> caça a larva da broca, inclusive entram pelas galerias construídas nos colmos pela larva. Ao encontrar a broca, a fêmea da <i>C. flavipes</i> introduz o ovipositor, fazendo a postura, e daí eclodem larvas que se alimentarão da parte interna da broca, provocando sua morte.
Cigarrinha-das-raízes	Cigarrinha-das-raízes, <i>Mahanarva fimbriolata</i> – o ataque desta praga vem aumentando nos canaviais colhidos sem a queima prévia, principalmente nas épocas das chuvas. Sob a palha e com umidade, o inseto encontra condições ideais para se multiplicar. A primeira geração dá-se, geralmente, de forma discreta e despercebida. A população aumenta na segunda geração, que	Os danos diretos dizem respeito à redução da produtividade do canavial. Os indiretos referem-se à perda de qualidade da cana, com aumento no teor de fibras, de impurezas e de contaminantes no caldo e redução nos teores de açúcar.	Deve ser feita uma amostragem no campo, identificando-se a presença de espumas brancas junto ao pé da cana, no nível do solo. Há indicações de que o nível de controle está próximo de três a cinco ninfas (espumas), por metro linear de cana, ou seja, valores superiores a este justificam a	Pode-se usar o controle biológico, com emprego do fungo <i>Metarhizium anisopliae</i> . Entretanto, produtos comerciais disponíveis no mercado têm apresentado baixa eficiência de controle em nível de campo. O controle químico tem-se mostrado, até o momento, a alternativa mais

	<p>ocorre no Centro-Sul do Brasil, nos meses de novembro a fevereiro (época de maior precipitação). Em geral, são observadas de três a quatro gerações por ano. As formas jovens de cigarrinha-das-raízes, conhecidas por ninfas, atacam as raízes superficiais da cana, liberando uma espuma branca, semelhante à de sabão, que se acumula no pé da cana, no nível do solo. As ninfas, ao sugarem as raízes, ocasionam distúrbios fisiológicos na planta, impedindo ou dificultando o fluxo de água e de nutrientes. Há morte de raízes, chochamento e afinamento dos colmos e seca das folhas.</p>		<p>adoção de medidas de controle.</p>	<p>eficiente, destacando-se o produto comercial Actara, na dose de 800 g/ha, com pulverizações dirigidas à parte basal da cana, no nível do solo. O afastamento da palha do pé da cana, quanto possível, tem aumentado a ação do produto.</p>
<p>Cupim subterrâneo</p>	<p>As principais espécies de cupins subterrâneos são <i>Heterotermes tenuis</i> e <i>Heterotermes longiceps</i>. Atacam toletes plantados, raízes, rizomas e até mesmo parte aérea de canas adultas.</p>	<p>Na cultura da cana-de-açúcar, os danos são reconhecidos por falhas na brotação por ocasião do plantio, morte de touceiras que não rebrotam mais, pois os cupins atacam raízes e rizomas, parte subterrânea, provocando a morte de touceiras. Os prejuízos médios são na ordem de 10 t/ha/ano.</p>		<p>A principal medida de controle dos cupins subterrâneos, em áreas onde ocorrem, tem sido o uso do inseticida Regent, aplicado via pulverização sobre os toletes nos sulcos de cana, por ocasião do plantio, antes do recobrimento com o solo.</p>
<p>Migdolus</p>	<p>A espécie mais comum é o <i>Migdolus fryians</i>. Este inseto é de hábito subterrâneo. Os machos ativos voam, enquanto que as fêmeas possuem asas atrofiadas e, portanto, não voam. Após o acasalamento, as fêmeas entram no solo e colocam os ovos em diferentes profundidades. As larvas, eclodidas dos ovos, alimentam-se das raízes e rizomas das plantas em qualquer idade.</p>	<p>Em consequência do ataque de <i>Migdolus</i> à parte subterrânea da cana, raízes e rizomas, ocorrem falhas na rebrota, morte de colmos, com reduções significativas da produtividade e longevidade do canavial.</p>		<p>É de difícil controle, tendo sido utilizados métodos integrados de controle cultural, armadilhas com feromônios, para captura dos machos durante a revoada, e químico, com aplicação de inseticidas do solo, como Regent, Evidence, Endossulfan ou Thiodan.</p>

Gorgulho-da-cana	É um besouro (coleóptero), identificado como <i>Sphenophorus levis</i> . Tem hábitos subterrâneos e, após o acasalamento, as fêmeas perfuram os rizomas, parte subterrânea dos colmos, inserindo os ovos. Destes eclodem larvas branco-leitosas, castanho-avermelhadas, que escavam galerias no interior dos rizomas. Estas galerias permanecem cheias de serragem fina, característica do ataque da praga.	Em consequência das galerias abertas na base dos colmos, ocorre amarelecimento das folhas, seguido pelo secamento e morte de perfilhos, que podem ser facilmente destacados da touceira. Sob infestações severas, as touceiras morem e são observadas muitas falhas na rebrota, favorecendo altas infestações de plantas daninhas.		Embora seja uma praga importante, há poucos estudos sobre medidas de controle. O controle químico parece o mais viável, com aplicação de inseticidas por ocasião do plantio, tais como: Furadam, Regent, e Evidence.
------------------	---	--	--	--

ANEXO D – Questionário para coleta de dados nas usinas pesquisadas

Questionário – Etapa de agricultura

1. Indique o município onde está localizada sua usina
2. Qual o tamanho da área agrícola (áreas próprias) da usina (em hectares)?
3. Indique a porcentagem da área agrícola destinada a plantio, socaria, pousio e outras atividades (preencha o quadro a seguir)

Atividade	(%)
Plantio	
Socaria	
Pousio	
Outros (especificar)	
Área Total	100 %

4. Normalmente realiza irrigação suplementar com água? Nesse caso, qual é a porcentagem da área irrigada com água?
5. Na irrigação suplementar com água (se realizado), qual é a taxa média de aplicação (em m³/ha)?
6. Na irrigação suplementar com água (se realizado), qual é o método utilizado, sua frequência de uso (%) e a vazão do equipamento utilizado? (Preencha o quadro a seguir)

Método de irrigação	(%)	Vazão (m ³ /hora)
Autopropelido (hidro-roll)		
Pivô central		
Distribuição por sulcos		
Gotejamento		
Outros (especificar)		
Total	100%	

7. Na irrigação suplementar com água (se realizado), os equipamentos utilizados são elétricos ou usam óleo diesel? (marque com “x” as opções no quadro a seguir)

Método de irrigação	Usa energia elétrica própria	Usa energia elétrica da CEMIG	Usa óleo diesel
Autopropelido (hidro-roll)			
Pivô central			
Distribuição por sulcos			
Gotejamento			
Outros (especificar)			

8. Normalmente realiza aplicação de vinhaça (fertirrigação)? Nesse caso, qual é a porcentagem da área fertirrigada?
9. Na aplicação de vinhaça, qual é a taxa de aplicação (em m³/ha)?
10. Na aplicação de vinhaça, qual é o método utilizado, sua frequência de uso (%), a capacidade e distância percorrida pelos caminhões utilizados? (Preencha o quadro a seguir)

Método de fertirrigação	Frequência de uso (%)	Capacidade do caminhão-tanque(m ³)	Distância percorrida pelo caminhão-tanque
Aplicação direta com caminhões tanque			
Caminhões tanque + conjuntos motobomba			
Canais de irrigação + conjuntos motobomba		-	-
Outros (especificar)			
Total	100%		

11. Qual é a produtividade média alcançada (ton cana/ha) e o número de cortes normalmente realizado na sua área agrícola, em áreas com irrigação e sem irrigação? (preencha o quadro)

	Produtividade média (ton cana/ha)	n° de cortes
Áreas sem irrigação		
Áreas com irrigação suplementar com água		
Áreas com aplicação de vinhaça		

12. A irrigação e aplicação de vinhaça é realizada durante o plantio e durante cada corte da cana-soca?
13. Na sua ÁREA DE PLANTIO, que porcentagem corresponde à cana de ano e meio, e que porcentagem corresponde à cana de ano? (preencha o quadro)

	Área de plantio (%)
Cana de ano e meio	
Cana de ano	
Total	100%

14. Indique, marcando com “x”, qual o tipo de adubo N mais usado na sua área agrícola.

Nutriente	Característica do Fertilizante	Marque com “x”
N	O mais usado é a base de nitrato de amônio – NH ₄ NO ₃	
	O mais usado é a base de sulfato de amônio – (NH ₄) ₂ SO ₄	
	O mais usado é a base de uréia – (NH ₂) ₂ CO	
	Os mais usados são a base de fosfatos de amônia (MAP e DAP)	
	O mais usado é a base de água amônia – NH ₄ OH	

15. Indique as quantidades de fertilizante N, P e K normalmente utilizadas no plantio de cana de (excluindo a adubação realizada na operação de “quebra lombo”) (SE POSSUI FLUXOGRAMA DE ADUBAÇÃO, FAVOR ANEXAR).

Fertilizante	Cana de ANO e MEIO		Cana de ANO	
	Área de VINHAÇA Quantidade (kg/ha)	Área SEM VINHAÇA Quantidade (kg/ha)	Área de VINHAÇA Quantidade (kg/ha)	Área SEM VINHAÇA Quantidade (kg/ha)
N				
P (P ₂ O ₅)				
K (K ₂ O)				

16. Indique as quantidades de fertilizante N, P e K normalmente utilizadas na operação de “quebra lombo” (SE POSSUI FLUXOGRAMA DE ADUBAÇÃO, FAVOR ANEXAR).

Fertilizante	Cana de ANO e MEIO		Cana de ANO	
	Área de VINHAÇA Quantidade (kg/ha)	Área SEM VINHAÇA Quantidade (kg/ha)	Área de VINHAÇA Quantidade (kg/ha)	Área SEM VINHAÇA Quantidade (kg/ha)
N				
P (P ₂ O ₅)				
K (K ₂ O)				

17. Indique as quantidades de fertilizante N, P e K normalmente utilizadas em soqueira (SE POSSUI FLUXOGRAMA DE ADUBAÇÃO, FAVOR ANEXAR).

Fertilizante	Área de VINHAÇA		Área SEM VINHAÇA	
	Cana QUEIMADA Quantidade (kg/ha)	Cana CRUA Quantidade (kg/ha)	Cana QUEIMADA Quantidade (kg/ha)	Cana CRUA Quantidade (kg/ha)
N				
P (P ₂ O ₅)				
K (K ₂ O)				

18. Normalmente realiza aplicação de torta de filtro? Nesse caso, qual é a porcentagem da área aplicada com torta de filtro?
19. No caso da aplicação de torta de filtro, qual é a taxa de aplicação em ton/ha?
20. No caso da aplicação de torta de filtro, qual é a distância (km) entre a usina e a área de aplicação na lavoura?
21. Para a produção de mudas, normalmente é utilizada cana de ano ou cana de ano e meio?
22. Para a colheita de mudas, é realizada queima no canavial?
23. O corte de mudas é feito manualmente ou mecanicamente?
24. Realiza irrigação em área de mudas?
25. Qual é a distância média de transporte das mudas até a área de plantio?
26. Quais são as quantidades de calcário e gesso normalmente utilizadas em áreas de reforma do canavial? (preencha o quadro a seguir)

Corretivo	Quantidade (ton/ha)
Calcário	
Gesso	

27. Aplica calcário e gesso em 100% da área de reforma do canavial? Se não, qual a porcentagem de área aplicada (na área de reforma)? (preencha o quadro)

Corretivo	% de área aplicada
Calcário	
Gesso	

28. Normalmente utiliza gesso e calcário em socaria?
29. No caso de utilização de calcário em socaria, quais são as quantidades utilizadas? (preencha o quadro a seguir)

Corretivo	Quantidade (ton/ha)
Calcário	
Gesso	

30. Caso aplique gesso e calcário em socaria, aplica em 100% da área de aplicação? Se não, qual a porcentagem de área aplicada (na área de socaria)? (preencha o quadro)

Corretivo	% de área aplicada
Calcário	
Gesso	

31. Caso aplique gesso e calcário em socaria, essa aplicação é realizada após todos os cortes da soca? Senão, em quais cortes é realizada a aplicação?
32. O calcário normalmente utilizado é do tipo dolomítico ou calcítico?
33. Observe o seguinte quadro, as operações descritas, os equipamentos e porcentagens de áreas trabalhadas ocorrem normalmente na sua área agrícola para a cana de ano e meio? Caso haja diferenças, favor corrigir tal quadro (por favor aumente ou exclua operações e modifique a % de área trabalhada).

Operações agrícolas	Equipamento	Área trabalhada
Plantio		
Aplicação de calcário	Caminhão distribuidor de calcário	100%
Eliminação mecânica das soqueiras	Eliminador mecânico de soqueira	30%
Eliminação química das soqueiras	Aplicador de herbicida	70%
Gradagem Pesada I	Grade 18 discos ×32"	30%
Subsolagem	Subsolador	100%
Gradagem Pesada II	Grade 20 discos ×26"	70%
Gradagem Pesada III	Grade 20 discos ×26"	30%
Gradagem de acabamento	Grade 40 discos ×20"	90%
Sulcação e adubação	Sulcador-adubador duplo	100%
Distribuição de mudas	Carreta para plantio	100%
Fechamento do sulco e aplicação de inseticida	Cobridor de mudas com discos	100%
Aplicação de herbicida	Aplicador de herbicida	100%
Cultivo mecânico (quebra do meio)	Cultivador para quebra do meio	70%
Tratos culturais cana-soca		
Aleiramento de palha	Aleirador de palha	25%
Cultivo tríplice operação	Cultivador tríplice	100%
Aplicação de herbicida	Aplicador de herbicida	85%

34. Para o plantio da cana de ano, o único que muda nas operações descritas acima é que a eliminação mecânica das soqueiras é 100%? Senão, que operações são diferentes para o plantio de cana de ano?
35. Quando é realizada eliminação química das soqueiras, qual é o produto normalmente utilizado e qual é sua dosagem em kg/ha?
36. Na área de torta de filtro normalmente é realizada a operação de cultivo tríplice operação? Caso negativo, como é feita a adubação nesse caso?
37. A adubação com torta de filtro é normalmente realizada para cana de ano e meio ou cana de ano?
38. Normalmente faz 100% de aleiramento de palha após a colheita? O que é feito com a palha aleirada?
39. Do total de defensivos agrícolas utilizados (inseticidas e herbicidas) que porcentagem é destinada para a eliminação química da soqueira, para combate a pragas e doenças e para combate a ervas daninhas? (preencha o quadro a seguir)

Destino dos defensivos agrícolas	%
Eliminação química da soqueira	
Combate pragas e doenças	
Combate ervas daninhas	
TOTAL	100%

40. Realiza plantio mecânico? Nesse caso, qual a porcentagem da ÁREA DE PLANTIO dedicada a essa atividade?

41. Caso realize plantio mecânico, qual o tipo de equipamento (plantadora mecânica) utilizado? Neste caso, indique se a plantadora é do tipo PCI (plantadora de cana inteira) ou PCP (plantadora de cana picada) ou outro tipo de equipamento.
42. Caso realize plantio mecânico, esta prática é feita normalmente para cana de ano e meio ou para cana de ano?
43. Realiza cultivo mínimo? Nesse caso, qual a porcentagem da **ÁREA DE PLANTIO** dedicada a essa atividade?
44. No caso de cultivo mínimo, as operações agrícolas e áreas trabalhadas normalmente utilizadas são as que constam na tabela? Caso haja diferenças, favor corrigir tal quadro (por favor aumente ou exclua operações e modifique a % de área trabalhada)

Operações agrícolas	Equipamento	Área trabalhada
Plantio		
Aplicação de calcário	Caminhão distribuidor de calcário	100%
Eliminação química das soqueiras	Aplicador de herbicida	100%
Subsolagem	Subsolador	70%
Sulcação e adubação	Sulcador-adubador duplo	100%
Distribuição de mudas	Carreta para plantio	100%
Fechamento do sulco e aplicação de inseticida	Cobridor de mudas com discos	100%
Aplicação de herbicida	Aplicador de herbicida	100%
Cultivo mecânico (quebra do meio)	Cultivador para quebra do meio	70%
Tratos culturais cana-soca		
Aleiramento de palha	Aleirador de palha	25%
Cultivo triplice operação	Cultivador triplice	100%
Aplicação de herbicida	Aplicador de herbicida	85%

45. Realiza plantio direto? Qual é a porcentagem da **ÁREA DE PLANTIO** dedicada a essa atividade?
46. Caso realize plantio direto, quais são as diferenças com o cultivo mínimo?
47. Normalmente realiza manutenção da área antes do plantio? Nesse caso, as operações, equipamentos e áreas trabalhadas a seguir estão corretas? Caso contrário, favor corrigir os dados da tabela. Caso haja diferenças, favor corrigir tal quadro (por favor aumente ou exclua operações e modifique a % de área trabalhada)

Operações de manutenção	Equipamento	Fração da área trabalhada
Confecção de carregadores	Motoniveladora	100%
Confecção de terraços	Motoniveladora	90%
Confecção de micro-bacias	Pá carregadeira	20%
Outros (especificar)		

48. Qual é a distância média de transporte entre os fornecedores de insumos (calcário, fertilizantes e defensivos agrícolas) e o galpão de estocagem desses insumos na lavoura? Assim mesmo, qual é a distância média entre o galpão de insumos e a área de aplicação dos mesmos? (preencher o quadro).

Insumo	Distância (km) entre o fornecedor e o galpão de estocagem na lavoura	Distância (km) entre o galpão de estocagem e a área de aplicação
Gesso		
Calcário		
Fertilizantes		
Defensivos agrícolas		

49. Que tipo de veículo utiliza para o transporte de cana até a usina e qual é a distância média de transporte? (preencha o quadro)

Veículo/carga máxima	Distância (km) entre a área de corte e a usina	Frequência de uso do veículo (%)
Truck (15t)		
Romeu e Julieta (28t)		
Treminhão (45t)		
Treminhão (58t)		
Outros (especificar)		
TOTAL		100%

50. Dos veículos citados acima, quais deles são empregados com transbordo?
51. Qual é o período normal de pousio?
52. Realiza pousio em 100% dos casos depois de terminado o ciclo das soqueiras? Senão, qual é a porcentagem de vezes em que é realizado o pousio, depois de terminado o ciclo das soqueiras?
53. Que porcentagem da COLHEITA é realizada com cana queimada e cana crua? (preencha o quadro)

Colheita	%
Cana queimada	
Cana crua	
Total	100 %

54. Que porcentagem da COLHEITA é realizada manualmente e mecanicamente? (preencha o quadro)

Colheita	%
Manual	
Mecânica	
Total	100 %

55. Qual é a eficiência de queima no canavial?

Questionário – Etapa industrial

- Qual é a quantidade total de cana moída anualmente na usina? (pode colocar um valor médio)
- A usina produz somente álcool ou produz também açúcar?
- Caso produza açúcar e álcool, que porcentagem da cana é destinada à produção de álcool e que porcentagem é destinada para a produção de açúcar? (preencha o quadro)

Produto	% de cana
Álcool	
Açúcar	
Total	100 %

- Do total de álcool produzido, que porcentagem corresponde a álcool hidratado e anidro? (preencha o quadro)

Produto	%
Álcool hidratado	
Álcool anidro	
Total	100 %

5. Na etapa industrial, quais são os subprodutos (além do bagaço, vinhaça, torta de filtro, cinzas das caldeiras, sedimentos e lodos) gerados e qual seu destino? (preencha o quadro)

Subproduto	Quantidade (L/TC; kg/TC; outros, especifique)	Destino
Óleo fúsel		
Leveduras		
Melaço		
Outros (especifique)		

6. Utiliza 100% de energia do bagaço para a fábrica? Em que casos utiliza outros tipos de energia? (CEMIG, diesel, gasolina, álcool?)
7. No caso de utilização de energia elétrica da CEMIG, qual é a quantidade (em MWh) média anual consumida?
8. Qual é a quantidade (%) de bagaço excedente?
9. Qual é o destino dado a esse bagaço excedente? (preencha o quadro)

Destino bagaço excedente	(%)
Estoque de reserva	
Geração de energia elétrica para a agricultura	
Venda	
Cogeração para venda de energia elétrica	
Doação	
Outros (especificar)	
Total	100%

10. Usa gasolina na agricultura ou indústria? Para que operações? Em que quantidades?
11. Normalmente qual é a distância entre os fornecedores de produtos químicos e a indústria?
12. Em que tipo de veículos são trazidos os insumos (Ex. Caminhões de 12 ton)?
13. Utiliza difusores? Nesse caso, a energia também provém do bagaço?
14. Qual é a relação de produtos químicos e quantidades utilizadas na usina? (favor anexar a planilha de consumo de produtos químicos, indicando as quantidades utilizadas para o total de cana moída na safra; favor indicar a quantidade de cana moída e as unidades dos produtos químicos (Ex. kg; litros)

ANEXO E – Dados de transporte de cinzas e sedimentos e emissões de GEE

Operação	Veículo	Consumo (km/L) ⁽¹⁾	Distância média entre a usina e a lavoura (km)	Carga transportada (kg/ha)							
				Usina 1	Usina 2	Usina 3	Usina 5	Usina 6	Usina 7	Usina 8	Usina 9
Transporte de cinzas	Caminhão basculante	2,5	20,75	1170,72	183,74	65,17	1159,57	2084,22	65,83	811,38	Não
Transporte de sedimentos				2508,67	1917,28	3305,99	524,60	2210,15	1716,02	1545,49	informado
Carga total				3679,39	2101,02	3371,16	1684,18	4294,37	1781,86	2356,87	-
	Emissões de GEE (kg CO₂eq/ha)			22,98	13,12	21,06	10,52	26,82	11,13	14,72	-

(1) MACEDO *et al.* (2004)

ANEXO F – Emissões de GEE (kg CO₂eq/ha) nas etapas produtivas e atividades agrícolas e industriais para a produção de etanol

	Manutenção da área	Produção de mudas	Aplicação de corretivos	Preparo do solo e plantio	Tratos culturais em soqueira	Adubação no plantio	Adubação em soqueira	Defensivos agrícolas	Queima do canavial	Colheita	Transporte de cana	Produção de álcool
	Operações de Manutenção	Produção de mudas	Aplicação de calcário e gesso	Cultivo convencional	Operações em soqueira	Cana de ano e meio, área de vinhaça	Área de vinhaça, cana queimada	Aplicação de defensivos ⁽²⁾	Queima do canavial	Colheita manual	Transporte de cana ⁽³⁾	Consumo de produtos químicos
Usina 10	54,44	342,90	3144,48	241,89	25,76	1266,08	1551,71	30,37	947,91	34,84	229,61	59,46
Usina 11	56,32	241,46	1168,28	345,49	26,13	1237,25	1238,26	30,37	1099,53	41,81	229,61	59,46
Usina 12	75,51	227,88	1541,02	214,61	26,13	1327,83	1349,61	30,37	1263,88	46,46	229,61	59,46
Usina 13	81,15	186,12	1479,87	302,09	25,39	1099,75	1379,86 ⁽¹⁾	30,37	1103,77 ⁽¹⁾	41,04 ⁽¹⁾	229,61	59,46
				Cultivo Mecanizado ⁽¹⁾		Cana de ano, área de vinhaça	Área de vinhaça, cana crua		Sem queima	Colheita mecânica		
Usina 10				300,40		1266,08	1763,28		378,49	260,72		
Usina 11				300,40		1237,25	1520,58		454,19	312,87		
Usina 12				300,40		1327,83	1620,32		504,65	347,63		
Usina 13				300,40		1099,75	1538,04		474,37	326,77		
				Cultivo mínimo		Cana de ano e meio, área sem vinhaça	Área sem vinhaça, cana queimada					
Usina 10				202,05		1070,89	1028,65					
Usina 11				203,42 ⁽¹⁾		1604,77	1101,08					
Usina 12				203,42 ⁽¹⁾		1108,88	1050,10					
Usina 13				204,80		656,74	1059,94					
						Cana de ano, área sem vinhaça	Área sem vinhaça, cana crua					
Usina 10						1459,46	1209,70					
Usina 11						1604,77	1348,53					
Usina 12						1108,88	1050,10					
Usina 13						656,74	1080,85					
						Adubação com torta de filtro	Adubação com torta de filtro					
Usina 10						790,70	396,10 ⁽¹⁾					
Usina 11						304,20	304,20					
Usina 12						462,64	396,10 ⁽¹⁾					
Usina 13						519,18 ⁽¹⁾	488,00					

(1) Valores médios calculados com base nos dados disponíveis, para usinas nas quais a atividade agrícola/industrial não é praticada; (2) Média calculada com base em dados da estimativa inicial de GEE; (3) Média ponderada das práticas de transporte observadas durante a pesquisa de campo

ANEXO G – Cenários tecnológicos para produção de etanol e suas emissões de GEE

Legenda:

Etapas produtivas Atividades agrícolas/ industriais	Manutenção da área	Produção de mudas	Aplicação de corretivos	Preparo do solo e plantio	Tratos culturais em soqueira	Adubação no plantio	Adubação em soqueira	Defensivos agrícolas	Queima do canavial	Colheita	Transporte de cana	Produção de álcool	Período de base
	1	Operações de manutenção	Produção de mudas	Aplicação de calcário e gesso	Cultivo convencional	Operações em soqueira	Cana de ano e meio, área de vinhaça	Área de vinhaça, cana queimada	Aplicação de defensivos	Queima do canavial	Colheita Manual	Transporte de cana	Consumo de produtos químicos
2				Cultivo mecanizado		Cana de ano, área de vinhaça	Área de vinhaça, cana crua		Sem queima	Colheita mecânica			b2 = 7,5 anos
3				Cultivo mínimo		Cana de ano e meio, área sem vinhaça	Área sem vinhaça, cana queimada						b3 = 5,63 anos
4						Cana de ano, área sem vinhaça	Área sem vinhaça, cana crua						b4 = 7 anos
5						Adubação com torta de filtro	Adubação com torta de filtro						b5 = 6,52 anos
6													b6 = 7,89 anos
7													b7 = 6,02 anos
8													b8 = 7,39 anos

Nota: Cada cenário tecnológico está composto por atividades agrícolas e industriais que fazem parte das etapas produtivas que compõem o processo de produção de etanol. Por exemplo, o cenário tecnológico 1112133122111 corresponde a: operações de manutenção (1), produção de mudas (1), aplicação de calcário e gesso (1), cultivo mecanizado (2), operações em soqueira (1), adubação de cana de ano e meio em área sem vinhaça no plantio (3), adubação de cana queimada em área de soqueira se vinhaça (3), aplicação de defensivos agrícolas (1), sem queima do canavial antes da colheita (2), colheita mecânica (2), transporte de cana (1), consumo de produtos químicos (1) e período de base de 6,13 anos, o qual considera área agrícola sem pousio, com realização de 5,63 cortes de cana (1)

Cenários tecnológicos para produção de etanol e suas emissões de GEE (kg CO₂eq/ha·ano)

n°	Cenário	Emissões de GEE (kg CO ₂ eq/ha·ano)					
		Usina 10	Usina 11	Usina 12	Usina 13	Média	Variância
1	1111111111112	3199,45	2831,70	3137,89	2979,11	3037,04	27356,09
2	1111111111116	3041,30	2691,73	2982,79	2831,85	2886,92	24718,53
3	1111112122112	3048,06	2708,22	2926,94	2784,90	2867,03	22775,71
4	1111112122116	2897,40	2574,36	2782,26	2647,24	2725,31	20579,77
5	1111113111111	2863,68	2739,32	2924,38	2743,83	2817,80	8364,93
6	1111113111115	2692,38	2575,46	2749,46	2579,71	2649,25	7394,14
7	1111114122111	2684,91	2582,45	2503,68	2443,99	2553,76	10860,53
8	1111114122115	2524,31	2427,98	2353,92	2297,80	2401,00	9600,12
9	1111115111111	2385,91	2137,43	2430,41	2311,84	2316,40	16627,55
10	1111115111115	2243,20	2009,58	2285,04	2173,56	2177,84	14697,86
11	1111115122111	2070,40	1793,67	2009,72	1996,21	1967,50	14469,88
12	1111115122115	1946,55	1686,38	1889,50	1876,80	1849,81	12790,60
13	1111121111114	3427,98	3033,97	3362,03	3191,90	3253,97	31403,68
14	1111121111118	3247,07	2873,85	3184,60	3023,45	3082,24	28176,55
15	1111122122114	3265,78	2901,67	3136,01	2983,82	3071,82	26145,59
16	1111122122118	3093,43	2748,54	2970,51	2826,35	2909,71	23458,79
17	1111123111113	3118,00	2982,60	3184,09	2987,51	3068,05	9916,68
18	1111123111117	2916,00	2789,37	2977,82	2793,97	2869,29	8673,41
19	1111124122113	2923,36	2811,80	2726,04	2661,04	2780,56	12875,24
20	1111124122117	2733,97	2629,64	2549,43	2488,64	2600,42	11261,05
21	1111125111113	2597,81	2327,25	2646,26	2517,16	2522,12	19712,08
22	1111125111117	2429,51	2176,48	2474,82	2354,09	2358,73	17240,75
23	1111125122113	2254,27	1952,97	2188,20	2173,49	2142,23	17154,15
24	1111125122117	2108,23	1826,45	2046,44	2032,68	2003,45	15003,51
25	1111131111112	3173,42	2880,70	3108,70	2920,04	3020,72	20266,59
26	1111131111116	3016,56	2738,31	2955,04	2775,70	2871,40	18312,56
27	1111132122112	3022,04	2757,23	2897,75	2725,83	2850,71	18633,21
28	1111132122116	2872,66	2620,94	2754,51	2591,09	2709,80	16836,67
29	1111133111111	2831,84	2799,27	2888,66	2671,56	2797,83	8450,66
30	1111133111115	2662,45	2631,83	2715,88	2511,76	2630,48	7469,93

n°	Cenário	Emissões de GEE (kg CO ₂ eq/ha·ano)					
		Usina 10	Usina 11	Usina 12	Usina 13	Média	Variância
31	1111134122111	2653,07	2642,41	2467,97	2371,72	2533,79	18875,14
32	1111134122115	2917,42	2550,16	2758,85	2622,46	2712,22	26200,11
33	1111135111111	2354,07	2197,38	2394,70	2239,57	2296,43	8673,84
34	1111135111115	2213,26	2065,94	2251,45	2105,61	2159,07	7667,21
35	1111135122111	2038,55	1853,63	1974,00	1923,94	1947,53	6119,98
36	1111135122115	1916,61	1742,75	1855,92	1808,86	1831,04	5409,73
37	1111141111114	3455,61	3086,47	3330,75	3128,61	3250,36	30090,48
38	1111141111118	3273,24	2923,58	3154,97	2963,51	3078,83	26998,29
39	1111142122114	3293,41	2954,17	3104,73	2920,53	3068,21	28953,73
40	1111142122118	3119,60	2798,27	2940,88	2766,40	2906,29	25978,36
41	1111143111113	3152,35	3047,87	3145,21	2908,83	3063,56	12912,68
42	1111143111117	2948,13	2850,42	2941,45	2720,38	2865,09	11293,80
43	1111144122113	2957,70	2877,08	2687,15	2582,35	2776,07	29543,16
44	1111144122117	2766,09	2690,69	2513,06	2415,05	2596,22	25839,30
45	1111145111113	2632,16	2392,53	2607,37	2438,47	2517,63	14361,52
46	1111145111117	2461,63	2237,53	2438,45	2280,50	2354,53	12561,00
47	1111145122113	2288,61	2018,25	2149,31	2094,80	2137,74	13006,31
48	1111145122117	2140,35	1887,50	2010,07	1959,09	1999,25	11375,69
49	1111151111112	3136,06	2707,29	3022,53	2901,70	2941,90	33619,21
50	1111151111116	2981,05	2573,47	2873,13	2758,27	2796,48	30377,78
51	1111152122112	2984,68	2583,82	2811,58	2707,49	2771,89	28790,97
52	1111152122116	2837,15	2456,10	2672,61	2573,66	2634,88	26015,06
53	1111153111111	2831,84	2799,27	2888,66	2671,56	2797,83	8450,66
54	1111153111115	2662,45	2631,83	2715,88	2511,76	2630,48	7469,93
55	1111154122111	2653,07	2642,41	2467,97	2371,72	2533,79	18875,14
56	1111154122115	2917,42	2550,16	2758,85	2622,46	2712,22	26200,11
57	1111155111111	2308,36	1985,22	2289,27	2217,13	2200,00	22045,68
58	1111155111115	2170,29	1866,47	2152,34	2084,51	2068,40	19487,19
59	1111155122111	1992,84	1641,46	1868,58	1901,50	1851,10	22294,93
60	1111155122115	1873,64	1543,28	1756,81	1787,76	1740,37	19707,51

nº	Cenário	Emissões de GEE (kg CO ₂ eq/ha·ano)					
		Usina 10	Usina 11	Usina 12	Usina 13	Média	Variância
61	1112111111112	3207,25	2825,69	3149,33	2978,88	3040,29	29863,38
62	1112111111116	3048,72	2686,02	2993,66	2831,64	2890,01	26984,07
63	1112112122112	3055,86	2702,21	2938,38	2784,67	2870,28	24884,75
64	1112112122116	2904,81	2568,64	2793,14	2647,03	2728,40	22485,46
65	1112113111111	2873,22	2731,96	2938,38	2743,56	2821,78	10142,26
66	1112113111115	2701,36	2568,55	2762,61	2579,45	2652,99	8965,21
67	1112114122111	2694,45	2575,10	2517,68	2443,71	2557,74	11199,96
68	1112114122115	2533,28	2421,07	2367,08	2297,54	2404,74	9900,16
69	1112115111111	2395,46	2130,07	2444,41	2311,57	2320,38	19104,65
70	1112115111115	2252,17	2002,66	2298,19	2173,30	2181,58	16887,48
71	1112115122111	2079,94	1786,32	2023,71	1995,93	1971,48	16458,23
72	1112115122115	1955,53	1679,47	1902,66	1876,54	1853,55	14548,19
73	1112121111114	3436,34	3027,52	3374,28	3191,66	3257,45	34281,94
74	1112121111118	3254,99	2867,75	3196,21	3023,22	3085,54	30759,02
75	1112122122114	3274,14	2895,23	3148,26	2983,58	3075,30	28566,68
76	1112122122118	3101,35	2742,44	2982,12	2826,12	2913,01	25631,08
77	1112123111113	3128,39	2974,59	3199,33	2987,21	3072,38	12023,72
78	1112123111117	2925,72	2781,88	2992,07	2793,69	2873,34	10516,29
79	1112124122113	2933,75	2803,79	2741,27	2660,74	2784,89	13277,64
80	1112124122117	2743,69	2622,15	2563,68	2488,36	2604,47	11613,00
81	1112125111113	2608,20	2319,25	2661,50	2516,86	2526,45	22648,70
82	1112125111117	2439,23	2169,00	2489,07	2353,81	2362,78	19809,21
83	1112125122113	2264,66	1944,96	2203,44	2173,19	2146,56	19511,35
84	1112125122117	2117,95	1818,96	2060,69	2032,40	2007,50	17065,19
85	1112131111112	3181,23	2874,69	3120,14	2919,82	3023,97	22369,85
86	1112131111116	3023,98	2732,60	2965,91	2775,49	2874,49	20213,04
87	1112132122112	3029,84	2751,22	2909,19	2725,60	2853,96	20338,23
88	1112132122116	2880,07	2615,22	2765,39	2590,88	2712,89	18377,30
89	1112133111111	2841,38	2791,92	2902,66	2671,29	2801,81	9623,21
90	1112133111115	2671,42	2624,91	2729,03	2511,50	2634,22	8506,40

nº	Cenário	Emissões de GEE (kg CO ₂ eq/ha·ano)					
		Usina 10	Usina 11	Usina 12	Usina 13	Média	Variância
91	1112134122111	2662,61	2635,05	2481,96	2371,44	2537,77	18609,79
92	1112134122115	2926,39	2543,24	2772,01	2622,20	2715,96	28681,25
93	1112135111111	2363,62	2190,03	2408,69	2239,30	2300,41	10546,16
94	1112135111115	2222,24	2059,03	2264,61	2105,35	2162,81	9322,24
95	1112135122111	2048,10	1846,27	1987,99	1923,66	1951,51	7503,54
96	1112135122115	1925,59	1735,84	1869,08	1808,60	1834,78	6632,72
97	1112141111114	3463,97	3080,03	3343,01	3128,37	3253,84	32685,37
98	1112141111118	3281,16	2917,48	3166,58	2963,28	3082,12	29326,53
99	1112142122114	3301,77	2947,73	3116,98	2920,29	3071,69	31091,45
100	1112142122118	3127,52	2792,17	2952,49	2766,18	2909,59	27896,41
101	1112143111113	3162,74	3039,87	3160,44	2908,53	3067,89	14581,67
102	1112143111117	2957,85	2842,93	2955,70	2720,10	2869,14	12753,55
103	1112144122113	2968,10	2869,07	2702,38	2582,05	2780,40	29507,51
104	1112144122117	2775,81	2683,20	2527,31	2414,77	2600,28	25808,12
105	1112145111113	2642,55	2384,52	2622,61	2438,17	2521,96	16860,10
106	1112145111117	2471,35	2230,05	2452,70	2280,22	2358,58	14746,33
107	1112145122113	2299,01	2010,24	2164,55	2094,51	2142,08	14925,47
108	1112145122117	2150,07	1880,01	2024,32	1958,81	2003,30	13054,24
109	1112151111112	3143,87	2701,28	3033,97	2901,47	2945,15	36252,11
110	1112151111116	2988,47	2567,76	2884,00	2758,06	2799,57	32756,82
111	1112152122112	2992,48	2577,81	2823,02	2707,26	2775,14	31025,61
112	1112152122116	2844,56	2450,39	2683,48	2573,44	2637,97	28034,25
113	1112153111111	2841,38	2791,92	2902,66	2671,29	2801,81	9623,21
114	1112153111115	2671,42	2624,91	2729,03	2511,50	2634,22	8506,40
115	1112154122111	2662,61	2635,05	2481,96	2371,44	2537,77	18609,79
116	1112154122115	2926,39	2543,24	2772,01	2622,20	2715,96	28681,25
117	1112155111111	2317,91	1977,86	2303,27	2216,86	2203,97	24710,82
118	1112155111115	2179,26	1859,56	2165,50	2084,26	2072,14	21843,03
119	1112155122111	2002,39	1634,11	1882,57	1901,22	1855,07	24471,31
120	1112155122115	1882,61	1536,36	1769,96	1787,50	1744,11	21631,32

nº	Cenário	Emissões de GEE (kg CO ₂ eq/ha·ano)					
		Usina 10	Usina 11	Usina 12	Usina 13	Média	Variância
121	1113111111112	3207,25	2825,69	3149,33	2978,88	3040,29	29863,38
122	1113111111116	3036,25	2673,73	2981,37	2819,52	2877,72	26958,91
123	1113112122112	3042,75	2689,28	2925,45	2771,93	2857,35	24851,67
124	1113112122116	2892,35	2556,35	2780,84	2634,91	2716,11	22455,57
125	1113113111111	2857,18	2716,14	2922,55	2727,96	2805,96	10122,89
126	1113113111115	2686,27	2553,67	2747,74	2564,79	2638,12	8948,09
127	1113114122111	2678,41	2559,28	2501,86	2428,12	2541,92	11162,51
128	1113114122115	2518,20	2406,19	2352,21	2282,88	2389,87	9867,06
129	1113115111111	2379,42	2114,25	2428,59	2295,97	2304,56	19092,17
130	1113115111115	2237,09	1987,79	2283,32	2158,64	2166,71	16876,45
131	1113115122111	2063,90	1770,50	2007,89	1980,34	1955,66	16445,78
132	1113115122115	1940,44	1664,59	1887,79	1861,88	1838,68	14537,18
133	1113121111114	3422,29	3013,67	3360,43	3178,00	3243,60	34249,97
134	1113121111118	3241,68	2854,63	3183,09	3010,29	3072,42	30730,35
135	1113122122114	3260,09	2881,37	3134,41	2969,92	3061,45	28528,70
136	1113122122118	3088,04	2729,31	2968,99	2813,19	2899,88	25597,01
137	1113123111113	3110,93	2957,36	3182,11	2970,23	3055,16	12000,75
138	1113123111117	2909,39	2765,77	2975,96	2777,81	2857,23	10496,21
139	1113124122113	2916,28	2786,57	2724,05	2643,76	2767,66	13233,24
140	1113124122117	2727,35	2606,04	2547,57	2472,48	2588,36	11574,17
141	1113125111113	2590,73	2302,02	2644,27	2499,88	2509,22	22633,91
142	1113125111117	2422,89	2152,89	2472,96	2337,93	2346,67	19796,27
143	1113125122113	2247,19	1927,74	2186,21	2156,21	2129,34	19496,58
144	1113125122117	2101,61	1802,85	2044,58	2016,52	1991,39	17052,28
145	1113131111112	3168,11	2861,76	3107,21	2907,07	3011,04	22337,95
146	1113131111116	3011,51	2720,31	2953,62	2763,37	2862,20	20184,21
147	1113132122112	3016,73	2738,29	2896,25	2712,86	2841,03	20301,09
148	1113132122116	2867,61	2602,93	2753,09	2578,76	2700,60	18343,74
149	1113133111111	2825,34	2776,10	2886,84	2655,69	2785,99	9597,76
150	1113133111115	2656,34	2610,04	2714,16	2496,84	2619,34	8483,90

nº	Cenário	Emissões de GEE (kg CO ₂ eq/ha·ano)					
		Usina 10	Usina 11	Usina 12	Usina 13	Média	Variância
151	1113134122111	2646,57	2619,23	2466,14	2355,85	2521,95	18566,26
152	1113134122115	2911,31	2528,37	2757,13	2607,54	2701,09	28638,57
153	1113135111111	2347,57	2174,21	2392,87	2223,70	2284,59	10527,60
154	1113135111115	2207,15	2044,16	2249,74	2090,69	2147,93	9305,83
155	1113135122111	2032,05	1830,45	1972,17	1908,07	1935,69	7485,00
156	1113135122115	1910,50	1720,96	1854,21	1793,94	1819,90	6616,34
157	1113141111114	3449,92	3066,17	3329,15	3114,72	3239,99	32641,49
158	1113141111118	3267,85	2904,36	3153,46	2950,34	3069,00	29287,16
159	1113142122114	3287,72	2933,88	3103,13	2906,63	3057,84	31041,56
160	1113142122118	3114,21	2779,04	2939,37	2753,24	2896,46	27851,64
161	1113143111113	3145,27	3022,64	3143,22	2891,55	3050,67	14540,28
162	1113143111117	2941,51	2826,82	2939,59	2704,22	2853,03	12717,35
163	1113144122113	2950,63	2851,85	2685,16	2565,07	2763,18	29444,69
164	1113144122117	2759,47	2667,09	2511,20	2398,89	2584,17	25753,17
165	1113145111113	2625,08	2367,30	2605,38	2421,19	2504,74	16826,70
166	1113145111117	2455,02	2213,94	2436,59	2264,34	2342,47	14717,11
167	1113145122113	2281,54	1993,01	2147,32	2077,52	2124,85	14892,27
168	1113145122117	2133,73	1863,90	2008,21	1942,93	1987,19	13025,21
169	1113151111112	3130,75	2688,35	3021,04	2888,73	2932,22	36222,57
170	1113151111116	2976,00	2555,47	2871,71	2745,94	2787,28	32730,13
171	1113152122112	2979,37	2564,88	2810,09	2694,52	2762,21	30990,84
172	1113152122116	2832,10	2438,09	2671,19	2561,33	2625,68	28002,83
173	1113153111111	2825,34	2776,10	2886,84	2655,70	2785,99	9597,49
174	1113153111115	2656,34	2610,04	2714,16	2496,84	2619,35	8483,66
175	1113154122111	2646,57	2619,23	2466,14	2355,85	2521,95	18566,26
176	1113154122115	2911,31	2528,37	2757,13	2607,54	2701,09	28638,57
177	1113155111111	2301,86	1962,04	2287,45	2201,26	2188,15	24695,81
178	1113155111115	2164,18	1844,68	2150,62	2069,59	2057,27	21829,76
179	1113155122111	1986,35	1618,29	1866,75	1885,63	1839,25	24456,32
180	1113155122115	1867,53	1521,49	1755,09	1772,84	1729,24	21618,07

ANEXO H – Classificação dos cenários tecnológicos para produção de etanol segundo suas emissões de GEE

Cenários mais poluentes I							
nº	Cenário	nº	Cenário	nº	Cenário	nº	Cenário
73	1112121111114	75	1112122122114	135	1113122122114	109	1112151111112
13	1111121111114	134	1113121111118	159	1113142122114	49	1111151111112
97	1112141111114	77	1112123111113	137	1113123111113	169	1113151111112
37	1111141111114	15	1111122122114	161	1113143111113		
133	1113121111114	99	1112142122114	61	1112111111112		
157	1113141111114	158	1113141111118	121	1113111111112		
74	1112121111118	39	1111142122114	1	1111111111112		
14	1111121111118	17	1111123111113	85	1112131111112		
98	1112141111118	101	1112143111113	25	1111131111112		
38	1111141111118	41	1111143111113	145	1113131111112		

Frequência⁽¹⁾: 18,57%;

Média de emissões de GEE: 3081,36 kg CO₂eq/ha·ano

(1) Frequência (%) dos cenários mais poluentes (I) em relação ao total dos cenários identificados.

Cenários mais poluentes II													
nº	Cenário	nº	Cenário	nº	Cenário	nº	Cenário	nº	Cenário	nº	Cenário	nº	Cenário
76	1112122122118	78	1112123111117	87	1112132122112	29	1111133111111	111	1112152122112	116	1112154122115	126	1113113111115
16	1111122122118	26	1111131111116	162	1113143111117	53	1111153111111	51	1111152122112	88	1112132122116	112	1112152122116
100	1112142122118	63	1112112122112	27	1111132122112	50	1111151111116	139	1113124122113	32	1111134122115	52	1111152122116
40	1111142122118	18	1111123111117	147	1113132122112	170	1113151111116	163	1113144122113	56	1111154122115		
136	1113122122118	102	1112143111117	65	1112113111111	173	1113153111111	171	1113152122112	28	1111132122116		
160	1113142122118	3	1111112122112	5	1111113111111	149	1113133111111	172	1113152122116	152	1113134122115		
62	1112111111116	42	1111143111117	125	1113113111111	79	1112124122113	64	1112112122116	176	1113154122115		
2	1111111111116	146	1113131111116	89	1112133111111	19	1111124122113	4	1111112122116	148	1113132122116		
122	1113111111116	123	1113112122112	113	1112153111111	103	1112144122113	124	1113112122116	66	1112113111115		
86	1112131111116	138	1113123111117	110	1112151111116	43	1111144122113	92	1112134122115	6	1111113111115		

Frequência: 35,09%; Média de emissões de GEE: 2793,95 kg CO₂eq/ha·ano

Cenários mais poluentes III					
n°	Cenário	N°	Cenário	n°	Cenário
90	1112133111115	140	1113124122117	21	1111125111113
114	1112153111115	164	1113144122117	105	1112145111113
30	1111133111115	67	1112114122111	151	1113134122111
54	1111153111115	7	1111114122111	175	1113154122111
174	1113153111115	127	1113114122111	45	1111145111113
150	1113133111115	91	1112134122111	141	1113125111113
80	1112124122117	115	1112154122111	165	1113145111113
20	1111124122117	31	1111134122111	68	1112114122115
104	1112144122117	55	1111154122111	8	1111114122115
44	1111144122117	81	1112125111113	128	1113114122115

Frequência: 17,40%;

Média de emissões de GEE: 2552,17 kg CO₂eq/ha·ano

Cenários menos poluentes I					
n°	Cenário	N°	Cenário	n°	Cenário
82	1112125111117	33	1111135111111	154	1113135111115
22	1111125111117	153	1113135111111		
106	1112145111117	117	1112155111111		
46	1111145111117	57	1111155111111		
142	1113125111117	177	1113155111111		
166	1113145111117	70	1112115111115		
69	1112115111111	10	1111115111115		
9	1111115111111	130	1113115111115		
129	1113115111111	94	1112135111115		
93	1112135111111	34	1111135111115		

Frequência: 12,26%;

Média de emissões de GEE: 2262,74 kg CO₂eq/ha·ano

Cenários menos poluentes II			
n°	Cenário	n°	Cenário
83	1112125122113	24	1111125122117
23	1111125122113	108	1112145122117
107	1112145122113	48	1111145122117
47	1111145122113	144	1113125122117
143	1113125122113	168	1113145122117
167	1113145122113	71	1112115122111
118	1112155111115	11	1111115122111
58	1111155111115	131	1113115122111
178	1113155111115		
84	1112125122117		
83	1112125122113		

Frequência: 8,96%;

Média de emissões de GEE: 2051,44 kg CO₂eq/ha·ano

Cenários menos poluentes III			
n°	Cenário	n°	Cenário
83	1112125122113	24	1111125122117
23	1111125122113	108	1112145122117
107	1112145122113	48	1111145122117
47	1111145122113	144	1113125122117
143	1113125122113	168	1113145122117
167	1113145122113	71	1112115122111
118	1112155111115	11	1111115122111
58	1111155111115	131	1113115122111
178	1113155111115		
84	1112125122117		
83	1112125122113		

Frequência: 7,72%;

Média de emissões de GEE: 1847,33 kg CO₂eq/ha·ano

Média ponderada: 2600,52 kg CO₂eq/ha·ano

ANEXO I – Cenários tecnológicos para produção de etanol e suas emissões de GEE (kg CO₂eq/L)

(Considera a produtividade média de Minas Gerais para a agricultura e industrialização do etanol: 84,928 t cana/ha e 83,518 L/t cana, respectivamente – CONAB (2011)).

nº	Cenário	Emissões de GEE (kg CO ₂ eq/L)						nº	Cenário	Emissões de GEE (kg CO ₂ eq/L)					
		Usina 10	Usina 11	Usina 12	Usina 13	Média	Variância			Usina 10	Usina 11	Usina 12	Usina 13	Média	Variância
1	11111111111112	0,48329	0,42774	0,47399	0,45001	0,45876	0,00062	31	1111134122111	0,40726	0,40562	0,37884	0,36407	0,38895	0,00044
2	11111111111116	0,48329	0,42774	0,47399	0,45001	0,45876	0,00062	32	1111134122115	0,47633	0,41637	0,45044	0,42817	0,44283	0,00070
3	1111112122112	0,46042	0,40909	0,44213	0,42067	0,43308	0,00052	33	1111135111111	0,36136	0,33731	0,36760	0,34378	0,35251	0,00020
4	1111112122116	0,46042	0,40909	0,44213	0,42067	0,43308	0,00052	34	1111135111115	0,36136	0,33731	0,36760	0,34378	0,35251	0,00020
5	1111113111111	0,43959	0,42050	0,44891	0,42119	0,43255	0,00020	35	1111135122111	0,31293	0,28454	0,30302	0,29533	0,29895	0,00014
6	1111113111115	0,43959	0,42050	0,44891	0,42119	0,43255	0,00020	36	1111135122115	0,31293	0,28454	0,30302	0,29533	0,29895	0,00014
7	1111114122111	0,41215	0,39642	0,38433	0,37516	0,39201	0,00026	37	1111141111114	0,48718	0,43514	0,46958	0,44108	0,45825	0,00060
8	1111114122115	0,41215	0,39642	0,38433	0,37516	0,39201	0,00026	38	1111141111118	0,48718	0,43514	0,46958	0,44108	0,45825	0,00060
9	1111115111111	0,36625	0,32811	0,37308	0,35488	0,35558	0,00039	39	1111142122114	0,46432	0,41649	0,43772	0,41175	0,43257	0,00058
10	1111115111115	0,36625	0,32811	0,37308	0,35488	0,35558	0,00039	40	1111142122118	0,46432	0,41649	0,43772	0,41175	0,43257	0,00058
11	1111115122111	0,31782	0,27534	0,30850	0,30643	0,30202	0,00034	41	1111143111113	0,44443	0,42970	0,44342	0,41010	0,43191	0,00026
12	1111115122115	0,31782	0,27534	0,30850	0,30643	0,30202	0,00034	42	1111143111117	0,44443	0,42970	0,44342	0,41010	0,43191	0,00026
13	1111121111114	0,48329	0,42774	0,47399	0,45001	0,45876	0,00062	43	1111144122113	0,41699	0,40562	0,37884	0,36407	0,39138	0,00059
14	1111121111118	0,48329	0,42774	0,47399	0,45001	0,45876	0,00062	44	1111144122117	0,41699	0,40562	0,37884	0,36407	0,39138	0,00059
15	1111122122114	0,46042	0,40909	0,44213	0,42067	0,43308	0,00052	45	1111145111113	0,37109	0,33731	0,36760	0,34378	0,35495	0,00029
16	1111122122118	0,46042	0,40909	0,44213	0,42067	0,43308	0,00052	46	1111145111117	0,37109	0,33731	0,36760	0,34379	0,35494	0,00029
17	1111123111113	0,43959	0,42050	0,44890	0,42119	0,43255	0,00020	47	1111145122113	0,32266	0,28454	0,30302	0,29533	0,30139	0,00026
18	1111123111117	0,43959	0,42050	0,44891	0,42119	0,43255	0,00020	48	1111145122117	0,32266	0,28454	0,30302	0,29533	0,30139	0,00026
19	1111124122113	0,41215	0,39642	0,38433	0,37516	0,39201	0,00026	49	1111151111112	0,47371	0,40895	0,45657	0,43831	0,44439	0,00077
20	1111124122117	0,41215	0,39642	0,38433	0,37516	0,39201	0,00026	50	1111151111116	0,47372	0,40895	0,45657	0,43831	0,44439	0,00077
21	1111125111113	0,36625	0,32810	0,37308	0,35488	0,35558	0,00039	51	1111152122112	0,45085	0,39030	0,42470	0,40898	0,41871	0,00066
22	1111125111117	0,36625	0,32810	0,37308	0,35488	0,35558	0,00039	52	1111152122116	0,45085	0,39030	0,42470	0,40898	0,41871	0,00066
23	1111125122113	0,31782	0,27534	0,30850	0,30643	0,30202	0,00034	53	1111153111111	0,43470	0,42970	0,44342	0,41010	0,42948	0,00020
24	1111125122117	0,31782	0,27534	0,30850	0,30643	0,30202	0,00034	54	1111153111115	0,43470	0,42970	0,44342	0,41010	0,42948	0,00020
25	1111131111112	0,47936	0,43514	0,46958	0,44108	0,45629	0,00046	55	1111154122111	0,40726	0,40562	0,37884	0,36407	0,38895	0,00044
26	1111131111116	0,47936	0,43514	0,46958	0,44108	0,45629	0,00046	56	1111154122115	0,47633	0,41637	0,45044	0,42817	0,44283	0,00070
27	1111132122112	0,45649	0,41649	0,43772	0,41175	0,43061	0,00043	57	1111155111111	0,35434	0,30474	0,35141	0,34034	0,33771	0,00052
28	1111132122116	0,45649	0,41649	0,43772	0,41175	0,43061	0,00043	58	1111155111115	0,35434	0,30474	0,35141	0,34034	0,33771	0,00052
29	1111133111111	0,43470	0,42970	0,44342	0,41010	0,42948	0,00020	59	1111155122111	0,30591	0,25197	0,28684	0,29189	0,28415	0,00053
30	1111133111115	0,43470	0,42970	0,44342	0,41010	0,42948	0,00020	60	1111155122115	0,30591	0,25197	0,28684	0,29189	0,28415	0,00053

nº	Cenário	Emissões de GEE (kg CO ₂ eq/L)					
		Usina 10	Usina 11	Usina 12	Usina 13	Média	Variância
61	1112111111112	0,48447	0,42683	0,47572	0,44997	0,45925	0,00068
62	1112111111116	0,48447	0,42683	0,47572	0,44997	0,45925	0,00068
63	1112112122112	0,46160	0,40818	0,44385	0,42064	0,43357	0,00057
64	1112112122116	0,46160	0,40818	0,44385	0,42064	0,43357	0,00057
65	1112113111111	0,44105	0,41937	0,45105	0,42115	0,43316	0,00024
66	1112113111115	0,44105	0,41937	0,45105	0,42115	0,43316	0,00024
67	1112114122111	0,41361	0,39529	0,38648	0,37512	0,39262	0,00026
68	1112114122115	0,41361	0,39529	0,38647	0,37512	0,39262	0,00026
69	1112115111111	0,36771	0,32698	0,37523	0,35484	0,35619	0,00045
70	1112115111115	0,36771	0,32698	0,37523	0,35484	0,35619	0,00045
71	1112115122111	0,31928	0,27421	0,31065	0,30638	0,30263	0,00039
72	1112115122115	0,31928	0,27421	0,31065	0,30638	0,30263	0,00039
73	1112121111114	0,48447	0,42683	0,47572	0,44997	0,45925	0,00068
74	1112121111118	0,48447	0,42683	0,47572	0,44997	0,45925	0,00068
75	1112122122114	0,46160	0,40818	0,44385	0,42064	0,43357	0,00057
76	1112122122118	0,46160	0,40818	0,44385	0,42064	0,43357	0,00057
77	1112123111113	0,44105	0,41937	0,45105	0,42115	0,43316	0,00024
78	1112123111117	0,44105	0,41937	0,45105	0,42115	0,43316	0,00024
79	1112124122113	0,41361	0,39529	0,38647	0,37512	0,39262	0,00026
80	1112124122117	0,41361	0,39529	0,38647	0,37512	0,39262	0,00026
81	1112125111113	0,36771	0,32698	0,37523	0,35484	0,35619	0,00045
82	1112125111117	0,36771	0,32698	0,37523	0,35484	0,35619	0,00045
83	1112125122113	0,31928	0,27421	0,31065	0,30638	0,30263	0,00039
84	1112125122117	0,31928	0,27421	0,31065	0,30638	0,30263	0,00039
85	1112131111112	0,48054	0,43423	0,47131	0,44105	0,45678	0,00051
86	1112131111116	0,48054	0,43423	0,47131	0,44105	0,45678	0,00051
87	1112132122112	0,45767	0,41558	0,43944	0,41171	0,43110	0,00046
88	1112132122116	0,45767	0,41558	0,43944	0,41171	0,43110	0,00046
89	1112133111111	0,43616	0,42857	0,44557	0,41006	0,43009	0,00023
90	1112133111115	0,43616	0,42857	0,44557	0,41005	0,43009	0,00023

nº	Cenário	Emissões de GEE (kg CO ₂ eq/L)					
		Usina 10	Usina 11	Usina 12	Usina 13	Média	Variância
91	1112134122111	0,40872	0,40449	0,38099	0,36403	0,38956	0,00044
92	1112134122115	0,47779	0,41524	0,45259	0,42813	0,44344	0,00076
93	1112135111111	0,36283	0,33618	0,36974	0,34374	0,35312	0,00025
94	1112135111115	0,36283	0,33618	0,36974	0,34374	0,35312	0,00025
95	1112135122111	0,31439	0,28341	0,30517	0,29529	0,29956	0,00018
96	1112135122115	0,31439	0,28341	0,30517	0,29529	0,29957	0,00018
97	1112141111114	0,48836	0,43423	0,47131	0,44105	0,45874	0,00065
98	1112141111118	0,48836	0,43423	0,47131	0,44105	0,45874	0,00065
99	1112142122114	0,46550	0,41558	0,43944	0,41171	0,43306	0,00062
100	1112142122118	0,46550	0,41558	0,43944	0,41171	0,43306	0,00062
101	1112143111113	0,44589	0,42857	0,44557	0,41006	0,43252	0,00029
102	1112143111117	0,44590	0,42857	0,44557	0,41005	0,43252	0,00029
103	1112144122113	0,41845	0,40449	0,38099	0,36403	0,39199	0,00059
104	1112144122117	0,41845	0,40449	0,38099	0,36403	0,39199	0,00059
105	1112145111113	0,37256	0,33618	0,36975	0,34374	0,35556	0,00034
106	1112145111117	0,37256	0,33618	0,36974	0,34374	0,35556	0,00034
107	1112145122113	0,32412	0,28341	0,30517	0,29529	0,30200	0,00030
108	1112145122117	0,32412	0,28341	0,30517	0,29529	0,30200	0,00030
109	1112151111112	0,47489	0,40804	0,45829	0,43828	0,44488	0,00083
110	1112151111116	0,47489	0,40804	0,45829	0,43828	0,44488	0,00083
111	1112152122112	0,45203	0,38939	0,42643	0,40894	0,41920	0,00071
112	1112152122116	0,45203	0,38939	0,42643	0,40894	0,41920	0,00071
113	1112153111111	0,43616	0,42857	0,44557	0,41006	0,43009	0,00023
114	1112153111115	0,43616	0,42857	0,44557	0,41005	0,43009	0,00023
115	1112154122111	0,40872	0,40449	0,38099	0,36403	0,38956	0,00044
116	1112154122115	0,47779	0,41524	0,45259	0,42813	0,44344	0,00076
117	1112155111111	0,35581	0,30361	0,35356	0,34030	0,33832	0,00058
118	1112155111115	0,35581	0,30361	0,35356	0,34030	0,33832	0,00058
119	1112155122111	0,30738	0,25084	0,28898	0,29185	0,28476	0,00058
120	1112155122115	0,30738	0,25084	0,28898	0,29185	0,28476	0,00058

n°	Cenário	Emissões de GEE (kg CO ₂ eq/L)					
		Usina 10	Usina 11	Usina 12	Usina 13	Média	Variância
121	11131111111112	0,48447	0,42683	0,47572	0,44997	0,45925	0,00068
122	11131111111116	0,48249	0,42488	0,47377	0,44805	0,45729	0,00068
123	1113112122112	0,45962	0,40623	0,44190	0,41871	0,43161	0,00057
124	1113112122116	0,45962	0,40623	0,44190	0,41871	0,43161	0,00057
125	11131131111111	0,43859	0,41694	0,44862	0,41875	0,43073	0,00024
126	11131131111115	0,43859	0,41694	0,44863	0,41876	0,43073	0,00024
127	1113114122111	0,41115	0,39286	0,38405	0,37273	0,39020	0,00026
128	1113114122115	0,41115	0,39286	0,38405	0,37273	0,39020	0,00026
129	11131151111111	0,36525	0,32455	0,37280	0,35244	0,35376	0,00045
130	11131151111115	0,36525	0,32455	0,37280	0,35244	0,35376	0,00045
131	1113115122111	0,31682	0,27178	0,30822	0,30399	0,30020	0,00039
132	1113115122115	0,31682	0,27178	0,30822	0,30399	0,30020	0,00039
133	11131211111114	0,48249	0,42488	0,47377	0,44805	0,45729	0,00068
134	11131211111118	0,48249	0,42488	0,47377	0,44805	0,45729	0,00068
135	1113122122114	0,45962	0,40623	0,44190	0,41871	0,43161	0,00057
136	1113122122118	0,45962	0,40623	0,44190	0,41871	0,43161	0,00057
137	11131231111113	0,43859	0,41694	0,44863	0,41875	0,43073	0,00024
138	11131231111117	0,43859	0,41694	0,44863	0,41875	0,43073	0,00024
139	1113124122113	0,41115	0,39286	0,38405	0,37273	0,39020	0,00026
140	1113124122117	0,41115	0,39286	0,38405	0,37273	0,39020	0,00026
141	11131251111113	0,36525	0,32455	0,37280	0,35244	0,35376	0,00045
142	11131251111117	0,36525	0,32455	0,37280	0,35244	0,35376	0,00045
143	1113125122113	0,31682	0,27178	0,30822	0,30399	0,30020	0,00039
144	1113125122117	0,31682	0,27178	0,30822	0,30399	0,30020	0,00039
145	11131311111112	0,47856	0,43228	0,46936	0,43912	0,45483	0,00051
146	11131311111116	0,47856	0,43228	0,46936	0,43912	0,45483	0,00051
147	1113132122112	0,45569	0,41363	0,43749	0,40979	0,42915	0,00046
148	1113132122116	0,45569	0,41363	0,43749	0,40979	0,42915	0,00046
149	11131331111111	0,43370	0,42614	0,44314	0,40766	0,42766	0,00023
150	11131331111115	0,43370	0,42614	0,44314	0,40766	0,42766	0,00023

n°	Cenário	Emissões de GEE (kg CO ₂ eq/L)					
		Usina 10	Usina 11	Usina 12	Usina 13	Média	Variância
151	1113134122111	0,40626	0,40206	0,37856	0,36163	0,38713	0,00044
152	1113134122115	0,47533	0,41281	0,45016	0,42573	0,44101	0,00076
153	11131351111111	0,36036	0,33375	0,36732	0,34135	0,35069	0,00025
154	11131351111115	0,36036	0,33375	0,36732	0,34135	0,35069	0,00025
155	1113135122111	0,31193	0,28098	0,30274	0,29290	0,29714	0,00018
156	1113135122115	0,31193	0,28098	0,30274	0,29290	0,29714	0,00018
157	11131411111114	0,48638	0,43228	0,46936	0,43912	0,45679	0,00065
158	11131411111118	0,48638	0,43228	0,46936	0,43912	0,45679	0,00065
159	1113142122114	0,46352	0,41363	0,43749	0,40979	0,43111	0,00062
160	1113142122118	0,46351	0,41363	0,43749	0,40979	0,43111	0,00062
161	11131431111113	0,44343	0,42614	0,44314	0,40766	0,43009	0,00029
162	11131431111117	0,44343	0,42614	0,44314	0,40766	0,43009	0,00029
163	1113144122113	0,41599	0,40206	0,37856	0,36163	0,38956	0,00059
164	1113144122117	0,41599	0,40206	0,37856	0,36163	0,38956	0,00059
165	11131451111113	0,37009	0,33375	0,36732	0,34135	0,35313	0,00033
166	11131451111117	0,37009	0,33375	0,36732	0,34135	0,35313	0,00033
167	1113145122113	0,32166	0,28098	0,30274	0,29290	0,29957	0,00030
168	1113145122117	0,32166	0,28098	0,30274	0,29290	0,29957	0,00030
169	11131511111112	0,47291	0,40609	0,45634	0,43635	0,44292	0,00083
170	11131511111116	0,47291	0,40609	0,45634	0,43635	0,44292	0,00083
171	1113152122112	0,45005	0,38744	0,42448	0,40702	0,41724	0,00071
172	1113152122116	0,45005	0,38743	0,42448	0,40702	0,41724	0,00071
173	11131531111111	0,43370	0,42614	0,44314	0,40766	0,42766	0,00023
174	11131531111115	0,43370	0,42614	0,44314	0,40766	0,42766	0,00023
175	1113154122111	0,40626	0,40206	0,37856	0,36163	0,38713	0,00044
176	1113154122115	0,47533	0,41281	0,45016	0,42573	0,44101	0,00076
177	11131551111111	0,35335	0,30118	0,35113	0,33790	0,33589	0,00058
178	11131551111115	0,35335	0,30118	0,35113	0,33790	0,33589	0,00058
179	1113155122111	0,30491	0,24841	0,28655	0,28945	0,28233	0,00058
180	1113155122115	0,30491	0,24841	0,28655	0,28945	0,28233	0,00058