



UNICAMP

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Faculdade de Ciências Aplicadas - FCA

ISABELA FERREIRA ROSA

ANÁLISE COMPARATIVA DAS METODOLOGIAS GREET E BIOGRACE:
CÁLCULO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA PARA O ETANOL DE
CANA-DE-AÇÚCAR BRASILEIRO SOB MECANISMOS REGULATÓRIOS
DIFERENCIADOS

LIMEIRA

2017

ISABELA FERREIRA ROSA

ANÁLISE COMPARATIVA DAS METODOLOGIAS GREET E BIOGRACE:
CÁLCULO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA PARA O ETANOL DE
CANA-DE-AÇÚCAR BRASILEIRO SOB MECANISMOS REGULATÓRIOS
DIFERENCIADOS

Dissertação de Mestrado apresentada a Faculdade de Ciências Aplicadas da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestra em Engenharia de Produção e Manufatura na área de Pesquisa Operacional e Gestão de Processos.

Orientadora: Profa. Dra. Ieda Kanashiro Makiya

Coorientador: Dr. Lucas Gonçalves Pereira

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELA ALUNA ISABELA FERREIRA ROSA, E ORIENTADA PELA PROFA. DRA. IEDA KANASHIRO MAKIYA.

LIMEIRA

2017

Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s): Não se aplica.

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Faculdade de Ciências Aplicadas
Renata Eleuterio da Silva - CRB 8/9281

R710a Rosa, Isabela Ferreira, 1991-
Análise comparativa das metodologias GREET e BIOGRACE : cálculo de emissões de gases de efeito estufa para o etanol de cana-de-açúcar brasileiro sob mecanismos regulatórios diferenciados / Isabela Ferreira Rosa. – Limeira, SP : [s.n.], 2017.

Orientador: Ieda Kanashiro Makiya.
Coorientador: Lucas Gonçalves Pereira.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Ciências Aplicadas.

1. Etanol. 2. Cana-de-açúcar. 3. Combustíveis - Regulamentação. 4. Gases do efeito estufa. 5. Efeito estufa (Atmosfera). I. Makiya, Ieda Kanashiro, 1966-. II. Pereira, Lucas Gonçalves. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Ciências Aplicadas. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Comparative analysis of GREET and BIOGRACE methodologies : calculation of greenhouse gas emissions for brazilian sugarcane ethanol under differentiated regulatory mechanisms

Palavras-chave em inglês:

Ethanol

Sugar cane

Fuels - Regulation

Greenhouse gases

Greenhouse effect (Atmosphere)

Área de concentração: Pesquisa Operacional e Gestão de Processos

Titulação: Mestra em Engenharia de Produção e de Manufatura

Banca examinadora:

Ieda Kanashiro Makiya [Orientador]

Francisco Ignacio Giocondo Cesar

Andrea Leda Ramos de Oliveira

Data de defesa: 24-02-2017

Programa de Pós-Graduação: Engenharia de Produção e de Manufatura

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Ieda Kanashiro Makiya (Orientadora)

Prof. Dr. Francisco Ignacio Giocondo Cesar (IFSP-Campus Piracicaba)

Profa. Dra. Andrea Leda Ramos de Oliveira (FCA-UNICAMP)

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no processo de vida acadêmica do(a) aluno(a).

Este exemplar corresponde à redação final da Dissertação de Mestrado defendida pela aluna **ISABELA FERREIRA ROSA**, aprovada pela Comissão Julgadora em 24 de fevereiro de 2017.

,

Dedico a produção de minha dissertação aos meus amados pais Norma e José e ao meu marido, Leonardo pois sem o apoio deles esse projeto jamais teria se concretizado.

Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, que nos momentos mais difíceis me deu forças, por meio de anjos colocados em meu caminho em forma de pessoas, para que eu pudesse ter coragem e seguir em busca desse sonho que se concretizou aos poucos e através de muito suor e dedicação.

Agradeço também ao meu marido Leonardo Bergamin, que compartilhou comigo as noites em claro em busca deste sonho, as vezes mesmo cansado ele se manteve firme ao meu lado, me incentivando e dando forças. Eu te amo muito, você não tem dimensão do quanto.

Agradeço profundamente aos meus pais, Norma e José, que me presentearam com o dom da vida e sempre me ensinaram o caminho do bem e da honestidade, pelo qual tenho seguido sem me arrepender...

Gostaria de expressar minha gratidão aos meus orientadores Ieda e Lucas, que sempre me auxiliaram, acreditaram em mim e principalmente me orientaram e deram suporte para que eu pudesse escrever a dissertação da melhor maneira possível.

Dedico um carinho especial também aos meus peludos, um que já virou uma estrelinha linda no céu...o Logan e ao que compartilho os dias tristes e alegres na Terra, o Snow, um pequeno terrível, mas que sempre torna meus piores dias mais leves...

Enfim, aos que não citei aqui, mas que de alguma forma estiveram presentes em meu dia a dia nessa jornada, sintam-se abraçados e agraciados por meu coração...

Muito obrigada!

Resumo

Devido às mudanças climáticas e ao aumento das emissões de gases poluentes, muitos países têm adotado a prática de substituir o uso de combustíveis fósseis pelos biocombustíveis. Essa ampliação no uso dos biocombustíveis e o consequente incremento na produção agrícola das matérias primas trouxe à discussão a necessidade de adequação da produção para venda no mercado internacional, visto exigências de alguns países importadores relacionadas aos impactos ambientais provenientes do ciclo de vida da energia renovável adquirida. Dessa forma, o presente estudo visou produzir uma análise comparativa das metodologias de cálculo de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) vinculadas a um dos sistemas de certificação mais utilizados pelas usinas nacionais exportadoras: a certificação BONSUCRO, que adota adaptações das metodologias de cálculos de GEE baseados na Análise do Ciclo de Vida (ACV), possuindo duas vertentes, uma ligada ao mecanismo regulatório Norte Americano (RFS2), que contém adaptações do modelo GREET, e outra baseada na Diretiva Europeia 2009/28/CE, o modelo BioGrace. Além disso, foi também objetivo fornecer base para discussão acerca de uma proposta de unificação para os cálculos das emissões de GEE. Foram desenvolvidas análises qualitativas e quantitativas entre as diferentes calculadoras de emissões (GREET *versus* BioGrace), quanto às diferenças relacionadas ao estudo das etapas do ACV e aprofundamento das metodologias de cálculo; ademais, foram substituídos em ambas as metodologias os dados considerados na ACV do etanol de cana-de-açúcar para a média das usinas do Estado de São Paulo, com a finalidade de fomentar discussões mais aprofundadas sobre a estrutura de cálculo das metodologias, bem como amparar a comparabilidade entre os valores de considerados por eles e fazer recomendações sobre a harmonização de um modelo padrão único que contemplasse as duas diferentes metodologias para o cálculo das emissões de GEE, em especial, para o etanol de cana-de-açúcar brasileiro. Obteve-se como resultado que a ferramenta GREET e a regulamentação RFS2 são mais abrangentes em termos de ACV do que a ferramenta BioGrace e sua respectiva regulamentação EU-RED. Discutiu-se, neste contexto, detalhadamente os cálculos, as diferenças adotadas pelas metodologias analisadas e suas influências sobre as regulamentações internacionais, sinalizando a necessidade da padronização dessas normas como fator fundamental para comercialização desse biocombustível em nível global.

Palavras chave: Etanol. Cana de açúcar. Mecanismos regulatórios. Certificações. Emissões de gases de efeito estufa.

Abstract

Due to the climate change and increasing emissions of polluting gases, many countries have adopted the practice of replacing the use of fossil fuels by biofuels. This expansion in the use of biofuels and the consequent increase in the agricultural production of this bioenergy brought to the discussion the necessity to adjust the production for sale in the international market, due to the requirements of some importing countries related to the traceability of emissions from the life cycle of acquired renewable energy. Thus, the present study aimed to produce a comparative analysis of the methodologies for calculating Greenhouse Gas Emissions (GHG) emissions linked to one of the most used certification systems by national exporting plants: the BONSUCRO certification, which adopts adaptations of calculation methodologies of GHGs based on the Life Cycle Analysis (LCA), with two strands, one linked to the North American regulatory mechanism (RFS2), which contains adaptations of GREET, another based on the European Directive 2009/28/EC, BioGrace. In addition, the objective was also to provide a basis for discussion on what a unification proposal could be for calculations of GHG emissions. Qualitative and quantitative analyzes were developed between the different emission calculators (GREET x BioGrace), as well as the differences related to the study of the stages of the LCA and the deepening of the calculation methodologies; besides, the average data considered in the LCA of sugarcane ethanol for plants in the São Paulo State were replaced in both methodologies, these values were provided by the National Bioethanol Science and Technology Laboratory (CTBE), for the purpose. to encourage more in-depth discussions about the methodological calculation structure, as well as to support the comparability between the values considered by them and make recommendations on the harmonization of a single standard model that contemplates the two different methodologies for the calculation of GHG emissions, in particular, for Brazilian sugarcane ethanol. Thus, the GREET tool and the RFS2 regulation are more comprehensive in terms of LCA than the BioGrace tool and its EU-RED regulation. In this context, we discuss in detail the calculations, the differences adopted by the methodologies analyzed and their influence on international regulations, signaling the need to standardize these standards as a fundamental factor for the commercialization of this biofuel at the global level.

Keyword: Ethanol. Sugar cane. Regulatory mechanisms. Certifications. Greenhouse Gas Emissions.

Lista de Ilustrações

Figura 1 – Produção total de biocombustíveis no mundo por região, 2014.....	15
Figura 2 – Zoneamento Agroambiental – Setor Sucroenergético – Estado de São Paulo	21
Figura 3 – Etapas de produção – usina sucroalcooleira.....	23
Figura 4 – Esquema dos combustíveis renováveis – RFS2	32
Figura 5 – Limites de cálculo das emissões de GEE: fronteiras do sistema e modelos utilizados	34
Figura 6 – Fluxograma das etapas do estudo	41
Figura 7 – Passo a passo do método de subtração	47
Figura 8 – Passo a passo do método de particionamento	48
Figura 9 – Fronteiras do sistema europeu de emissões de GEE	50
Figura 10 – Limites do sistema de avaliação – Análise do ciclo de vida campo-rodas	54
Figura 11 – Diferença do escopo das cadeias produtivas entre RFS2, EU-RED, BioGrace e GREET	56
Figura 12 – Emissões padrão para GREET e BioGrace – etanol de cana-de-açúcar	61
Figura 13 – Emissões de GEE após a substituição dos dados do CTBE para GREET e BioGrace – etanol de cana-de-açúcar	66
Figura 14 – Emissões líquidas de CO ₂ dos biocombustíveis produzidos a partir de culturas selecionadas, expressas em % das emissões de CO ₂ devido a mudanças indiretas no uso da terra (do inglês ILUC).....	73

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Mistura de biocombustíveis ao combustível fóssil por país	16
Tabela 2 – Nível de importância por critério na Diretiva Europeia.....	27
Tabela 3 – Critérios de Sustentabilidade das Diretivas Europeias	28
Tabela 4 – Fatores de conversão de poluentes	57
Tabela 5 – Parâmetros fixos, conforme metodologias BioGrace e GREET	58
Tabela 6 – Insumos agrícolas utilizados para a produção do bioetanol, conforme metodologias BioGrace e GREET	59
Tabela 7 – Insumos utilizados pela indústria para a produção do bioetanol, conforme metodologias BioGrace e GREET	60
Tabela 8 – Comparativo dos resultados das emissões de GEE – metodologias GREET e BioGrace	63
Tabela 9 – Destaques de diferenças de insumos agrícolas considerado pelas metodologias BioGrace, GREET e dados do CTBE.....	64
Tabela 10 – Comparativo dos resultados das emissões de GEE após substituição com os dados do CTBE– metodologias GREET e BioGrace	68

Lista de abreviaturas e siglas

ACV	Análise do Ciclo de Vida
ANL	<i>Argonne National Laboratory</i>
BioGrace	<i>Bioenergy Greenhouse Gas Emission</i>
Bonsucro	<i>Better Sugarcane Initiative</i>
CH ₄	Metano
C ₂ H ₄	Etileno
C ₂ H ₄ O	Acetaldeído
CO ₂	Dióxido de Carbono
CO ₂ eq/MJ	Equivalente em Dióxido de Carbono por Mega Joule
CTBE	Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol
EMAS	Eco Management and Audit Scheme
EPA	Agência de Proteção Ambiental dos EUA
EU-RED	UE <i>Renewable Energy Directive</i>
GEE	Gases de Efeito Estufa
REET	<i>Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation Model</i>
GWP	<i>Global Warming Potential</i>
H ₂ SO ₄	Ácido Sulfúrico
H ₃ PO ₄	Ácido Fosfórico
ILUC	<i>Indirect Land Use Change</i>
ISO	<i>International Standard Organizations</i>
L/TC	Litros por Tonelada de Cana
LCA	<i>Life Cycle Analysis</i>
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MJ	Mega Joule
N ₂ O	Óxido Nitroso
PTW	<i>Pump to Wheel</i>
RFS	EUA <i>Renewable Energy Directive</i>
RFS2	EUA <i>Renewable Energy Directive 2</i>
WTP	<i>Well to Pump</i>
WTW	<i>Well to Wheel</i>

Sumário

1	Introdução	13
2	Contextualização das emissões de GEE	19
2.1	Emissões de Gases de Efeito Estufa e mudanças climáticas	19
2.1.1	Processo produtivo do etanol	20
3	Mecanismos Regulatórios Internacionais	25
3.1	Mecanismo Regulatório Europeu (Diretivas Europeias)	25
3.2	Mecanismo Regulatório Norte Americano (Renewable Fuel Standard 2)	30
4	Sistemas de Certificação	35
4.1	Bonsucro	36
5	Análise e apresentação dos métodos	40
5.1	Análise do Ciclo de Vida	44
5.1.1	Sistemas de Alocação	46
5.2	Metodologias de Cálculo de emissões de GEE	48
5.2.1	BioGrace	48
5.2.1.1	Fronteiras de emissões de GEE	49
5.2.2	REET	52
5.2.2.1	Fronteiras de emissões de GEE	53
6	Resultados e discussão	55
6.1	Análises estruturais e padrões das metodologias de emissões de GEE	55
6.2	Substituição e análise dos dados do CTBE nas metodologias de emissões de GEE: REET e BioGrace	64
7	Considerações finais	69
7.1	Recomendações para uma padronização de metodologia de emissões de GEE	71
	Referências	75
	ANEXO A – Visão geral da ferramenta BIOGRACE	83
	ANEXO B – Ferramenta BIOGRACE após aplicação dos dados do CTBE	84
	ANEXO C – Representação do transporte para o BIOGRACE após as substituições dos dados do CTBE	85
	ANEXO D – Visão geral da ferramenta REET	86
	ANEXO E – Ferramenta REET após a substituição dos dados do CTBE	87
	ANEXO F – Representação do Transporte e Distribuição para o REET	88

1 Introdução

Devido ao aumento significativo do uso de energia baseada em fontes fósseis e consequente preocupação com as mudanças climáticas, bem como com as emissões de dióxido de carbono (CO₂), muitos países buscam alternativas para a substituição de parte dessa energia proveniente do petróleo e gás natural por combustíveis produzidos a partir de fontes renováveis (WWF, 2015).

Pode-se afirmar que há uma necessidade em se reduzir as emissões de CO₂ em todos os setores – o setor de transportes é particularmente importante, representando 14% do total de emissões globais, de acordo com o relatório *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2014). Assim, os biocombustíveis são fundamentais para esses esforços.

Os biocombustíveis comercialmente disponíveis, como etanol, biodiesel e biogás apresentam reduções de emissão de CO₂ em relação aos combustíveis convencionais e até o momento são as únicas opções disponíveis no mercado em termos de quantidade suficiente para substituir parte dos combustíveis provenientes de fontes fósseis, em termos de projeções para o futuro (WBA, 2013).

Nesse sentido, a ampliação no uso dos biocombustíveis e o consequente incremento na produção agrícola das fontes de bioenergia são o principal enfoque deste trabalho, uma vez que esse fato trouxe à discussão a necessidade de adequação da produção para venda em um mercado internacional com regras que devem ser atendidas. Sendo as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) um dos principais fatores para o aumento do consumo de biocombustíveis e uma das maiores preocupações para a venda desses no mercado internacional, o presente estudo visa analisar comparativamente as metodologias de cálculo de emissões de GEE, vinculadas a um dos processos de certificação mais conhecidas pelas usinas brasileiras: a certificação *Better Sugarcane Initiative* (Bonsucro), voltada ao etanol proveniente da cana-de-açúcar (OLIVEIRA *et. al.*, 2013). Esse sistema de certificação busca atender a dois dos principais mercados importadores, Europa e EUA, que possuem legislações que tangem o tema de emissões de GEE para biocombustíveis, a Diretiva Europeia 2009/28/CE e a *Renewable Fuel Standard 2* (RFS2), respectivamente.

A certificação Bonsucro adota adaptações das metodologias de cálculos de GEE baseados na Análise do Ciclo de Vida (ACV) aplicadas à produção do etanol de

cana-de-açúcar, possuindo duas vertentes, sendo elas: *Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation Model (GREET)*, ligada ao mecanismo regulatório norte americano e a *Bioenergy Greenhouse Gas Emission (BioGrace)*, ligada à Diretiva Europeia.

Assim, por meio da utilização dos dados padrões presentes nas ferramentas de cálculo das emissões de GEE das metodologias estudadas (GREET e BioGrace), pretende-se delinear diferenças entre os métodos de mensuração das emissões, bem como demonstrar como duas metodologias de cálculo podem avaliar de formas distintas o mesmo produto, o etanol de cana-de-açúcar, para sua inserção em mercados diferenciados.

Ademais, objetiva-se substituir em ambas as metodologias os dados considerados na ACV do etanol de cana-de-açúcar para média das usinas do estado de São Paulo, sendo que tais valores são fornecidos pelo Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (CTBE), com a finalidade de fomentar discussões mais aprofundadas sobre a estrutura de cálculo das metodologias, bem como amparar a comparabilidade entre os valores considerados por eles. A partir dos diagnósticos quantitativos e qualitativos da análise de ambas metodologias pretende-se traçar recomendações sobre a harmonização de um modelo padrão único que contemplasse as duas diferentes metodologias para o cálculo das emissões de GEE, em especial, para o etanol de cana-de-açúcar brasileiro.

Dentre os biocombustíveis existe uma divisão que os aloca em três grandes grupos, chamados de gerações, e são classificados de acordo com o recurso do qual essa bioenergia é derivada:

Primeira Geração: a fonte de carbono para esse biocombustível é açúcar, lipídio ou amido diretamente extraído a partir de um plantio;
Segunda Geração: o carbono do biocombustível é derivado de celulose, hemicelulose, lignina e pectina. Pode incluir agricultura, resíduos de produção ou florestas;
Terceira Geração: o carbono desse biocombustível é derivado de organismos autotróficos aquáticos (Ex. algas). Assim os recursos utilizados por esses organismos para se desenvolverem são luz, dióxidos de carbono e nutrientes. (EUROPEAN BIOFUEL, 2016).

No ano de 2013 os biocombustíveis, junto à energia dos resíduos da produção deste, representaram 10,2% da oferta total de energia primária no mundo,

perdendo apenas para o óleo, carvão mineral e gás natural. O total de oferecimento de energia primária consolida-se pela seguinte equação (IEA, 2015):

$$\text{Energia Primária Oferecida} = \text{Produção} + \text{Importações} - \text{Exportações} - \text{Navegação marítima internacional} - \text{Aviação internacional} \pm \text{Mudanças de estoque.}$$

De acordo com a Figura 1, a América do Norte se consolida como a região com maior produção de biocombustíveis no mundo, com aproximadamente 44% do total, seguido pela América Central com aproximadamente 29% e Europa e Euro Ásia com 17% (BP STATS, 2015). Esses dados podem ser atribuídos às políticas internas de estímulo ao consumo dessa energia renovável praticadas nos países e blocos econômicos pertencentes a essas regiões.

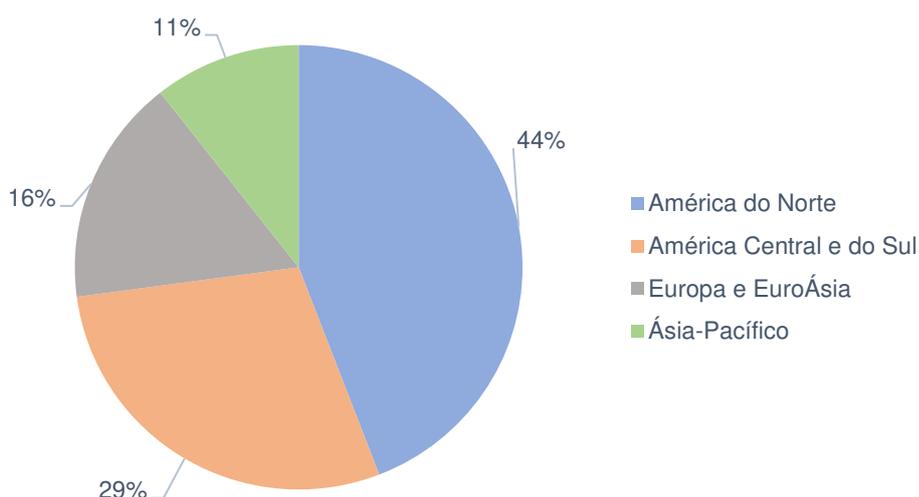


Figura 1 – Produção total de biocombustíveis no mundo por região, 2014. Fonte: Adaptado de BP STATS (2015).

Em termos de produção de biocombustíveis, destaca-se ainda que os EUA são responsáveis por 42% da produção mundial, seguidos pelo Brasil com 24% do total mundial (BP STATS, 2015). O principal biocombustível produzido por esses países é o bioetanol, sendo nos EUA a matéria prima principal para esse fim o milho e, no Brasil, a cana-de-açúcar (BECKMAN, 2015). Esse, por sua vez, é o biocombustível de primeira geração mais utilizado no mundo, dado que mais de 64 países possuem atualmente programas ativos de incentivo ao consumo (BAA, 2016). Projeções sugerem que a produção global de bioetanol deve chegar a 168 bilhões de

litros até 2022, o que representa um crescimento de aproximadamente 70% em relação ao ano de 2013 (UNCTAD, 2014).

A utilização de combustíveis renováveis é reconhecida por potências econômicas como Estados Unidos e União Europeia por meio de legislações de incentivo. Esse movimento de incorporação dos biocombustíveis varia de país para país, e um dos principais fatores que influenciam esse consumo é a adição desses a combustíveis fósseis, de acordo com o mandato vigente imposto pelo governo local. A tabela 1, abaixo, demonstra as relações de misturas em determinados países.

Tabela 1 – Mistura de biocombustíveis ao combustível fóssil por país

País	Porcentagem de mistura
Brasil	27% de etanol e 5% de biodiesel
Argentina	5% de etanol e 10% de biodiesel
Canadá	5% de etanol e 2% de biodiesel
China	10% de biocombustíveis em nove províncias
Estados Unidos	10% de etanol e 10% de biodiesel
Índia	5% de etanol
Paraguai	24% de etanol e 1% de biodiesel
União Europeia	Em média 5% de combustíveis renováveis

Fonte: Adaptado de UNICA (2014).

O Brasil apresenta maiores porcentagens de mistura de biocombustíveis aos combustíveis fósseis se comparado aos EUA e China. Sendo esses os maiores emissores de GEE do mundo, sendo que o primeiro é o maior em termos *per capita* e o segundo em valores absolutos. Um dos fatos que justificam a liderança da China em emissões é o grande tamanho da população (concentra de 20% a 25% da população mundial) (EMBRAPA, 2015).

As misturas mandatórias de biocombustíveis a combustíveis fósseis, como por exemplo a porcentagem de mistura do etanol à gasolina, variam conforme legislações federais e até mesmo estaduais, como nos EUA. O uso de etanol em misturas ou mesmo puro pode ser apontado como uma das principais ferramentas contra o aquecimento global, uma vez que contribui para a redução das emissões de CO₂ associadas ao uso nos motores à combustão de veículos (BAA, 2016). No caso

do etanol de cana-de-açúcar foram relatadas reduções de emissões de GEE de 77% a 82% em relação à gasolina (WANG et al., 2012).

De acordo com Bourguignon (2015) existem vários motivos pelos quais deve-se incentivar uma política de apoio a biocombustíveis, dentre os quais destacam-se: redução da volatilidade do preço do petróleo, reforço da segurança energética, sustentabilidade do setor agrícola e da economia rural, e, nos últimos anos, a descarbonização do setor de transportes com alterações mínimas para os estoques de veículos e infraestrutura de distribuição de combustíveis.

De acordo com o relatório internacional publicado pelo Departamento Agricultura dos EUA (BECKMAN, 2015), desde 2001 houve um aumento significativo na produção internacional de biocombustíveis dadas as ações governamentais no sentido de incentivar o uso destes. Esse aumento ocorreu principalmente nos seguintes países e/ou grupos econômicos: Estado Unidos, União Europeia e Brasil, que juntos representaram um aumento de 462% de 2001 a 2013. Essa situação de progressão dos biocombustíveis sofreu ameaças em 2014 com a queda do preço do petróleo para menos da metade, o que colocou uma pressão sobre o consumo de etanol, especialmente nos EUA, porém, devido à regulamentação houve a recuperação do mercado de etanol (BECKMAN, 2015).

Assim, os mandatos regulatórios impostos por esses países influenciaram o aumento no consumo e comércio internacional dos biocombustíveis. O Brasil é o segundo maior produtor de biocombustíveis do mundo e tem sido um grande exportador, principalmente de etanol. Estados Unidos e Brasil tem se dedicado ao comércio bilateral de biocombustíveis, mais conhecido como o comércio intra-indústria (BECKMAN, 2015).

A produção global de etanol e biodiesel deve expandir-se no mundo até alcançar 134,5 e 39 bilhões de litros, respectivamente, até 2024. A produção que deve se alterar mais deve ser a brasileira, pois os incentivos relacionados aos biocombustíveis podem influenciar isso, visto que a mistura de etanol à gasolina está na casa dos 27%. O comércio de etanol e biodiesel não apresenta perspectivas de muito crescimento nos próximos anos, mas a parceria bilateral entre EUA e Brasil também não apresenta perspectivas de mudanças, visto os mandatos em ambos os países (OECD/FAO, 2015).

De acordo com perspectivas, até 2024, 25% de toda a produção global de cana de açúcar será usada para a produção de etanol, contra 21% em 2014, sendo

que o Brasil deve ser responsável por dois terços desse crescimento. E este aumento pode ser atribuído a um provável aumento na demanda doméstica, e ao maior lucro que se pode obter com o etanol em comparação com o açúcar (OECD/FAO, 2015).

No que tange a capacidade de produção do bioetanol na UE, a mesma quadruplicou entre os anos de 2006 a 2012, sendo que os maiores responsáveis por esse aumento são França, Benelux (bloco econômico formado por Bélgica, Holanda e Luxemburgo), Alemanha, Reino Unido, Polônia e Espanha. Porém, desde 2012 a capacidade não aumenta significativamente, devido aos limites impostos pela União Europeia na utilização de culturas alimentares para a produção dos biocombustíveis. Por esse motivo a UE acaba por optar pela importação (ENMC, 2016).

2 Contextualização das emissões de Gases de Efeito Estufa

Este capítulo explana sobre o contexto das emissões de GEE para os setores da economia, especialmente para o setor de transporte, mostrando que o ciclo de vida dos biocombustíveis, como potenciais mitigadores das emissões de GEE em relação aos combustíveis fósseis, possui tantas outras indústrias envolvidas, tais como agricultura e mudanças no uso da terra e indústria de produção.

2.1 Emissões de Gases de Efeito Estufa e mudanças climáticas

De acordo com Oliveira (2015) o aumento dos investimentos nacionais e internacionais no bioetanol, especificamente de cana de açúcar, nos últimos tempos pode ser atribuído a três principais fatores, sendo eles: aumento da demanda devido a introdução do carro *flex fuel*; mudanças climáticas e o aumento das emissões de CO₂; e avanços nas tecnologias de produção do etanol de segunda geração e sua possível introdução mais abundante no mercado.

Dessa forma, no que tange às alterações climáticas induzidas pelo homem, as mesmas são causadas pelo aumento exponencial das emissões de CO₂ (o CO₂ é o gás que tem maior contribuição para o aquecimento global, já que representa mais de 70% das emissões de GEE e seu tempo de permanência é de pelo menos cem anos (WWF, 2015)) e de outros gases com efeito de estufa (GEEs) que se acumularam e acumulam na atmosfera principalmente nos últimos 100 anos (STERN, 2007).

As emissões antropogênicas totais de GEE têm crescido ao longo dos anos de 1970 a 2010, apresentando maiores aumentos absolutos no final deste período. As emissões de CO₂ provenientes da utilização de combustíveis fósseis e dos processos industriais contribuíram com cerca de 78% do total de GEE de 1970 a 2010. Globalmente, o crescimento econômico e o populacional continuam a ser os impulsionadores mais importantes do aumento das emissões de CO₂ provenientes de combustíveis fósseis (IPCC,2014).

Esse acúmulo de GEE na atmosfera leva ao aumento global da temperatura, ocasionando desde derretimentos glaciais, que podem levar a inundações, até a diminuição nos rendimentos da agricultura, passando pelo aumento do número de espécies da fauna em extinção, acidificação oceânicas e aumento de mortes devido a desnutrição (STERN, 2007).

Entre as ações mundiais de destaque para a redução nacional de emissões de GEE destaca-se as políticas de incentivo ao aumento no consumo de biocombustíveis no Brasil, uma vez que essa ação resultou em uma ampliação na participação dos biocombustíveis no combustível de transporte rodoviário de 1% em 1975 para 25% em 2002. Houve ainda uma desaceleração no crescimento das emissões anuais, que representaram 2,8% ao ano com os biocombustíveis, ao invés de 3,6% ao ano se não tivesse existido essa ação. Assim, quando a biomassa é utilizada para a produção de biocombustível no setor de transporte, as emissões poupadas variam entre 10% e 90% em relação à gasolina, dependendo da fonte de biocombustível e da técnica de produção (STERN, 2007).

Dessa forma, no que tange às emissões de CO₂, pode-se afirmar que há uma necessidade urgente de reduzi-las em todos os setores da economia – o setor de transporte é particularmente importante e os biocombustíveis são centrais para tais esforços. Os biocombustíveis convencionais figuram como as únicas opções comercialmente disponíveis de baixas emissões para substituir os combustíveis fósseis no presente (WBA, 2013).

Em uma visão das emissões de GEE mundiais por setores da economia, o setor que leva o primeiro lugar é o de produção de eletricidade e calor, representando 25% do total, seguido pelo setor de Agricultura, Floresta e Outras mudanças no uso da terra, com 24%, Indústria com 21%, Transporte com 14% e outros (IPCC, 2014).

Vale ressaltar que os setores da economia que representam os maiores responsáveis em termos de emissões de GEEs, conforme evidenciado acima estão presentes no ciclo de vida do biocombustível, a começar pela agricultura e mudanças no uso da terra, passando pela indústria, e desembocando no setor de transporte. Assim, no processo industrial do etanol de cana-de-açúcar, produto foco desse estudo, tem-se uma série de fases envolvidas, que por sua vez produzem resíduos, e que podem alimentar outras indústrias, conforme será evidenciado na próxima seção.

2.1.1 Processo produtivo do etanol

Quanto à fase de pré-produção, que envolve o plantio e a colheita da cana-de-açúcar, vale destacar que, de acordo com *Coordinating Research Council* (CRC, 2013), nos últimos anos ela tem passado por transformações, principalmente, no que se refere à passagem da colheita manual no campo com queimadas, para uma

colheita mecanizada e sem queimadas. Essa mudança de práticas pode ser atribuída à uma série de políticas realizadas pelos governos Federal e Estadual, principalmente no Estado de São Paulo, o qual é responsável por aproximadamente 50% da produção nacional de bioetanol. Entre as políticas, vale destacar o Zoneamento Agroambiental da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo (ZAA), um projeto criado em 2008, em uma parceria entre Secretarias do Meio Ambiente e da Agricultura e Abastecimento do Estado, com intuito de organizar e delimitar barreiras para a forma como o solo vinha sendo ocupado na região, além de subsidiar políticas públicas relacionadas ao setor (SÃO PAULO, 2015b).

No Zoneamento Ambiental, o Estado de São Paulo, ilustrado na figura 2, foi dividido em regiões, de acordo com o tipo de clima, solo, relevo, etc. Isso, com objetivo de delimitar a expansão da cultura de modo a não prejudicar o meio ambiente.

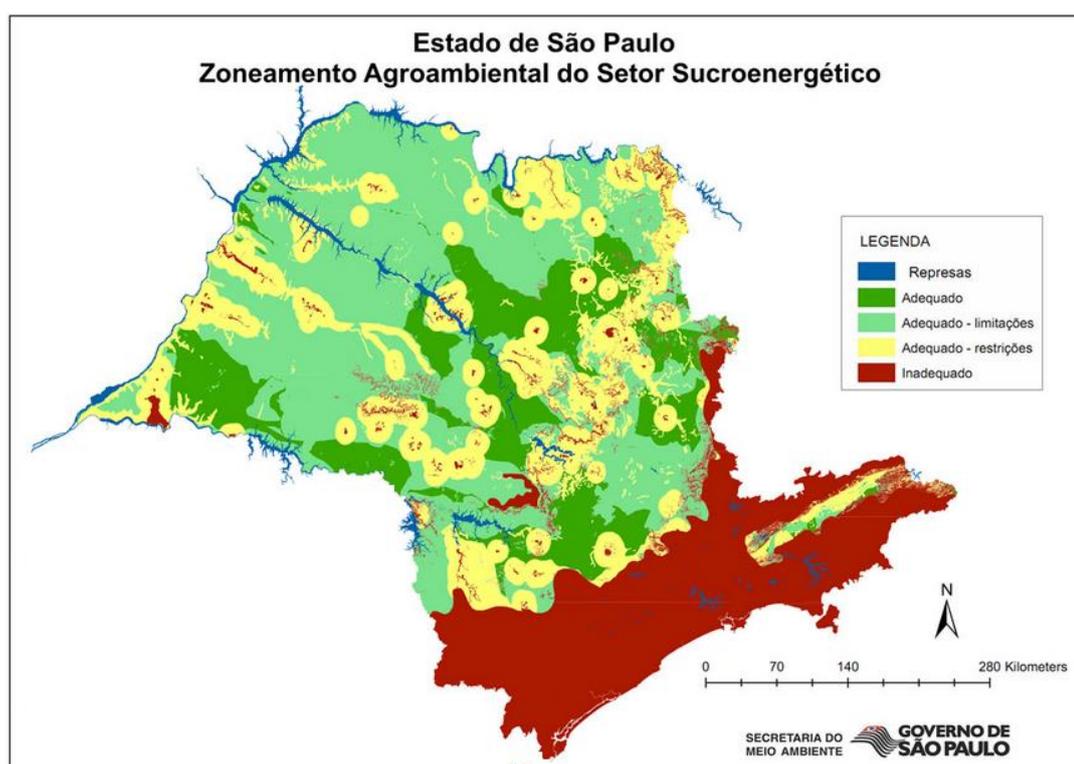


Figura 2 – Zoneamento Agroambiental – Setor Sucroenergético – Estado de São Paulo. Fonte: (SÃO PAULO, 2015).

Foram relacionados os locais que existem represas, e as áreas territoriais foram classificadas de acordo com a viabilidade ambiental de cultura da cana-de-açúcar. As divisões vão desde adequada a inadequada, passando pelas adequadas com restrições e adequadas com limitações, sendo que essas duas últimas possuem

solo e clima adequados, mas apresentam restrições por se localizarem próximas a áreas de proteção ambiental ou bacias hidrográficas importantes (SÃO PAULO, 2015b).

O governo do Estado de São Paulo elaborou um Protocolo Agroambiental, que se trata de um projeto estratégico em relação ao bioetanol, inserido no contexto no Projeto Etanol Verde, realizado pela Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo. Este protocolo é um compromisso firmado também com a União da Indústria Sucroalcooleira (UNICA) e com a Organização de Plantadores de Cana da Região Centro-Sul do Brasil (ORPLANA), e tem por objetivo desenvolver ações que estimulem a sustentabilidade da cadeia produtiva de açúcar, etanol verde e bioenergia. Este compromisso que envolve uma parceria público privada busca promover iniciativas relacionadas a produção da cana-de-açúcar que se adequem de modo a mitigar de impactos ao meio ambiente e a sociedade (SÃO PAULO, 2015a).

Entre as metas de destaque do Protocolo estão, a redução de queimada em áreas de plantação de cana, que no ano de 2006/2007 representavam cerca de 65,8% dos canaviais do Estado de São Paulo, passando para 16,3% no ano de 2013/2014. Essa redução nas queimadas foi acompanhada pelo aumento na colheita da cana crua passando de 34,2% da área plantada em 2006/2007 para 83,7% na safra 2013/2014. Assim, desde 2006 até a safra 2013/2014, a área acumulada que deixou de ser queimada é de 7,16 milhões de hectares, o que representa a mitigação de 26,7 milhões de toneladas de poluentes e 4,4 milhões de toneladas de emissões de gases de efeito estufa (IEA, 2014).

O etanol de cana-de-açúcar possui uma das maiores produtividades por hectare, sendo maior que seu principal adversário, o etanol de milho. O primeiro possui uma produtividade de 7500 litros/ha, enquanto o segundo apresenta uma produtividade de 3000 litros/ha. Além disso, o processo produtivo desse biocombustível de cana-de-açúcar é um dos mais simples (NOVACANA, 2016c). Assim, as etapas fundamentais a todas as usinas são: recepção, preparo e moagem da cana na usina; estocagem do bagaço; tratamento do caldo. A figura 3 demonstra essas etapas mais detalhadamente.

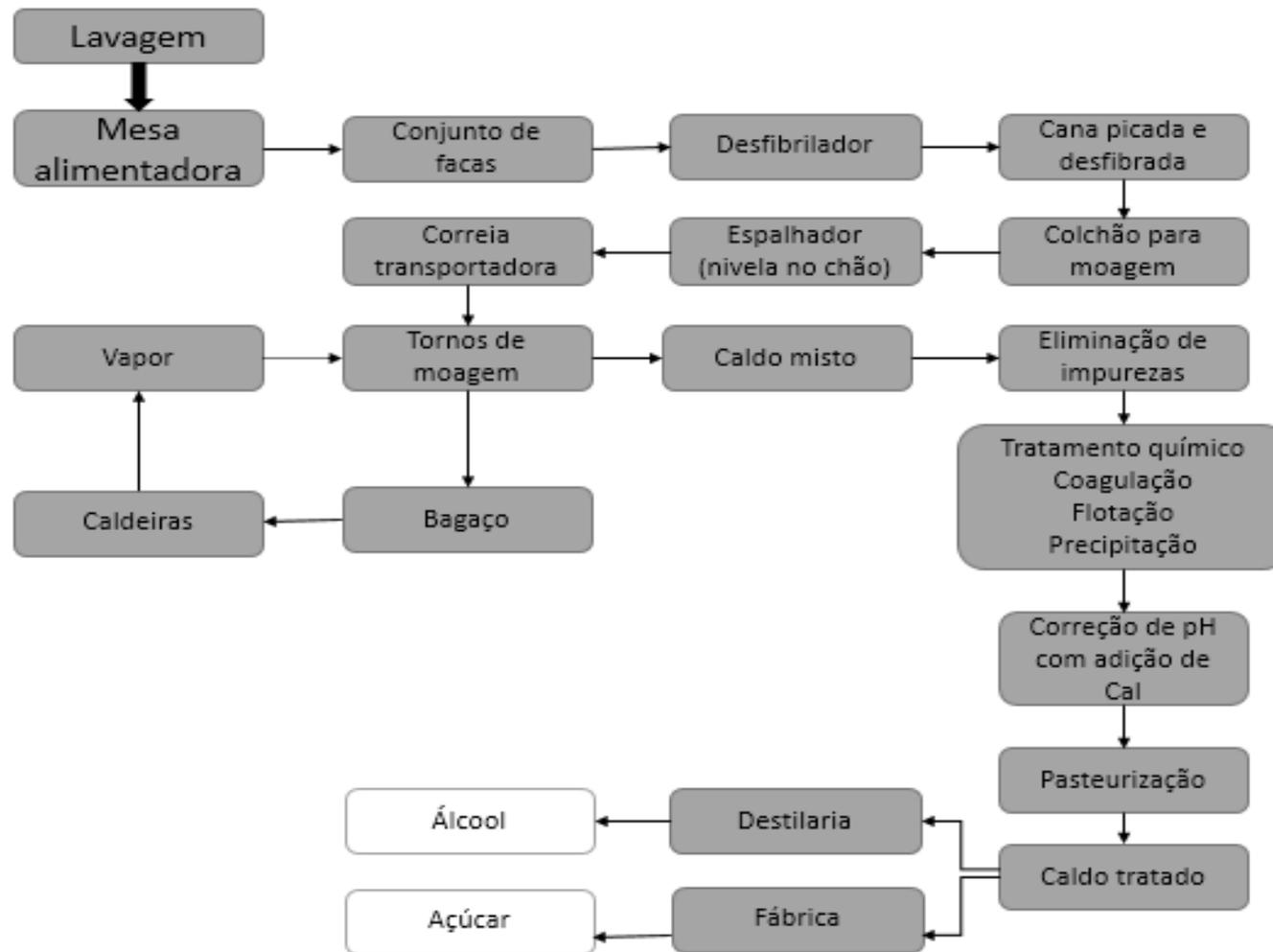


Figura 3 – Etapas de produção – usina sucroalcooleira. Fonte: Adaptado de NOVACANA (2016a).

Nas etapas de recepção, preparo e moagem, é feita a higienização da cana-de-açúcar, e em caso de ter sido cortada na colheita por maquinários, esta é feita por meio de jatos de ar com intuito de não prejudicar a sacarose da mesma (NOVACANA, 2016a). A cana então é picada e passa para a etapa de moagem, que se constitui por 4 ciclos, com os quais pretende-se separar o líquido de seu resíduo sólido, assim cerca de 70% do produto original vira caldo, enquanto os outros 30% são transferidos para caldeiras, onde viram energia em forma de vapor; etapa conhecida como cogeração de energia (NOVACANA, 2016c). Procede-se à etapa de eliminação de impurezas, pasteurização, e esse líquido final alimenta duas indústrias, a do etanol e do açúcar, seguindo por dois processos distintos.

Entre os resíduos da produção do etanol de cana-de-açúcar encontram-se: o bagaço da cana, que é utilizado como combustível em caldeiras para geração de energia elétrica e de calor; vinhaça, resultante da destilação do álcool, é destinada à irrigação de lavoura, uma vez que é rica em materiais orgânicos e água; óleo fusel, resultado da mesma fase do processo produtivo da anterior, porém este alimenta a indústria de produtos químicos e cosméticos; levedura seca, que após tratada serve de base para ração na indústria animal; torta de filtro, resíduo da filtração mecânica do lodo na fabricação do açúcar e do álcool direto, utilizada como fertilizante na lavoura ou na alimentação de animais por ser uma rica fonte de minerais (MEZARROBA *et al.*, 2010).

Além da fermentação, o processo mais usual de produção do etanol no Brasil, existem outros dois métodos. Um deles é a hidratação do etileno, na qual obtém-se o produto final por meio de reações químicas entre moléculas de água e etileno (C_2H_4); esse método requer controle em laboratório, e nos EUA é o método mais utilizado. O outro é a redução do acetaldeído (composto orgânico de fórmula C_2H_4O), produzido por meio de indução de ligações moleculares até obter a molécula final do etanol (NOVACANA, 2016c).

3 Mecanismos Regulatórios Internacionais

Este capítulo investiga duas das principais regulamentações internacionais, em um contexto histórico de implantação das mesmas, nas duas grandes potências mundiais em termos de biocombustíveis, União Europeia e Estados Unidos da América. Vale ressaltar, que de acordo com projeções, a União Europeia, os Estados Unidos e o Brasil são os três maiores consumidores de biocombustíveis e deverão representar 78% de bioetanol total e 65% de biodiesel total consumido em 2024 (OCDE/FAO, 2015). Portanto, os condutores de política nesses países são particularmente importantes em se tratando de biocombustíveis.

3.1 Mecanismo Regulatório Europeu (Diretivas Europeias)

Um grande número de acordos comunitários e internacionais foram firmados nos últimos anos pelo Governo Europeu, como o Protocolo de Quioto, de 1997, que definiu metas de redução de emissões de GEE para os países desenvolvidos. O protocolo lançou três mecanismos de flexibilização com intuito de auxiliar os países a alcançarem suas metas: Comércio de Emissões, Implementação Conjunta e Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) (BRASIL, 2015).

O MDL permite aos países pertencentes ao chamado Anexo I (países desenvolvidos), gerar ou comprar reduções de emissões de GEE certificadas de projetos de países que não pertencem a esse anexo I (ECODESENVOLVIMENTO, 2016). No caso do Comércio de Emissões, um país que tenha diminuído suas emissões abaixo de sua meta pode optar por transferir o excesso de suas reduções para outro país que não tenha alcançado tal condição, obtendo-se assim um crédito monetário em troca da redução das emissões (CENAMO, 2004).

Assim, em um retrato histórico de ações da UE ligadas à preocupação com a questão de biocombustíveis e ao apelo pelas energias renováveis, no ano de 2003 foi estabelecida a Diretiva Europeia para Biocombustíveis (Diretiva 2003/30/CE), que demonstrava preocupações com a redução da dependência de combustíveis fósseis, que à época era de 98% por parte do setor de transportes (BOURGUIGNON, 2015). Essa regulamentação reconhecia que o Protocolo de Quioto influenciava a substituição dos combustíveis fósseis por biocombustíveis. Assim, propunha a meta de que 2% de toda a matriz energética de transportes fosse de biocombustíveis até 2005 e 5,75% desta até 2010 (EUROPEAN COMMISSION, 2009c).

Entretanto, houve um insucesso na aplicação das metas dessa diretiva de 2003, visto que apenas poucos Estados-Membros foram capazes de alcançá-las. Apesar disso, surgem duas novas regulamentações no ano de 2009: a Diretiva de Energias Renováveis (Diretiva 2009/28/CE) e a Diretiva da Qualidade do Combustível (Diretiva, 2009/30/CE). Com essas novas regulamentações pretende-se atingir a todos os Estados-Membros da União, para que não haja o mesmo resultado da política anterior (EUROPEAN COMMISSION, 2011).

Assim, a Diretiva 2009/28/CE, ou *Renewable Energy Directive (EU-RED)*, está ligada aos biocombustíveis e ao avanço no consumo deles. Essa Diretiva provém de um programa da União Europeia que estabelece como um dos objetivos que 10% da energia consumida no transporte nos 28 países que formam a União tenha origem em fontes limpas até o ano de 2020. Essa energia renovável pode provir de diversas fontes, porém em setores específicos como o de transporte, o recurso chave é o biocombustível. Assim, os Estados membros são incentivados a implantarem esquemas de suporte internos que promovam o uso de energias renováveis (LENDLE; SCHAUS, 2010).

Neste sentido, a EU-RED trabalha em duas ramificações diferentes, sendo a primeira delas a crescente preocupação com o fornecimento de energia e a segunda a necessidade de redução de emissões dos GEE. Porém, para que esse fornecimento de energias renováveis ocorra de forma livre, o Artigo 17 da diretiva traz dois conjuntos de critérios de sustentabilidade para os biocombustíveis: mitigar a emissão de GEE e atender aos requisitos de uso da terra (LENDLE; SCHAUS, 2010).

Destarte, a EU-RED estabeleceu uma meta de reduzir em 6% a emissão de GEE proveniente de combustíveis utilizados no transporte rodoviário e não rodoviário. No que tange ao uso da terra, estabeleceu-se a restrição ao limite de 5% do uso de biocombustíveis provenientes de terras com culturas de alimentos (LENDLE; SCHAUS, 2010). Além disso, ela especifica o método de cálculo dos GEE como sendo a soma de alguns dos fatores presentes no ciclo de vida dos biocombustíveis, e estes são: extração do cultivo de matérias primas, mudanças no uso do solo, processamento, transporte e distribuição. Neste índice não são consideradas as emissões líquidas de gases no uso final do biocombustível, uma vez que, segundo o relatório de Lendle e Schaus (2010), são consideradas nulas, pois equivalem ao carbono consumido pelas plantas enquanto matérias primas.

De acordo com Denvir (2014) e cujos dados são apresentados na tabela 2, os critérios de sustentabilidade obrigatórios da EU-RED objetivam mitigar as emissões de GEE, proteger a biodiversidade e proibir o cultivo de matérias primas em locais com alto estoque de carbono. Porém, alguns critérios acabam ficando como secundários, e neste interim, o autor classifica-os de acordo com o nível de importância dentro da regulamentação:

- 1 Compulsório: critério mínimo de sustentabilidade que os biocombustíveis devem ter;
- 2 Flexível: Questões sobre as quais os países membros possuem flexibilidade para decidir; e
- 3 Incerto: assuntos que não foram decididos ainda. (DENVIR, 2014)

Tabela 2 – Nível de importância por critério na Diretiva Europeia

Critério	Artigo	Grupo
Critério de GEE	17 (2), 19	1
Critérios de Terra	17 (3-5)	1
Política Agrícola Comum	17 (6)	1
Desperdícios e Resíduos	17(1), 19(3), 21(2) 2	2
Relatório de Conformidade Regional	19(2)	2
Mudança indireta no uso da terra	19(6)	3
Sustentabilidade mais ampla para parte ambiental e social	17(7)	3

Fonte: (DENVIR, 2014).

Assim, dentro do processo de cálculo das emissões de GEE são levados em conta durante o ciclo de vida do produto as mudanças de uso da terra, cultivo e colheita, restos de material, transporte e estoque, produção do biocombustível e transporte até o cliente. Neste contexto, de acordo com a Tabela 2, percebe-se que a EU-RED não abrange mudanças indiretas no uso da terra (substituição de culturas alimentares por de bioenergia), além do uso do biocombustível pelo consumidor final (DENVIR, 2014). De acordo com Lendle e Schaus (2010), ainda não está claro se e como a UE pode mudar seus critérios de sustentabilidade para levar em consideração mudanças indiretas no uso da terra, mas uma opção seria adicionar emissões

causadas pela mudança no uso da terra específico para a produção dos biocombustíveis.

A Diretiva 2009/28/CE aponta que as metas de aumento na utilização de energias renováveis devem ser compartilhadas entre os Estados-Membros de modo a tornar a quota ponderada em função do Produto Interno Bruto (PIB) além de levar em consideração o consumo bruto final de energia de cada país. A meta de consumo de 10% de energia proveniente de fontes renováveis para o setor de transporte é aplicável a todos os Estados-membros, por meio da alegação de que se o Estado não prover dessas fontes renováveis, existe uma facilidade em adquirir de outros Estados-Membros que a tenham em excesso (EUROPEAN COMMISSION, 2009a).

A Diretiva sobre a qualidade dos combustíveis (Diretiva 2009/30/CE), por sua vez, também fixa os critérios correspondentes no que diz respeito aos biocombustíveis, tendo por exigência a redução de 6% das emissões de GEE até 2020, comparado a 2010 (metas indicativas de 2% para 2014 e 4% para 2017); e redução 2% em emissões de GEE para novas tecnologias em desenvolvimento, como captura e armazenagem de CO₂, também comparado ao ano de 2010 (EUROPEAN COMMISSION, 2009b).

Assim, os critérios de sustentabilidade de ambas as Diretivas Europeias tangem três principais assuntos que são: redução das emissões de GEE, Biodiversidade e Uso do solo, conforme Tabela 3, abaixo.

Tabela 3 – Critérios de Sustentabilidade das Diretivas Europeias

Critérios de sustentabilidade para as Diretivas Europeias	
Redução de emissões de GEE	Mínimo de 35% de redução de GEE; redução de 50% em 2017; redução de 60% a partir de 2018, para novas instalações, comparados com os combustíveis fósseis que vão substituir
Biodiversidade	Não serem produzidos a partir de matérias primas obtidas em área de elevada biodiversidade, incluindo floresta primária
Uso do Solo	Não serem produzidas a partir de matérias primas obtidas em solos com elevado teor de carbono; por exemplo, áreas pantanosas, turfeiras e áreas florestais.

Fonte: Adaptado de ENMC (2016).

Em termos de biodiversidade, os critérios de sustentabilidade escolhidos deverão considerar as zonas florestais primárias, isto é, as zonas florestais que se encontrem protegidas por legislação nacional de proteção da natureza. Deverão ser incluídas as zonas em que se procede a recolha de produtos florestais não lenhosos, desde que o impacto humano seja reduzido. As categorias abrangidas por esse critério são:

- a. Floresta primária e outros terrenos arborizados, isto é, floresta e outros terrenos arborizados de espécies indígenas, caso não haja indícios claramente visíveis de atividade humana e os processos ecológicos não se encontrem significativamente perturbados;
- b. Zonas designadas:
 - i. Por lei ou pela autoridade competente para fins de proteção da natureza, ou
 - ii. Para a proteção de espécies ou ecossistemas raros, ameaçados ou em risco de extinção, reconhecidas por acordos internacionais ou incluídas em listas elaboradas por organizações intergovernamentais ou pela União Internacional para a Conservação da Natureza, sem prejuízo do seu reconhecimento nos termos do segundo parágrafo do nº 4 do artigo 18º, a menos que se comprove que a produção das referidas matérias-primas não afetou os referidos fins de proteção da natureza;
- c. Terrenos de pastagem ricos em biodiversidade, isto é:
 - i. Terrenos de pastagem naturais, ou seja, que continuariam a ser terrenos de pastagem caso não tivesse havido intervenção humana, e que mantêm a composição de espécies e as características e processos ecológicos naturais, ou
 - ii. Terrenos de pastagem não naturais, ou seja, terrenos de pastagem que deixariam de ser terrenos de pastagem caso não tivesse havido intervenção humana, com grande variedade de espécies e não degradados, a menos que se comprove que a colheita das referidas matérias-primas é necessária para a preservação do seu estatuto de terrenos de pastagem. (EUROPEAN COMMISSION, 2009b).

Além disso, terrenos com alto estoque de carbono devem ser evitados, uma vez que, se forem utilizados para o cultivo das matérias-primas que dão origem aos biocombustíveis, em geral esse carbono será liberado na atmosfera, conduzindo à formação de dióxido de carbono, o que acabaria por trazer impactos negativos que podem neutralizar os impactos positivos da utilização dos biocombustíveis (EUROPEAN COMMISSION, 2009b).

A produção de culturas para biocombustíveis pode induzir a mudanças no uso da terra, o que pode levar ameaças à segurança alimentar. Porém, outros motivos

podem levar a essa consequência e o monitoramento dessas mudanças de culturas tanto dentro quanto fora da UE é algo complexo. Alguns levantamentos apontaram para um aumento nos valores dos alimentos, mas isso não pôde ser atribuído exclusivamente a produção de biocombustíveis, uma vez que a escassez de água no mundo também pode ser um motivo para essa constatação. Nem mesmo é possível atribuir o aumento no valor dos alimentos à um fator negativo, uma vez que o produtor pode estar gerando mais renda a si com essa mudança (BOURGUIGNON, 2015).

Neste sentido, a Diretiva de Energias Renováveis (Diretiva 2009/28/CE) tem sido amplamente criticada por acadêmicos, visto que não leva em consideração em sua metodologia de cálculo das emissões de GEE causadas pelas mudanças no uso da terra, que resultam principalmente da oxidação de carbono orgânico do solo e da queima ou decomposição da vegetação. As emissões de mudanças no uso da terra devido à produção de biocombustíveis representam cerca de 1% das emissões totais devido a mudanças no uso da terra (BOURGUIGNON, 2015). De acordo com Fritsche et al. (2011), a maior expansão em terras agrícolas voltadas para a produção de bioenergia ocorrerá no Brasil, seguido pela UE como o segundo maior impacto. Assim, o mandato de biocombustíveis na UE assumiu que faria uma expansão de área plantada mundial de 0,8 para quase 1 milhão de hectares, isto representa uma quota de 0,07% a 0,08% da área cultivada total mundial até 2020.

3.2 Mecanismo Regulatório Norte Americano (Renewable Fuel Standard 2 -RFS2)

Os Estados Unidos da América apresentam uma regulamentação promovida e implementada por sua Agência de Proteção Ambiental (EPA); o RFS2 trata-se de uma expansão do RFS1, que busca aumentar a quantidade mandatória de volume de biocombustíveis presentes no combustível até o prazo de 2022.

O RFS2 é uma regulamentação que impõe que o consumo anual de biocombustível deve ser de 36 bilhões de galões de biocombustíveis dentro dos EUA até o ano de 2022. Desse montante, 15 bilhões de galões deverão ser de biocombustíveis convencionais, provavelmente de etanol a partir do grão de milho. Os restantes 21 bilhões de galões deverão ser de biocombustíveis avançados, provenientes de fontes diferentes dos grãos de milho. Desses, 16 bilhões litros deverão ser biocombustíveis de celulose derivada, hemicelulose, lignina (KEELER et al., 2013).

As matérias-primas para estes biocombustíveis avançados incluem resíduos vegetais (por exemplo, palha de milho, palha de cereais de grão e resíduos florestais), culturas energéticas (por exemplo, gramíneas e de álamo híbrido), e outras fontes de biomassa (por exemplo, resíduos sólidos urbanos e algas). O outro 1 bilhão de galões de biocombustíveis avançados serão de biomassa de diesel, biodiesel produzido principalmente a partir de óleo de soja, outros óleos vegetais e gorduras animais. O cumprimento de metas do RFS2 iria aumentar a quota de combustível renovável em volume de cerca de um quarto da gasolina EUA até 2022 (KEELER et al., 2013).

É de responsabilidade da EPA garantir que haja um volume mínimo de biocombustível presente em energias utilizadas para o transporte (EPA, 2010). Essa regulamentação influencia o aumento no consumo dos biocombustíveis, porém apresenta alguns critérios de sustentabilidade para o consumo destes, que são conhecidos como restrições; estas estabelecem práticas sustentáveis no processo produtivo do biocombustível para sua comercialização dentro do país. Esses critérios são relacionados:

- i. Às emissões de GEEs de combustíveis renováveis;
- ii. Aos tipos de matéria-prima utilizadas;
- iii. Aos tipos de terra que podem ser utilizados para o plantio e colheita das matérias-primas (mudança e uso da terra direto e indireto). (NL AGENCY, 2011).

Cumpra salientar que estes dois últimos critérios se combinam em um, formando a biomassa renovável, que é a matéria-prima dos biocombustíveis. Assim, quanto a matéria prima utilizada, se a mesma for de origem agrícola, as terras onde elas são cultivadas serão monitoradas pela EPA; se forem de origem não agrícola (florestas), elas devem estar de acordo com as normas especificadas para esse tipo de extração (NL AGENCY, 2011).

Além do incremento na mistura mandatória presente no combustível comercializado, o RFS1, criado em 2005, se difere do RFS2, de 2010, na criação da classificação dos biocombustíveis, que passaram a estar em quatro diferentes ramos, de acordo com a porcentagem de redução das emissões de GEE em relação a gasolina, sendo o primeiro deles relacionado aos combustíveis renováveis tradicionais, que representam uma redução de até 20% (etanol de milho, sorgo), o segundo abrange os biocombustíveis avançados, redução de até 50%

(etanol de cana-de-açúcar, gás liquefeito), o terceiro são os combustíveis diesel de biomassa, redução de até 50% (proveniente de óleo de soja, canola, alga) e por último os biocombustíveis celulósicos, redução de até 60% (proveniente de materiais celulósicos, como gramíneas) (SCHNEPF; YACOBUCCI, 2013). A Figura 4 demonstra essa classificação de acordo com o tipo de biocombustível.

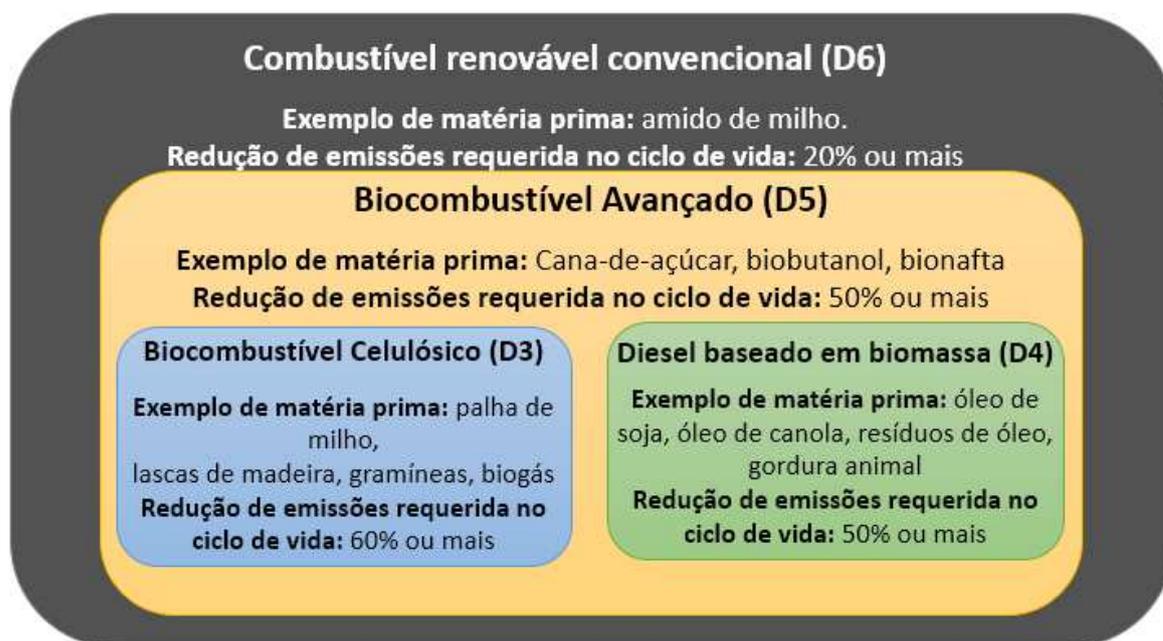


Figura 4 - Esquema dos combustíveis renováveis – RFS2.

Fonte: Adaptado de EPA, 2014.

Deste modo, para fins de cálculo das emissões de GEE, os componentes considerado no ciclo de vida dos biocombustíveis são:

- a) Produção da matéria prima: são considerados os impactos diretos e indiretos do crescimento das matérias-primas, tanto para as produções nacionais, quanto importadas. Entres os pontos analisados estão o uso de fertilizantes e energia;
- b) Mudanças no uso da terra: esse componente está relacionado a mudanças no uso da terra devido ao incremento da demanda de biocombustíveis por parte dos EUA, para iniciar um cultivo de produto agrícola, que pode acabar por aumentar as emissões de GEE;
- c) Transporte de matéria prima: é o transporte da matéria prima do campo para o ponto de beneficiamento e do ponto de beneficiamento para o ponto de uso desta;
- d) Processamento: esse componente varia de acordo com o número de suposições e no número de variáveis associadas nas produções domésticas e internacionais;

- e) Transporte do combustível: neste ponto são consideradas as emissões de transporte e distribuição;
- f) Tubo de escape de combustão: emissão da combustão dos biocombustíveis é baseado no teor de carbono presente em cada um dos combustíveis. (FEDERAL REGISTER, 2009).

Apesar de parecem preocupações ambientais, de acordo com Grisoli (2011) essa normativa apresenta um caráter voltado para a segurança energética do país, uma vez que seus objetivos estão ligados a uma maior independência e segurança energética para os EUA. A Figura 5 apresenta os limites de cálculo das emissões de GEE, além disso aponta as diversas metodologias utilizadas pelo mesmo.

De acordo com a EPA (2010) atualmente não existe um modelo único que capte todas as interações complexas associadas à estimativa das emissões de GEE do ciclo de vida dos biocombustíveis, levando em conta as exigências de mensuração das emissões indiretas, tais como as de mudanças no uso da terra, requeridas pela EISA.

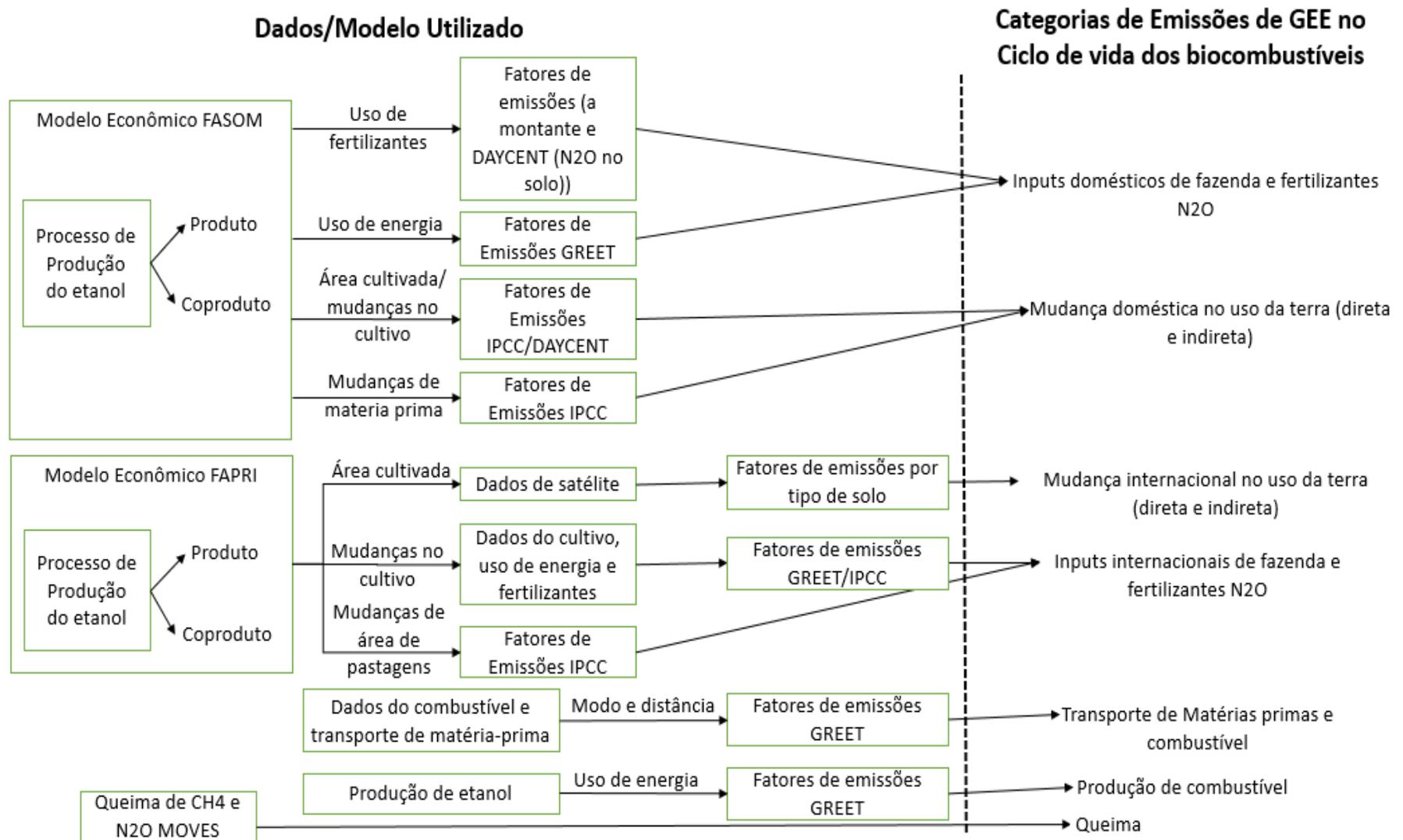


Figura 5 – Limites de cálculo das emissões de GEE: fronteiras do sistema e modelos utilizados. Fonte: Adaptado de (EPA, 2010).

4 Sistemas de Certificação

Com o aumento da produção e utilização de biocombustíveis e de bioenergia em decorrência da necessidade de mitigação de mudanças climáticas, o desenvolvimento sustentável e a segurança do abastecimento de energia tem iniciado um aumento dramático no número de certificações. Tais sistemas estabelecem padrões que geralmente incluem uma série de princípios, critérios e indicadores, regulamentados pelos governos e/ou mercados (MAKIYA, 2015).

De acordo com Hatanaka (2010), um sistema de certificação elabora padrões, a fim de garantir que os produtos possuam os atributos que são reivindicados. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT (2014)) afirma que se trata de uma avaliação feita por um terceiro, seja ela por meio de auditorias no processo produtivo, na coleta e em ensaios de amostras, onde é possível atestar se um padrão vem sendo seguido.

Em termos ambientais foram criados sistemas de certificação de Sistemas de Gestão Ambientação (SGA), baseados em normas internas, amplamente utilizados por empresas que querem ter uma imagem positiva quanto à responsabilidade social. Assim, internacionalmente destacam-se a ISO 14001 e o Eco Management and Audit Scheme – EMAS (Esquema de Auditoria e Gestão Ecológica) (HERAS-SAIZARBITORIA et. al., 2015).

A ISO 14001 é uma certificação que apresenta padrões e normas de gestão ambiental que podem ser aplicados em qualquer tipo de organização pública ou de setores privados. Assim, ela serve como apoio à implementação de ações de apoio ao desenvolvimento sustentável. No ano de 2014 haviam cerca de 324.148 certificados no mundo pela ISO 14001, as principais regiões certificadas eram Ásia Oriental e América do Norte (ISO, 2014).

Já a EMAS é uma ferramenta de gestão ambiental voluntária disponível para qualquer tipo de organização; parte de um sistema harmonizado de regras da UE com os objetivos de: melhorar o seu desempenho ambiental, reduzindo os impactos na natureza e no sistema financeiro; garantir a credibilidade e confiabilidade do sistema de certificação controlado pelos Estados-Membros da EU; fornecer informações publicamente disponíveis sobre o desempenho ambiental de uma organização (HERAS-SAIZARBITORIA et al., 2015).

Tanto nas certificações EMAS como na ISO, tem-se presente o ciclo PDCA (planejar (plan), fazer (do), checar (check) e agir (act)) e especifica os requisitos mais importantes para identificar, controlar e monitorar os aspectos ambientais das organizações, bem como a forma de gerir e melhorar os sistemas de gestão ambiental (EUROPEAN COMMISSION, 2015).

Neste sentido existem inúmeras certificações do setor agrícola pulverizadas em diversos países. Como exemplo, na Alemanha há a International Sustainability & Carbon Certification e no Reino Unido a Road Fuel Transport Obligation, sendo que algumas delas são de viabilidade regional e outras global. Vale ressaltar que, se a certificação é necessária, é também necessário incorporar um sistema de rastreio para garantir que remessas de produtos são identificados ao longo do processo de transporte e distribuição (REIN, 2011).

4.1 Bonsucro

O sistema de certificação Bonsucro (Better Sugarcane Initiative) é uma associação entre *stakeholders* cujo objetivo é o de minimizar impactos ambientais e sociais da produção de cana-de-açúcar, por meio da adoção de padrões de desempenho. Esta instituição procura oferecer mecanismos para o alcance da produção sustentável de acordo com o tripé da sustentabilidade, baseado nas partes econômico, social e ambiental (ENGELBRECHT, 2012).

O Sistema de Certificação Bonsucro faz uma distinção entre duas (2) opções de certificação (BONSUCRO, 2015):

1. “Bonsucro”: em conformidade com as exigências Bonsucro, que utiliza uma versão adaptada do GREET; e
2. “Bonsucro UE”: em conformidade com as exigências Bonsucro além de exigências adicionais que são necessárias para o cumprimento da EU-RED (em conformidade com a Diretiva Europeia de Energia Renovável (RED) 28/2009/EC - as suas disposições similares na Diretiva da Qualidade do Combustível da UE (FQD) 2009/30/CE), que utiliza o modelo Bioenergy Greenhouse Gas Emission (BioGrace).

Neste sentido, os objetivos da Bonsucro tangem o ideal de criar princípios, critérios e indicadores, mundialmente aceitos, baseados no desempenho, além de

criar padrões para a produção da cana-de-açúcar. Esse sistema é composto por três documentos base (BONSUCRO, 2015):

1. Padrões: Bonsucro desenvolveu dois (2) padrões:

- O “ Padrão de Produção Bonsucro” contém os princípios e critérios para uma produção sustentável de cana-de-açúcar e todos os produtos derivados da cana-de-açúcar em relação às dimensões econômicas, sociais e ambientais; e

- O “ Padrão da Cadeia de Custódia de Balanço de Massa Bonsucro” contém um conjunto de requisitos técnicos e administrativos para habilitar o rastreamento de declarações/reivindicações sobre a produção sustentável de cana-de-açúcar Bonsucro e todos os produtos derivados da cana-de-açúcar ao longo de toda a cadeia de abastecimento, desde os campos até as usinas, incluindo o transporte; através da produção (por exemplo, conversão, transformação, fabricação, transformação), até o armazenamento, transporte e comércio, ao uso da cana-de-açúcar e todos os produtos derivados da cana.

2. Orientação para implementação: fornecem mais informações sobre como estar em conformidade com o Padrão de Produção Bonsucro e/ou Cadeia de Custódia.

3. Protocolo de Certificação: criado para auditores, pois lista o processo e os procedimentos para a certificação nos Padrões Bonsucro.

Neste sentido, os requisitos de avaliação da certificação Padrão Bonsucro obedecem aos requisitos e indicadores listados abaixo (ENGELBRECHT, 2012):

1. Cumprir a lei: neste quesito, os auditores vão até as zonas de plantação e buscam verificar se os requisitos legais aplicáveis a região vem sendo cumpridos; para tal, são feitas amostragens periodicamente;

2. Respeitar os direitos humanos e trabalhistas: este princípio busca garantir o cumprimento das convenções estabelecidas pela Organização Internacional do Trabalho, no que tange a garantia de segurança e salubridade no trabalho;

3. Gerenciar eficiências de insumos, produção e processamento de modo a aumentar a sustentabilidade: inserem-se aqui as preocupações ligadas ao meio ambiente e à eficiência no processo produtivo, buscando mitigar a emissão dos GEE. Conforme visto da certificação EU-RED, cada instituição apresenta sua metodologia de cálculo dos gases de efeito estufa. No caso da Bonsucro o cálculo incorpora os efeitos da produção de fertilizantes. Portanto, nas operações agrícolas inclui-se o valor das aplicações de produtos químicos, irrigação, plantio, colheita, o transporte de cana

para as usinas e o processamento da mesma. Além disso, pode incluir também a exportação de energia elétrica ou bagaço (BONSUCRO, 2015);

4. Gerenciar ativamente a biodiversidade e serviços do ecossistema: este princípio busca avaliar quais são os impactos locais da plantação de cana-de-açúcar sobre o ecossistema, bem como delinear se existem prejuízos hídricos e/ou sobre os solos, dadas as aplicações constantes de herbicidas e fertilizantes. Deste estudo, é produzido um Plano de Gerenciamento Ambiental (PGA) contendo informações relevantes sobre o meio ambiente local;

5. Melhorar constantemente as áreas chaves do negócio: este princípio traz uma mistura dos demais, uma vez que busca enfatizar a importância de constantes melhorias nos quesitos estudados acima; e

6. Critérios adicionais e obrigatórios para o cumprimento das Diretivas da UE para Energias Renováveis (2009/28/EC) e sobre Qualidade dos Combustíveis (2009/30/EC): neste interim foram incluídos critérios de monitoramento de emissões de GEE e critérios de proteção a biodiversidade. Este item existe apenas para o Padrão Bonsucro EU RED (BONSUCRO, 2015).

No documento Padrão de Produção Bonsucro, a unidade certificada é a usina de cana-de-açúcar, e as auditorias serão baseadas em auditorias na usina e na área fornecedora de cana. Já no caso Padrão para Cadeia de Custódia, a unidade de certificação será todos os operadores econômicos após a usina e sua base de fornecimento de cana, desde que seja um membro registrado da Bonsucro; a Certificação em Grupo não é permitida (FERREIRA, 2012).

A Bonsucro apresenta uma calculadora que é usada como a principal ferramenta para avaliar o desempenho de sustentabilidade e demonstrar a conformidade com o Padrão Bonsucro de produção. A Calculadora Bonsucro está em Excel, e requer dados de produção da fábrica, de fornecimento de cana e área das fazendas. A mesma está estruturada de acordo com os critérios de sustentabilidade da Bonsucro, sendo os critérios adicionais do Bonsucro-EU-RED estão localizados ao final, com orientações de fazer os cálculos da emissão de GEE pela calculadora da BioGrace e plotar somente os resultados.

Vale destacar que as dimensões da Bonsucro são de 56 unidades certificadas de produção a nível mundial, mais de 1 milhão de hectares de cana de açúcar certificadas, o que representa 4,43% da superfície global plantada em cana.

No que tange o etanol produzido a partir da cana-de-açúcar, são produzidos cerca de 2.780.982 metros cúbicos certificados (BONSUCRO, 2016).

5 Análise e apresentação dos métodos

Um dos objetivos do trabalho é o de desenvolver um quadro analítico comparativo entre as metodologias de cálculo de emissões de GEE, GREET e BioGrace, para a identificação de suas particularidades no âmbito da certificação para etanol de cana-de-açúcar pela Bonsucro. Ademais, objetivou-se fazer recomendações sobre a harmonização de um modelo padrão único que contemplasse as duas diferentes metodologias para o cálculo das emissões de GEE, em especial, para o etanol de cana-de-açúcar brasileiro. Dessa forma, foi desenvolvido um levantamento das metodologias de mensuração das emissões baseando-se na ACV do etanol, utilizando essas duas metodologias citadas por meio das ferramentas disponíveis online nos respectivos sites, além da substituição dos dados das médias das usinas do Estado de São Paulo com intuito de fomentar essa discussão.

De acordo com Marconi e Lakatos (2010), o método comparativo constitui uma experimentação direta, a qual se pode fazer por meio de dados qualitativos e quantitativos. Além disso, esse método pode ser atrelado a outros e no presente trabalho foi usado o método descritivo junto ao comparativo a fim de analisar os elementos de estrutura das ações governamentais internacionais abordadas, RFS2 e EU-RED. Esses elementos de estrutura são os processos envolvidos na análise do ciclo de vida, conhecidos como fronteiras do sistema, das ações governamentais analisadas.

Fez-se uso também do método Indutivo (MARCONI; LAKATOS, 2003), que se constitui pela divisão da análise em três fases, sendo a primeira delas a de observação dos fenômenos estudados, passando à descoberta da relação entre eles, e, por fim, a generalização da relação, ou seja, uma classificação dos processos. Em suma, desenvolveu-se uma análise holística do ciclo de vida considerado em cada uma das ações regulamentares e metodologias de cálculo estudadas, com a finalidade de delinear possíveis interpretações diversificadas quanto aos biocombustíveis.

A figura 6 resume as etapas feitas neste estudo para obter os resultados aferidos, cuja primeira etapa constituiu-se pela definição clara do objetivo do estudo, seguindo para os levantamentos de dados qualitativos (documentos) e quantitativos (ferramentas de cálculos das emissões de GEE), passando pela etapa de classificação das fases do ciclo de vida e finalmente os resultados obtidos.

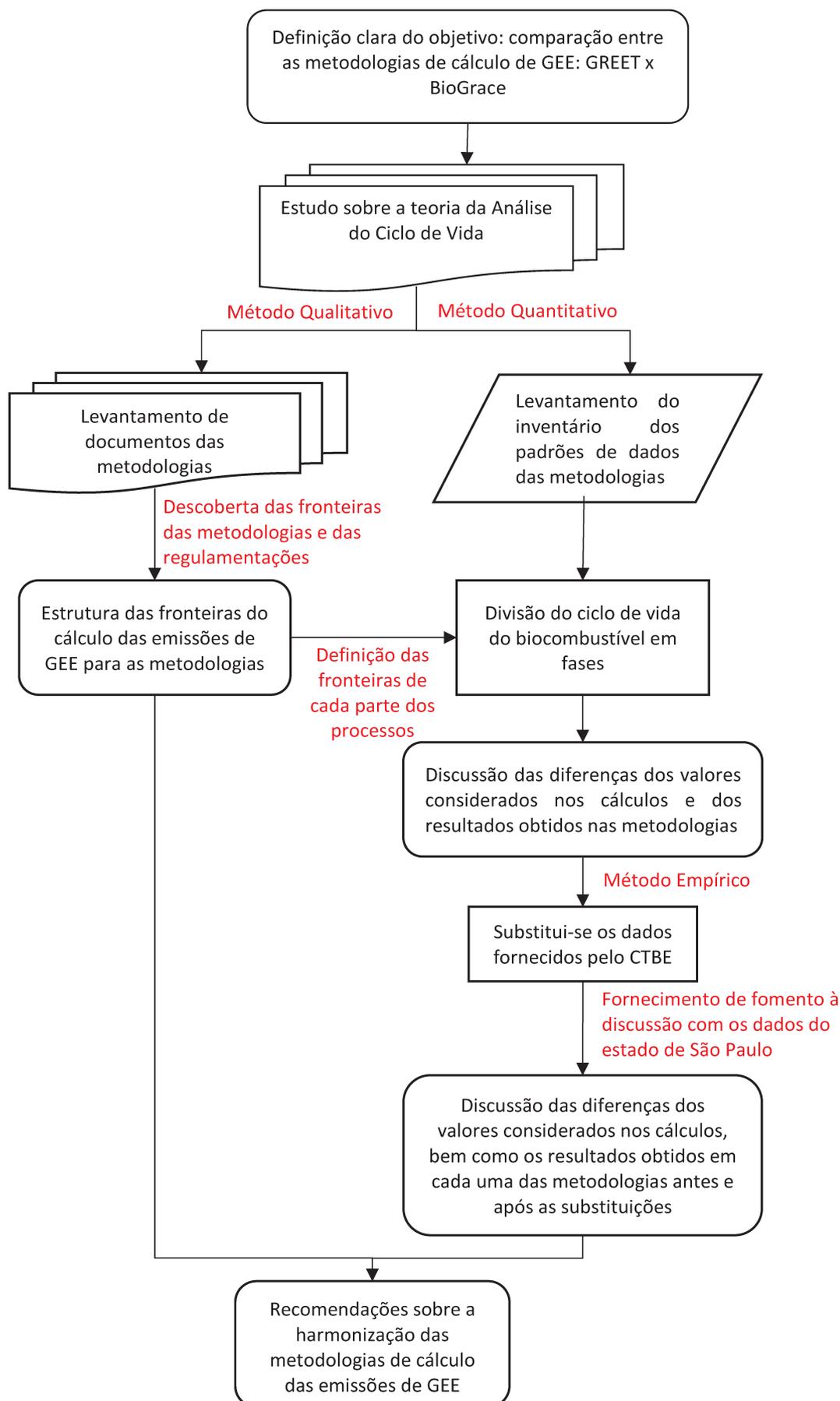


Figura 6 – Fluxograma das etapas do estudo. Elaboração própria.

Assim, para atingir o objetivo proposto, o estudo apresentou uma abordagem qualitativa, no sentido de promover um conhecimento mais aprofundado das metodologias de cálculo, bem como das fronteiras de emissões de GEE consideradas nas regulamentações internacionais. A coleta de informações embasou-se na pesquisa bibliográfica e documental relacionada às fronteiras do sistema de mensuração das emissões. Esse estudo contou também com uma leitura detalhada sobre o estado da arte da metodologia utilizada quando se trata de emissões, a Análise do Ciclo de Vida, encontrada em documentos da ISO e ABNT e outros estudiosos da área.

Apresentou-se ainda no presente estudo uma abordagem quantitativa, pois fez-se um levantamento do inventário padrão presente em cada uma das metodologias estudadas, analisando as variáveis de emissões presentes nas etapas do ACV do bioetanol. Uma das partes mais importantes do inventário é a verificação da unidade funcional dos valores. As quantidades de *inputs* e *outputs* devem ser baseadas nessa unidade, como a unidade tonelada de cana, ou hectare. Assim, é necessária atenção no momento de agregar dados, pois os impactos gerados por aquele processo devem ser relacionados aquela fase (ISO, 2006). No caso deste estudo foram consideradas as unidades de toneladas/hectare para a quantidade produzida de cana de açúcar por área; para o uso de fertilizantes e produtos agrícolas serão utilizados kg/toneladas, ou seja, toneladas de cana produzidas por quilo de produto utilizado; e após os cálculos das emissões para cada metodologia utilizada em gramas de CO_{2eq}/MJ, são emissões de GEE causadas pelo CO₂, CH₄, N₂O e, expressas em emissões de gramas de CO₂-equivalente, utilizando os potenciais de aquecimento global do CH₄ e N₂O, por *Mega Joule* de combustível gerado. Visto que cada uma das partes do processo produtivo emite uma quantidade de gases considerados para o efeito estufa, os gases considerados para efeito de equivalência de CO₂ são: CO₂, N₂O e CH₄ (EUROPEAN COMMISSION, 2009c).

Assim, fez-se um levantamento dos inventários das duas metodologias de emissões de GEE por meio das versões mais recentes de calculadoras disponíveis – GREET e BioGrace – para o etanol de cana-de-açúcar, e por meio da ACV dividiu-se esta em etapas de análise, sendo: Cultivo da cana de açúcar, Transporte da matéria-prima, Produção de etanol, Transporte e distribuição de etanol e Utilização, afim de se detectar as participações de cada uma das etapas no resultado final das emissões e buscar diferenças em valores absolutos nas duas metodologias de cálculo.

A utilização de fertilizantes e pesticidas na plantação de cana-de-açúcar e a consequente liberação de gases como óxido nitroso e metano foi incluída na etapa de cultivo; além disso, esta fase englobou a prática de queimadas para a colheita de parte da cana-de-açúcar e o transporte da cana colhida no campo até a usina para a preparação da matéria-prima para produção do etanol.

A etapa seguinte constituiu a fase industrial, ou seja, a produção do etanol de cana, onde considerou-se a utilização de energia, que move a usina produtora, porém, constatou-se que a energia gerada pela queima do bagaço da cana é suficiente para esse movimento, o que faz com que as emissões sejam consideradas nulas em ambos os modelos. O processo industrial mais comum utilizado pelas usinas é o de fermentação. Após a fermentação, ocorre a desidratação, onde há duas opções de produtos que ajudam na precipitação do processo: a cal e os ciclohexanos. Além da fermentação, existem alguns processos mais complexos, por meio de reações químicas, com a utilização de ácido sulfúrico (H_2SO_4), ou o ácido fosfórico (H_3PO_4) (NOVACANA, 2016b).

As duas últimas etapas consistem na distribuição, que envolve tanto o transporte terrestre, quanto o marítimo, visando a exportação e distribuição do biocombustível, e, por conseguinte, sua utilização. Na fase de uso, observa-se como entrada do sistema o biocombustível, e como saídas os gases da combustão.

Além disso, para entender como são realizadas as alocações dos impactos para a energia excedente produzida nas usinas, a partir da queima do bagaço da cana-de-açúcar, fez-se o estudo e levantamento, por meio do inventário de emissões, de como esse processo é realizado em cada uma das metodologias estudadas, com intuito de compará-las.

Por último, no detalhamento da análise comparativa e empírica das metodologias, substitui-se os dados da média das usinas do Estado de São Paulo, fornecidos pelo CTBE com intuito de fomentar uma discussão mais aprofundada das metodologias estudadas, sendo que previamente foram feitas as devidas conversões de unidades de medida, muitas vezes diferentes no âmbito das metodologias analisadas. Após análise de todo esse conteúdo, apresentou-se as recomendações sobre a harmonização de um modelo padrão único que contemplasse as duas diferentes metodologias para o cálculo das emissões de GEE.

5.1 Análise do Ciclo de Vida

Conforme visto nos capítulos anteriores, os cálculos das emissões de GEE tanto pelas regulamentações, quanto pela certificação baseiam-se na ACV. Em uma análise metodológica, os elementos da ferramenta ACV são parcialmente ou totalmente estabelecidos, ou existem regras a respeito de como determina-los. Assim, a ACV é uma avaliação do produto levando em conta seus impactos sobre o meio ambiente e sobre a saúde humana, portanto aspectos econômicos e sociais, em sua maioria, não são considerados (KALTSCHMITT *et al.*, 1997).

De acordo com Cherubini e Strømman (2011), os resultados da ACV podem ser agrupados em três categorias:

- Equilíbrio energético, cujo objetivo é de quantificar possíveis economias de energia no sistema, assim, normalmente são avaliadas as entradas ao longo da cadeia de energia;
- Balanço de GEE, estudos anteriores relacionados a ACV relatam como resultados diferentes índices e indicadores alcançados por meio de diversos modelos de análise e estudos, com diversas unidades funcionais o que significa que muitas vezes eles não são diretamente comparáveis; e
- Outros impactos no meio ambiente: esses impactos podem relatar externalidades ao ciclo de vida de humanos e toxicidades ao ecossistema. Um exemplo é o caso de uso de fertilizantes que contaminam o solo, lençóis freáticos e atmosfera. Neste caso, o balanço do ciclo de vida dos combustíveis renováveis em relação aos combustíveis fósseis deve ser positivo, porém tudo depende das escolhas de processos utilizados no ciclo de vida do mesmo (VON BLOTTNITZ; CURRAN, 2007).

A ACV deve fornecer uma análise holística sobre o produto, levando em conta potenciais impactos de todas as fases de vida do produto; desde a produção até a gestão do final de vida do mesmo. Assim, essa ferramenta serve de análise para tomadas de decisões, e deve oferecer dados concisos de modo a alcançar os objetivos desejados. Visando tornar essa análise cada vez mais padronizada, a *Organization for Standardization* (ISO) criou a série de normas da ISO 14040, cujos elementos podem ser divididos basicamente em quatro: (1) definição do objetivo e escopo do estudo; (2) identificação e quantificação do meio ambiente envolvido; (3)

avaliação do potencial de impactos nesse meio; (4) análise das opções disponíveis para reduzir os impactos ambientais (VON BLOTTNITZ; CURRAN, 2007).

Assim, entre as fases da ACV de acordo com a norma ISO 14040 são: definição clara e concisa sobre o âmbito do estudo; após verifica-se a fase de análise do inventário, ou seja, momento em que as entradas e saídas do sistema serão identificadas e quantificadas, assim essa fase caracteriza-se por uma série de etapas elencadas hierarquicamente, de modo a estabelecer uma ordem de ação, ficando configurada da seguinte maneira: arquitetura de uma árvore de processos; definição dos limites do sistema (do produto com o ambiente e do produto com outros sistemas de produto); finalização dos limites do sistema; coleta de dados; procedimentos de cálculos; análise dos resultados, e interpretação do ciclo de vida (ABNT, 2001).

Existem diversas aplicações para a metodologia de ACV, como: avaliação de risco, avaliação de desempenho ambiental, auditoria ambiental e avaliação de impacto ambiental. A aplicação da ACV no Brasil data de 1990, com a criação de subcomitê da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), que integrou o grupo ISO, na criação da norma 14000. No ano 2002 foi criada a Associação Brasileira de Ciclo de Vida, liderada por grupos de pessoas físicas e jurídicas, que se interessavam pelo desenvolvimento e aplicação da técnica ACV (WILLERS *et al.*, 2013).

A modelagem de ciclo de vida dos combustíveis de transporte, muitas vezes referida como ciclo do combustível, avalia os impactos líquidos de um combustível ao longo de cada etapa de sua produção e utilização incluindo a produção/extração da matéria-prima, o transporte de matéria-prima, produção, transporte e distribuição do combustível, e a vazão de poluentes pelo tubo de escape. O uso de uma abordagem de ciclo de vida para analisar diferentes combustíveis para transporte requer modelagem e avaliação de muitos fatores de entrada e saídas diferentes (EPA, 2010).

A estrutura da ACV é definida como fronteiras do sistema (limites) e inventário do ciclo de vida, que variam de acordo com a pesquisa em particular que se está executando. Assim, as fronteiras do sistema se alocam nas dimensões espacial, temporal e nos limites da cadeia de produção do sistema analisado. Partindo do cultivo da planta, o menor dos sistemas deve incluir o rendimento das culturas de biocombustíveis, onde deve ser incluso o sequestro de CO₂ por parte da planta, bem

como a adubação com óxido de nitrogênio e a conversão deste em dióxido de carbono equivalente (DAVIS *et al.*, 2009).

O inventário do ciclo de vida é uma lista de componentes que são incluídos como parte do sistema, de modo que em uma ACV deve-se deixar claro quais são as entradas e saídas requeridas pelo sistema para calcular cada etapa da cadeia de produção dos biocombustíveis; isso porque os componentes desse cálculo influenciam o resultado final do balanço das emissões de GEE. Por exemplo o fato de alguns cálculos não considerarem mudanças no estoque de carbono no solo ou na biomassa podem causar diferenças no cálculo das emissões (DAVIS *et al.*, 2009).

De acordo com Hu *et al.* (2008) a ACV tornou-se uma ferramenta de tomada de decisão, uma vez que estuda os biocombustíveis em termos de eficiência energética, impactos ambientais e apresenta uma análise sobre os custos e benefícios de uma determinada política de incentivo ao consumo de biocombustíveis.

5.1.1 Sistemas de Alocação

Os métodos de alocação estão inseridos na fase de coleta de dados e cálculos, e ocorrem em casos em que o processo resulte em mais de um produto, conhecido como sistema de múltiplos produtos. Desta forma, os fluxos de energia e materiais devem ser alocados de acordo com a fase do processo em que se encontram, e para que finalidades são instituídos (ABNT, 2001). As entradas e saídas atribuídos a cada um dos produtos de um ciclo produtivo devem ser alocados de acordo com o processo produtivo desses no sistema, de modo que venha a garantir que a soma do sistema como um todo seja a mesma antes e após as alocações realizadas (ISO, 2006).

No caso da bioenergia os sistemas de alocação são especialmente importantes, pois devido ao grande número de processos multifuncionais envolvidos, como no caso do etanol de cana-de-açúcar, há geração de energia elétrica e produção do etanol de segunda geração. Porém, de acordo com Cherubini *et al.* (2011) existem uma série de controvérsias a respeito da definição de alocação de energia em sistemas na literatura. Pode-se destacar dois grandes procedimentos de alocação que se destacam: método de substituição, e os métodos de particionamento.

No caso do método de subtração ou sistema de expansão, exposto na figura 7, a ideia principal é a de que um processo é subtraído do sistema; por exemplo,

a produção de eletricidade a partir do bagaço da cana-de-açúcar pode ser considerada para evitar até certo ponto a produção de eletricidade pela maneira "normal" de geração (HEIJUNGS; GUINÉE, 2007). Assim, em um primeiro momento é feita a expansão do sistema de modo a contemplar o processo produtivo dos coprodutos, e posteriormente os impactos ambientais causados por essas produções alternativas são atribuídos aos coprodutos e subtraído o impacto total do sistema.

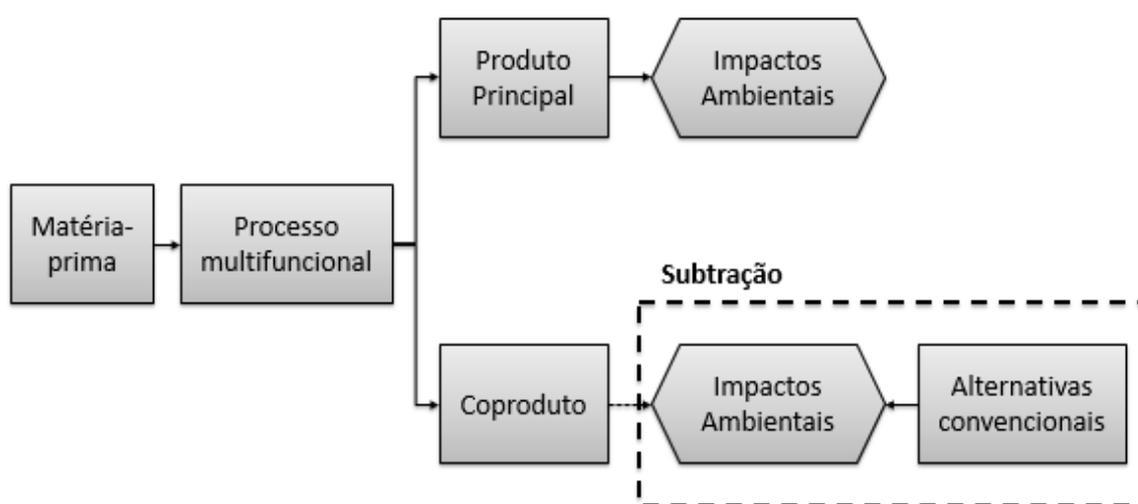


Figura 7 – Passo a passo do método de subtração. Fonte: Cherubini *et al.*, 2011.

No método de particionamento, exemplificado na figura 8, a energia utilizada, bem como as emissões ambientais decorrentes do processo produtivo devem ser repartidos entre os principais produtos e os coprodutos presentes na ACV do produto principal em análise Hu *et al.* (2008). De acordo com Heijungs e Guinée (2007) este método apresenta soluções artificiais, uma vez que por se tratarem de construções matemáticas, muitas vezes eles extrapolam dos saldos de massa ou energia, ou eles não possuem viabilidade econômica. Neste sentido, números entre 0 e 1 indicam a alocação da carga de acordo com o coproduto, e esses valores são divididos conforme figura abaixo.

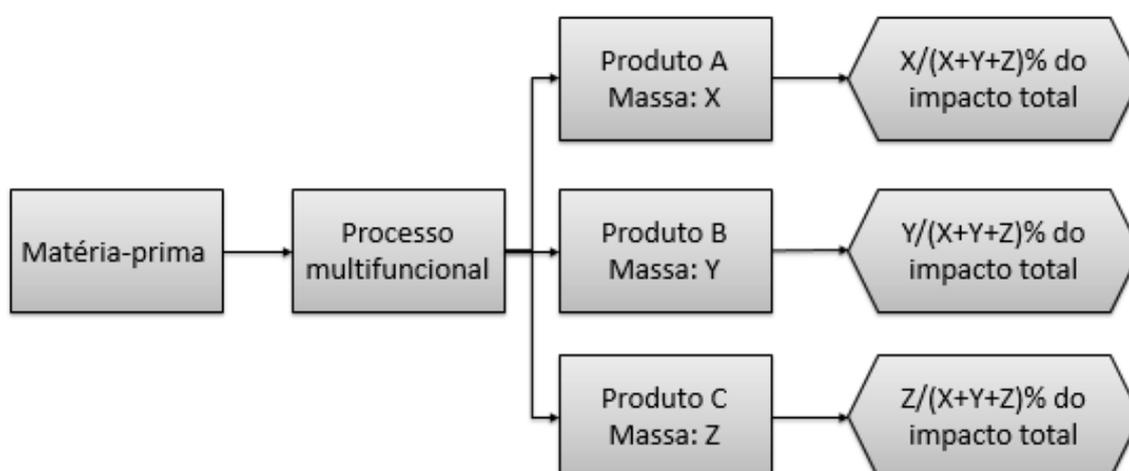


Figura 8 – Passo a passo do método de particionamento. Fonte: Cherubini *et al.*, 2011.

Por fim, vale destacar que diversas formas de alocação podem ser encontradas na literatura, como as baseadas nos pesos relativos dos coprodutos na massa total do produto, além da abordagem da quantidade de energia embutida nos coprodutos, ou abordagem pelos valores econômicos, propriedades físico-químicas (RAMÍREZ, 2009).

5.2 Metodologias de Cálculo de emissões de GEE

5.2.1 BioGrace

O BioGrace é uma ferramenta de cálculo das emissões de GEE, aplicável a 22 biocombustíveis diferentes, dentre os quais destacam-se: etanol de cana-de-açúcar, de milho, colza, biodiesel de soja, entre outros. A ferramenta é baseada em Excel, e foi fundada pelo Programa de Inteligência em Energia da Europa (IEE Program) e reconhecida pela União Europeia, cujos fundamentos são baseados nas diretrizes das Diretivas de Energia Renovável e a de Qualidade do Combustível (BIOGRACE, 2016). O cálculo das emissões é baseado no ACV, da perspectiva das emissões de GEE de 1 MJ de combustível, o que significa que a unidade funcional é a produção ou uso de 1 MJ de combustível; dessa forma todo o ciclo de vida, desde a produção da biomassa até o uso do combustível são levados em conta, porém a queima (utilização) do biocombustível é considerada nula.

O cálculo das emissões é feito baseado em alguns valores padrão adotados pela ferramenta, bem como pelas diretivas. Os valores padrão são: fatores

como coeficientes de emissão de GEE (emissões diretas e indiretas de CO₂, CH₄ e N₂O do uso de 1 MJ de gás natural ou do uso de 1 kg de fertilizante baseado em Nitrogênio, Fósforo ou Potássio); eficiência de combustível de caminhões e navios, valores típicos para as emissões de CH₄ e N₂O para caminhões, navios, caldeiras, instalações de cogeração e motores a gás. Esses valores são aproximados e algumas vezes conservadores. Mediante o respeito de algumas regras, os usuários da ferramenta de cálculo BioGrace GEE estão autorizados a utilizar valores padrão próprios (NEEFT et al., 2012).

Assim, a ferramenta BioGrace pretende ter duas funções principais, sendo a primeira delas a de servir como um meio de transparência sobre os cálculos das emissões de GEE que conduziu aos valores do anexo V da RED, bem como permitir que os *stakeholders* possam fazer seus próprios cálculos, substituindo os dados da planilha por dados reais, tais como terras, quantidade de fertilizantes, quantidade de energia e distância de transporte (NEEFT *et al.*, 2012).

5.2.1.1 Fronteiras de emissões de GEE

A metodologia de cálculo das emissões de GEE leva em conta fatores ligados ao ciclo de vida da cultura energética, ou seja, desde o cultivo da mesma, passando pelo processo de transformação em biocombustível até a sua queima (utilização para gerar movimento). Dessa forma, a metodologia é aplicável a uma série de bioenergias utilizados pela UE, que abrangem o biodiesel e bioetanol, seja ele importado ou produzido nacionalmente (GRISOLI, 2011). Devido ao fato de se tratar de um processo longo e complexo de análise, a UE adotou alguns valores padrões com intuito de facilitar os cálculos deferentes de acordo com o biocombustível estudado e esta lista é atualizada periodicamente, sendo que a fonte é de cunho acadêmico-científico (FRITSCHE et al., 2011).

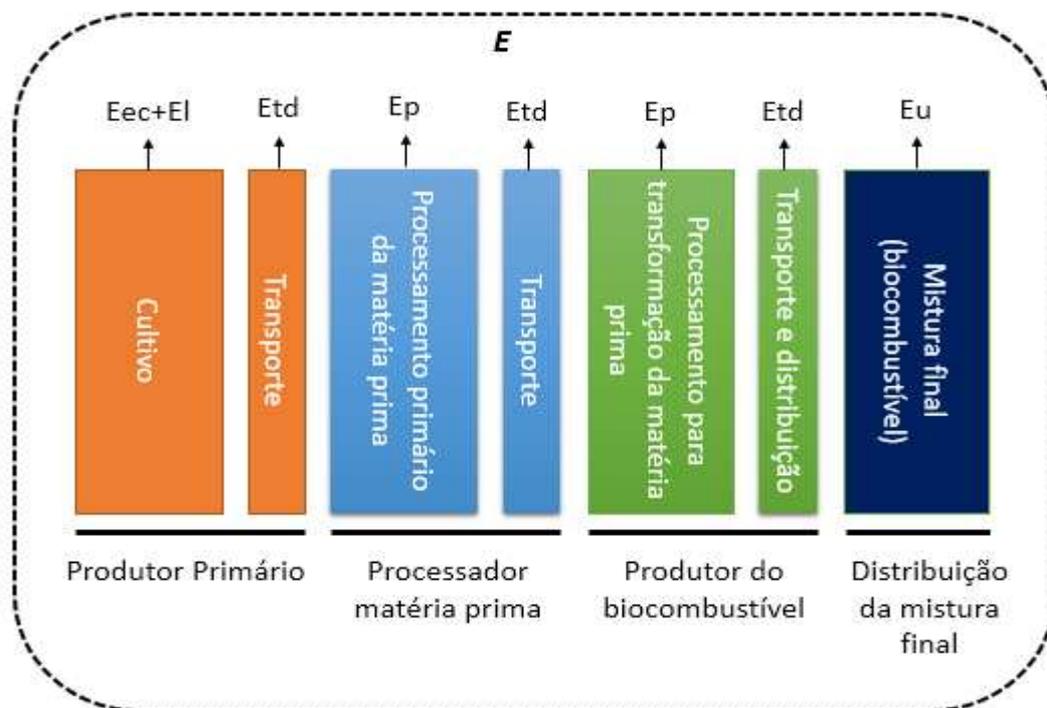


Figura 9 – Fronteiras do sistema europeu de emissões de GEE. Fonte: Adaptado de HENNECKE *et al.* (2013).

Conforme figura 9 e em consonância com o anexo IV da Diretiva Europeia 2009/30/CE, as emissões de gases com efeito de estufa provenientes da produção e utilização de combustíveis para transportes, biocombustíveis e biolíquidos são calculadas pela seguinte fórmula (EUROPEAN COMMISSION, 2009b):

$$E = e_{ec} + e_l + e_p + e_{td} + e_u - e_{sca} - e_{ccs} - e_{ccr} - e_{ee},$$

Onde:

E = emissões totais;

e_{ec} = emissões provenientes da extração ou cultivo de matérias-primas;

e_l = contabilização anual das emissões provenientes de alterações do carbono armazenado devidas a alterações do uso do solo;

e_p = emissões do processamento;

e_{td} = emissões do transporte e distribuição;

e_u = emissões do combustível na utilização;

e_{sca} = redução de emissões resultante da acumulação de carbono no solo através de uma gestão agrícola melhorada;

e_{ccs} = redução de emissões resultante da captura e fixação de carbono e armazenamento geológico de carbono;

e_{ccr} = redução de emissões resultante da captura e substituição de carbono;

e

e_{ee} = redução de emissões resultante da produção excedente de eletricidade na cogeração.

Vale ressaltar que não são consideradas as emissões resultantes da produção de máquinas e equipamentos.

Assim, as emissões de gases com efeito estufa dos combustíveis, E , são expressas em gramas de CO₂ equivalente por MJ de combustível, gCO₂eq/MJ.

A redução de emissões de gases com efeito de estufa dos biocombustíveis e biolíquidos é calculada pela seguinte fórmula (EUROPEAN COMMISSION, 2009b).:

$$REDUÇÃO = (EF - EB) / EF$$

Onde:

EB = emissões totais do biocombustível ou biolíquido; e

EF = emissões totais do combustível fóssil de referência.

Em uma melhor análise aos itens do cálculo de emissões, as emissões provenientes da extração ou cultivo de matérias-primas, e_{ec} , incluem as emissões do próprio processo de extração ou cultivo; da colheita de matéria-prima, que podem incluir as queimadas no caso da cana-de-açúcar; de resíduos e perdas; e da produção de produtos químicos ou produtos utilizados na extração ou cultivo. Devem ser deduzidas as reduções certificadas de emissões de GEE resultantes da queima nos locais de produção de petróleo em qualquer parte do mundo. Essas emissões podem ser calculadas por meio de padrões disponíveis na Diretiva (EUROPEAN COMMISSION, 2009b).

A contabilização anual das emissões provenientes de alterações do carbono armazenado devidas a alterações do uso do solo, e_l , é medida em massa de equivalente de CO₂ por unidade de energia produzida por biocombustíveis. As emissões do processamento, e_p , incluem as emissões do próprio processamento; de

resíduos e perdas; e da produção de produtos químicos ou produtos utilizados no processamento. Já as emissões de transporte e distribuição, e_{td} , incluem as emissões provenientes do transporte e armazenamento de matérias-primas e materiais semiacabados e do armazenamento e distribuição de materiais acabados. No que se refere a última parte do ciclo de vida, ou seja, as emissões na utilização, ou queima para produção de movimento, e_u , estas são consideradas como nulas para os biocombustíveis (EUROPEAN COMMISSION, 2009b).

A redução de emissões resultante da captura e armazenamento geológico de carbono, e_{ccs} , que ainda não tenham sido levadas em conta em e_p , são limitadas às emissões evitadas graças à captura e fixação do CO₂ emitido diretamente ligadas à extração, transporte, processamento e distribuição de combustível. No caso das reduções de emissões resultantes da captura e substituição de carbono (e_{ccr}) são limitadas às emissões evitadas graças à captura de CO₂ cujo carbono provenha da biomassa e que seja utilizado para substituir o CO₂ derivado de energia fóssil utilizada em produtos e serviços comerciais (EUROPEAN COMMISSION, 2009b).

A redução de emissões resultante da produção excedente de eletricidade na cogeração (e_{ee}), é contabilizada se for relativa à produção em sistemas de produção de combustível que utilizam a cogeração, exceto se o combustível utilizado para a cogeração for um coproduto que não seja um resíduo de culturas agrícolas (EUROPEAN COMMISSION, 2009b).

Assim, visando facilitar o cálculo das emissões de GEE na UE, o governo europeu criou uma ferramenta chamada BioGrace, com a qual é possível fazer o cálculo das emissões de GEE para produção de biocombustíveis diferentes, entre os quais abrange o etanol de cana-de-açúcar (EUROPEAN COMMISSION, 2013).

5.2.2 GREET

A GREET foi criada pelo Laboratório Nacional Argonne (ANL), mantido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos da América, no ano de 1999; essa ferramenta fora projetada primariamente com a finalidade de mensurar as emissões de GEE para o ciclo de vida do petróleo e gasolina para ao uso no setor de transportes (WANG, 1999). Assim, a ideia era de que os gestores de frotas pudessem simular mensurações de emissões por meio das ferramentas conhecida como WTW (*Well-to-Wheel*), ou seja, do poço à roda. Essa perspectiva podia ser dividida em dois estágios,

que diferem quanto às fronteiras do sistema, sendo o primeiro deles o *Well-to-Pump* (WTP), ou seja, do poço à bomba de combustível, onde inicia-se com processo produtivo do combustível e se encerra quando este é levado à bomba no posto; e o segundo *Pump-to-Wheel* (PTW), que seria da bomba à queima do combustível para gerar movimento (BUHRHAM, 2009). De acordo com a Federal Register (2009), para quantificar os fatores de emissão associados às diferentes etapas da produção e utilização de vários combustíveis, são usadas a ferramenta de análise de planilhas desenvolvidas pelo ANL, a GREET.

A metodologia GREET avalia as emissões de GEE do ciclo de vida dos combustíveis e inclui as emissões de GEE associadas desde a produção até combustão dos combustíveis. Esta metodologia também estima as emissões de GEE associadas à produção de eletricidade necessária para a agricultura e a produção de biocombustíveis. No que tange o setor agrícola, ela fornece dados das emissões associadas a produção e transporte de insumos agrícolas, tais como fertilizantes, herbicidas e pesticidas. Porém, a mesma não captura alguns dos impactos secundários associados com o combustível, tais como alterações na composição dos alimentos para animais utilizados para a produção animal, que pode provocar custos na produção destes (FEDERAL REGISTER, 2009).

Além disso, a ferramenta está em constante desenvolvimento e passou por uma extensa avaliação através de múltiplas atualizações, o que a tornou mais refinada (EPA, 2010). Assim, a metodologia avalia as emissões de GEE de mais de 100 tipos diferentes de combustíveis, entre eles encontram-se os biocombustíveis como o etanol de cana-de-açúcar, além de outros como etanol de milho e biodiesel de soja, ou mesmo os combustíveis fósseis, como a gasolina (WANG, 1999).

5.2.2.1 Fronteiras de emissões de GEE

Os limites do sistema GREET para o bioetanol são:

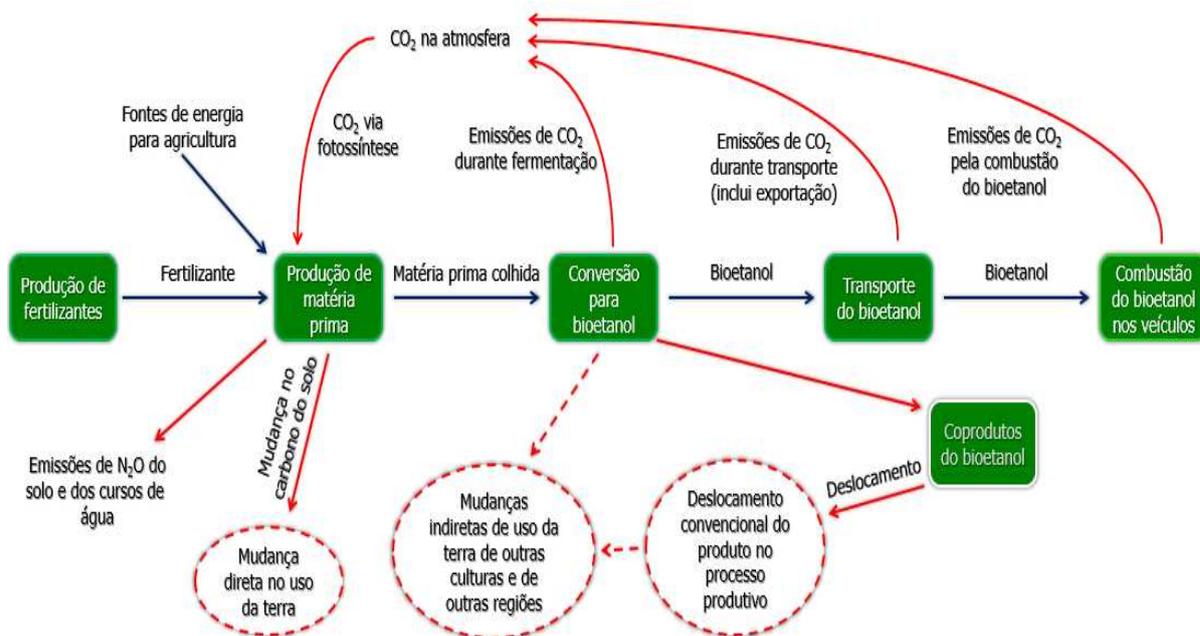


Figura 10 - Limites do sistema de avaliação – Análise do ciclo de vida campo-rodas Fonte: Adaptado de WANG et al. (2012).

De acordo com o esquema apresentado na figura 10, os fluxos em azul representam os *inputs* dados ao sistema, ou seja, as entradas e os fluxos em vermelho, são os *outputs*, ou saídas, sendo alguns deles os produtos desejados com o sistema e outros, externalidades produzidas ao longo do ciclo, visto que as fazendas de cana-de-açúcar produzem dois produtos principais, o etanol e o açúcar. O bagaço resultante na produção do suco da cana-de-açúcar é queimado na fazenda para produzir vapor (alimenta a indústria interna) e eletricidade (para uso interno e para exportar para rede de eletricidade). Esse uso externo da eletricidade é considerado para fins de cálculos das emissões como um crédito cedido ao final dos cálculos.

Existem alguns pontos mais críticos quanto as emissões de GEE no ciclo de vida do etanol de cana-de-açúcar para o GREET, e esses são as queimadas no campo, principalmente com a colheita manual de cana de açúcar, que possui projeções de redução no decorrer dos anos, a logística de transporte de caminhão de cana dos campos para moinhos ou mesmo do etanol até os portos para exportação e a exportação em si, por meio marítimo (WANG et al., 2012).

6 Resultados e discussão

6.1 Análises estruturais e padrões das metodologias de emissões de GEE

De acordo com Rein (2012), entre os maiores assuntos e preocupações relacionados as metodologias de mensuração das emissões de GEE são:

- Fronteiras do Sistema: estas procuram indicar o que está incluso no cálculo das emissões;
- Efeitos Diretos e Indiretos, sendo que os efeitos diretos são basicamente os combustíveis e energia para a transformação de algo; já os indiretos são a energia requerida para a produção de fertilizantes e produtos químicos;
- Mudança no uso da terra: mudanças no estoque de carbono da terra. Na maioria das vezes consideram-se apenas mudanças diretas;
- Lidar com coprodutos: o método de alocação das emissões em produtos diferentes pode gerar cálculos diferentes;
- Padrões e dados secundários: sempre é necessário assumir alguns valores padrão, devido à falta de dados; e
- Energia embutida em bens de capital: emissões associadas com bens de capital são normalmente inclusas em cálculos na América e excluídas na Europa.

Assim, no âmbito dessa metodologia, a Figura 11 abaixo demonstra a diferença da abrangência considerada na cadeia produtiva entre o RFS2, EU-RED, GREET e BioGrace para cálculo dos impactos da sustentabilidade, principalmente sobre alguns temas, como cálculo das emissões de gases contribuintes para o efeito estufa.

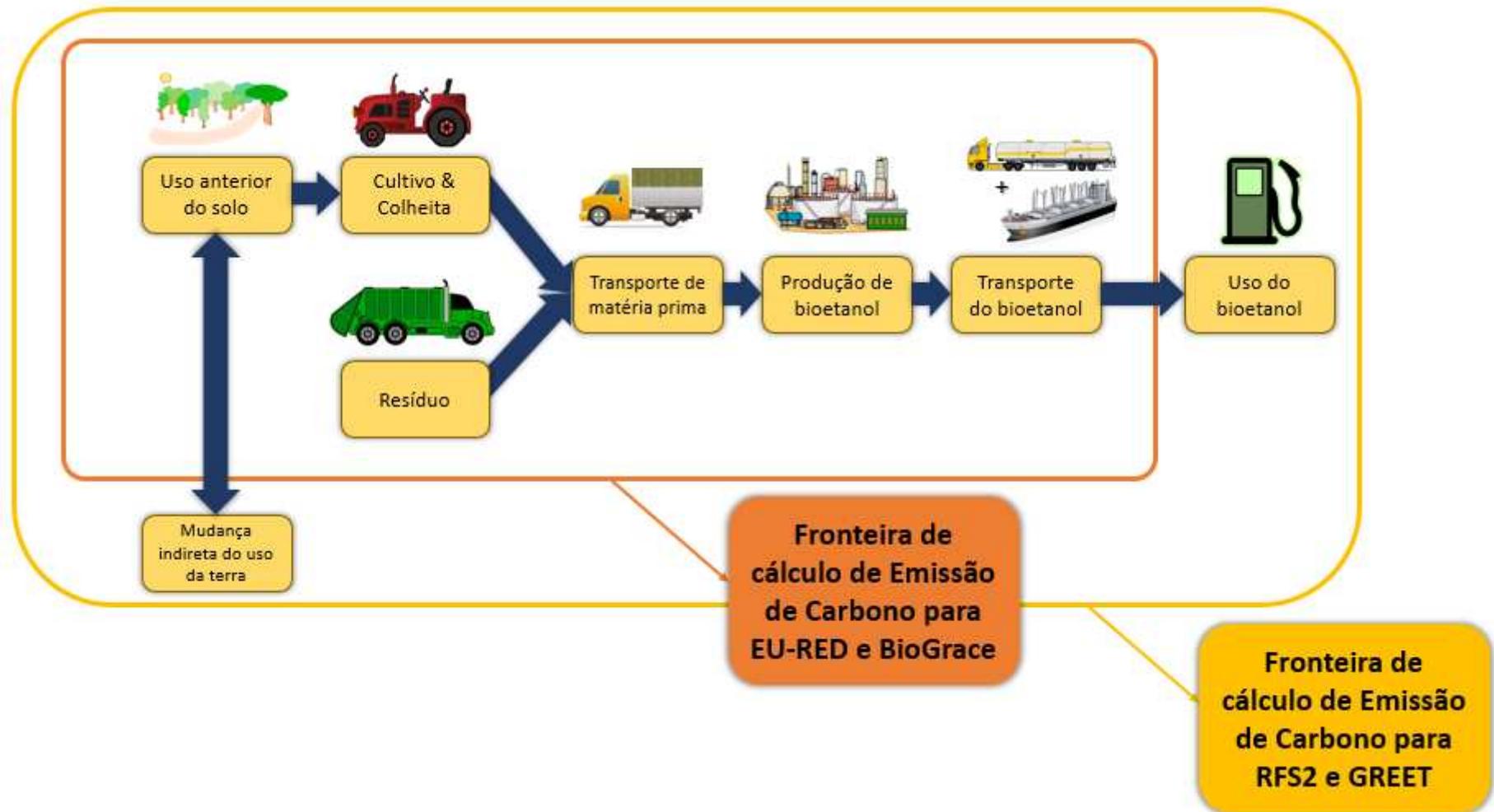


Figura 11 – Diferença do escopo das cadeias produtivas entre RFS2, EU-RED, BioGrace e GREET. Fonte: Adaptado de Denvir (2014).

A partir da figura 11 pode-se verificar que o processo de cálculo das emissões de GEE na EU-RED e BioGrace abrange os seguintes processos: mudança direta no uso da terra, cultivo e colheita, transporte de matéria prima, produção de etanol e transporte do bioetanol, no ciclo de vida dos biocombustíveis, enquanto que na regulamentação Norte Americana, a RFS2, bem como o GREET, as fronteiras abrangidas pela ACV são todas as etapas do processo anterior, adicionando mudanças indiretas no uso da terra, e a utilização do biocombustível. A partir desse diagnóstico, pode-se afirmar que a metodologia utilizada pela RFS2 é mais abrangente do que a utilizada pela Diretiva Europeia, e, por conseguinte, mais completa, uma vez que contempla o ciclo do berço à cova, ou do campo à roda.

Além das divergências estruturais das metodologias, existem diferenças dentro dos cálculos das emissões, como as dos fatores de conversão de poluentes em relação ao padrão de emissões, cujos valores são apresentados na tabela 4. Esses fatores de conversão conhecidos por “*Global Warming Potencial*” (GWP), ou Fator de Aquecimento Global, e foram criados com a finalidade de permitir a comparação entre diferentes gases na influência sobre o aquecimento global. Assim, essa métrica traz informações sobre a quantidade de energia que será absorvida, em um período (no caso 100 anos), com a emissão de 1 tonelada de um determinado gás, em relação à emissão de 1 tonelada de dióxido de carbono (CO₂), ou seja, quanto maior o GWP, maior será o aquecimento do planeta em relação ao CO₂ (EPA, 2016).

Tabela 4 – Fatores de conversão de poluentes

Gás	GREET (IPCC 2007)	BIOGRACE (IPCC 2001)
CO ₂	1	1
CH ₄	25	23
N ₂ O	298	296

Fonte: Adaptado de ANL (2016) e BIOGRACE (2015).

No caso do BioGrace, o GWP é retirado do anexo V da Diretiva Europeia para Combustíveis Renováveis (Diretiva 2009/28/CE), que por sua vez baseia-se em informações do IPCC 2001, enquanto o GREET se baseia no IPCC 2007. O IPCC ou *Intergovernmental Panel on Climate Change*, é uma organização internacional voltada para estudos científicos, que servem como base de decisão a muitos governos, sobre as mudanças climáticas mundiais (IPCC, 2013). Vale ressaltar que a ferramenta

BioGrace possui duas opções para o GWP, uma delas que segue as regras do anexo V da Diretiva 2009/28/EC, que é a foco desse estudo, e a outra que é baseada no Consórcio JEC, que se assemelham aos utilizados pelo GREET. O Consórcio JEC compreende o Centro Comum de Investigação da Comissão Europeia, EUCAR (Conselho Europeu para Automotivos R&D) e CONCAWE (Associação Europeia das Companhias Petrolíferas para o Ambiente, Saúde e Segurança no refino e distribuição) (ACEA, 2011).

Além desse padrão, existem outros valores fixos considerados para algumas partes das metodologias, entre os quais se destacam a produtividade, em toneladas, de cana-de-açúcar por hectare; a produção de litros de etanol por toneladas de cana-de-açúcar utilizada.

Tabela 5 – Parâmetros fixos, conforme metodologias BioGrace e GREET

Parâmetros	BioGrace	GREET
Produtividade (ton/ha)	68,7 ^a	86,7 ^b
Produção de etanol (L/TC)	87,0	81,0
Eletricidade excedente (kWh/TC)	-	75,0 ^c

Fonte: Adaptado de ANL (2016) e BIOGRACE (2015)..

Notas:

a - Sem ano base encontrado

b - Ano base 2008, sem projeções de aumento ou diminuição no futuro

c - Dados de uma tabela de projeção, que para o ano de 2015 é de 75 kWh/TC e

a projeção para 2020 é de 100 kWh/TC

Conforme dados da tabela 5, em relação aos parâmetros observados em ambas as metodologias, a produtividade considerada pela GREET é cerca de 26% maior que a considerada pela BioGrace, sendo que a primeira é baseada em dados literários que datam de 2008, enquanto que para segunda não foi encontrada a fundamentação. Em uma comparação com dados atuais, na safra 2014/2015 a produtividade ficou em torno de 70,50 toneladas de cana de açúcar (base úmida) por hectare, ou seja, mais próximo da produtividade considerada pela BioGrace. Vale ressaltar que essa produtividade é uma razão entre valor de outputs (saídas) e inputs (entradas) (CONAB, 2015).

Assim, para efeito de análise de dados de entrada e comparações entre as emissões resultantes do ciclo de vida, optou-se por dividir o ciclo entre as etapas: agrícola, que envolve a utilização de fertilizantes, insumos agrícolas e transporte da

matéria prima; produção ou industrial, cujos inputs são a matéria prima e insumos para a produção do etanol, além de transporte e distribuição, os quais envolverão a exportação do etanol para o consumo final. Vale ressaltar que no caso do GREET existem 2 possibilidades de cálculo das emissões chamadas de *Well-to-Wheel*, que pode ser interpretado como do poço à roda, cuja tradução deriva do que é utilizado para combustíveis fósseis, a qual engloba todo o ciclo de vida desde o campo até o consumo final do biocombustível para gerar movimento. Tem-se também o *Well-to-Pump*, que engloba, por sua vez, o ciclo de vida do poço à bomba, ou seja, o ciclo se encerra no momento da distribuição do bem, o etanol. Já no caso do BioGrace, observa-se somente a primeira opção, *Well-to-pump*.

Tabela 6 – Insumos agrícolas utilizados para a produção do bioetanol, conforme metodologias BioGrace e GREET

Principais insumos e deslocamento (por tonelada de cana de açúcar)	BioGrace	GREET
Fertilizantes N (kg)	0,91	0,80
Fertilizantes P ₂ O ₅ (kg)	0,41	0,30
Fertilizantes K ₂ O (kg)	1,08	1,00
Calcário (kg)	5,34	5,20
Diesel (máquinas) (L)	0,8	1,1
Pesticidas (kg)	0,03	0,04
Transporte da Cana de Açúcar (km)	20,00	19,30

Fonte: Adaptado de ANL (2016) e BIOGRACE (2015).

Observa-se na tabela 6 que no setor agrícola, entre os insumos utilizados estão os fertilizantes, calcário e pesticidas. Este último, no balanço do GREET está dividido em dois subprodutos, os herbicidas (inibidores de ervas daninhas), com um valor de 0,045 kg/toneladas e os inseticidas (inibidores de insetos), com o valor de 0,0025 kg/toneladas; já no BioGrace são agregados em um único valor e considerados como pesticidas. O transporte de matéria prima entre o local de colheita e a indústria também é considerado nessa fase como input, e as distâncias consideradas são bastante semelhantes. Além dos fertilizantes industrializados à base de Nitrogênio, Potássio e Fósforo, existe a aplicação de fertilizantes orgânicos, como a torta de filtro, um resíduo sólido orgânico do processamento de cana na usina, e a vinhaça, um resíduo líquido da destilação do etanol (CARMO et al., 2013). Esses adubos orgânicos

não são considerados na tabela, pois possuem efeito de emissões considerados nulos.

No setor industrial, cujos dados são apresentados na tabela 7, a BioGrace considera que a planta produtora de etanol cana queima o bagaço e, por isso, é autossuficiente em termos de energia, porém ela desconsidera que o excedente dessa energia possa ser comercializado exteriormente. Já no caso da GREET, a usina de etanol queima o bagaço e uma pequena quantidade de óleo combustível para a produção do etanol (CRC, 2013).

Tabela 7 – Insumos utilizados pela indústria para a produção do bioetanol, conforme metodologias BioGrace e GREET

Insumos (por Litro de Etanol)	BioGrace	GREET
Ácido sulfúrico (kg)	16,06	-
Cal (kg)	17,97	10,85
Lubrificantes / Diesel (kg)	0,26	1,92
Ciclohexanos (kg)	1,06	-

Fonte: Adaptado de ANL (2016) e BIOGRACE (2015).

Em termos de transporte do biocombustível, a GREET considera que a distância total entre a produção no Brasil e o consumo nos Estados Unidos seja de 7.976 km, sendo que a distância percorrida dentro do país até o porto de despacho, por meio de caminhões, representa 5% do total, e a maior parte fica por conta do transporte internacional marítimo que representa, 93% do total, e por último encontram-se o transporte entre o terminal marítimo e o Terminal de Granéis, com 1,3% e transporte até a Estação de reabastecimento, com 0,4%. Enquanto que para a BioGrace a distância total considerada é de 11036 km, e o transporte interno até o porto representa aproximadamente 6%, o transporte em transporte marítimo (de porto a porto), fica com 92% do total e os últimos 2% ficam por conta do transporte, no país importador, até a estação de serviços, ou posto de distribuição.

Visto que a maioria das usinas produtoras de etanol no Brasil estão localizadas na região Centro-Sul, os portos dessa região acabam por ser mais utilizados para o escoamento da produção ao mercado externo, como o Porto de Santos e Paranaguá (COSTA, 2013). Nos últimos anos alguns portos nacionais passaram por reformas para melhoramentos na infraestrutura para escoamento da

produção do etanol, entre os quais destacam Terminal para Exportação de Álcool de Santos (TEAS), Stolthaven, também localizado em Santos (SP), e Pasa, em Paranaguá (PR), além da ampliação e construção de terminais para combustíveis líquidos em diversos portos do país (NOVACANA, 2016b).

Para os casos de alocação especificamente do etanol de cana-de-açúcar brasileiro disponível na ferramenta online do BioGrace, os coprodutos, como eletricidade produzida a partir da queima do bagaço não são considerados, ou seja, considera que a demanda de energia é atendida, porém não é gerado excedente de eletricidade. Enquanto que no GREET a produção de coprodutos é deslocada, e considerada como um crédito no cálculo das emissões.

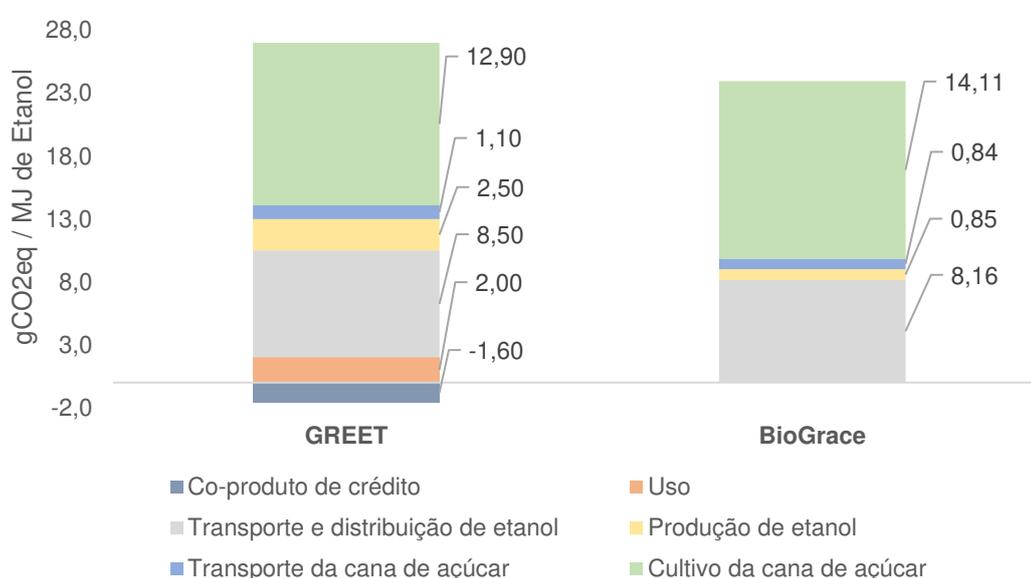


Figura 12 – Emissões padrão para GREET e BioGrace – etanol de cana-de-açúcar. Fonte: Adaptado de ANL (2016) e BIOGRACE (2015).

De acordo com o Figura 12, o setor de cultivo da cana-de-açúcar é o que representa as maiores emissões em ambas metodologias, no caso do GREET ele é responsável por aproximadamente 50% das emissões do ciclo de vida, enquanto que no BioGrace este representa aproximadamente 60% do total. Em termos de emissões totais do ciclo vida, as registradas pelo GREET são cerca de 10% superiores às registradas pelo BioGrace. Uma das principais características das emissões do setor agrícola da cana-de-açúcar brasileira, é a utilização de queimadas para a colheita do produto. No que tange o processo produtivo, de acordo com as projeções GREET 15% da colheita de cana-de-açúcar é realizada por meio de queimadas com uma eficiência de 90%. Enquanto que de acordo com a ferramenta BioGrace, no que tange

colheita considera-se que 100% do da cana de açúcar é feita de maneira manual, ocorrendo a queima da palha. Essa queima é aproximadamente 80% das pontas e folhas são queimadas com eficiência de 90% (MACEDO *et al.*, 2004).

Outro fator que contribui para as diferenças de mensuração das emissões são as fronteiras consideradas no cálculo, visto que a metodologia GREET considera a utilização do combustível ou queima, e neste caso representa 7% do valor total das emissões, enquanto que a BioGrace não considera esse valor. Vale destacar que, no caso do BioGrace, na mensuração do transporte da matéria prima é considerado o transporte da vinhaça para adubação do solo, já no GREET a energia consumida por esse transporte não é incluída visto que esse produto é normalmente transportado através de canais aspersores.

Vale ressaltar que foram considerados os valores dados para as emissões de mudanças diretas no uso da terra em ambas metodologias, visto que esse fator não é o foco do estudo. Em ambas metodologias, considerando dados padrões, as emissões provenientes de mudanças no uso da terra são consideradas nulas.

Apresenta-se então consolidado na tabela 8 a comparação entre as metodologias GREET e BioGrace para as principais fases da análise do ciclo de vida.

Tabela 8 – Comparativo dos resultados das emissões de GEE – metodologias GREET e BioGrace

	GREET			BioGrace		
	Valores Absolutos	Porcentagem de participação	Características	Valores Absolutos	Porcentagem de participação	Características
Cultivo da cana de açúcar	12,90	50,79%	Produtos químicos+ queima(15%)+ emissões de N2O do campo (devido a aplicação de fertilizantes e pesticidas)+ combustível para maquinário (diesel)	14,00	58,31%	Produtos químicos+ queima (100%)+ emissões de N2O do campo (devido a aplicação de fertilizantes e pesticidas)+ combustível para maquinário (diesel)
Transporte da cana de açúcar	1,10	4,33%	Transporte da cana de açúcar por meio de caminhão	1,00	4,16%	Transporte da cana de açúcar por meio de caminhão+ Transporte da vinhaça
Produção de etanol	2,50	9,84%	Consumo de energia considerado para efeito de movimentação da usina, portanto são considerados: Cal, Lubrificante	0,85	3,54%	Consumo de energia considerado nulo devido a cogeração de energia, portanto são considerados: Ácido sulfúrico, Cal, Lubrificante e ciclo-hexanos
Transporte e distribuição de etanol	8,50	33,46%	Transporte de caminhão até o porto+ transporte marítimo+ transporte até o armazenamento em granel+ transporte até a estação de reabastecimento	8,16	33,99%	Transporte de caminhão até o porto+ transporte marítimo+ transporte do porto até a distribuidora
Utilização	2,00	7,87%	Queima do combustível para gerar movimento	-	0,00%	-
Coproduto (Alocação)	- 1,6	- 6%	Expansão (Substituição ou deslocamento)	-	0,00%	-
Emissões totais (gCO2eq/MJ)	25,40	100%	-	24,01	100%	-

Fonte: Elaboração própria.

6.2 Substituição e análise dos dados do CTBE nas metodologias de emissões de GEE: GREET e BioGrace

Após as análises produzidas com os dados padrões das ferramentas de cálculo de emissões de GEE estudadas, foram substituídos os dados das médias das usinas do Estado de São Paulo para o ano de 2015, fornecidos pelo Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (CTBE), nas metodologias de cálculo de emissões de GEE, GREET e BioGrace, com intuito de fornecer fomento à discussão sobre as diferenças estruturais das metodologias e do que é considerado para os cálculos das emissões de GEE dentro do Brasil. Essas usinas foram consideradas como produtoras somente de etanol de cana-açúcar e cogeração de energia.

Em termos de parâmetros fixos, a produtividade na cana-de-açúcar considerada pelo CTBE é mais próxima ao GREET, girando em torno de 80 toneladas de cana de açúcar por hectare. Além dessa semelhança, vale destacar que os dados do GWP considerados pelo GREET são os mesmos do CTBE, ou seja, IPCC 2007. Entre as divergências de dados para a agricultura observadas, vale destacar a tabela 9, abaixo.

Tabela 9 – Destaques de diferenças de insumos agrícolas considerado pelas metodologias BioGrace, GREET e dados do CTBE

Insumos e parâmetros Por tonelada de cana-de-açúcar	BioGrace	GREET	CTBE
Pesticidas (kg)	29.1	-	5.25
Herbicidas (kg)	-	45.0	10.9
Inseticidas (kg)	-	2.5	0.5
Diesel (L)	0.8	1.1	1.9
Transporte da cana-de-açúcar (km)	20	19.3	27.3

Fonte: Adaptado de ANL (2016) e BIOGRACE (2015).

Conforme visto anteriormente, o BioGrace apresenta apenas pesticidas, enquanto o GREET os divide em Herbicidas e Inseticidas, e o CTBE, por sua vez, apresenta uma divisão maior ainda, abrangendo as outras duas. Porém, o valor total considerado desses para o CTBE é cerca de 65% menor que o considerado pelo GREET e 42% menor que o BioGrace. Entre as divergências desses parâmetros fixos,

destaca-se também, que nas etapas de transporte e produção da cana-de-açúcar, onde é utilizado o diesel, para o GREET é considerado o consumo de 1,1 litros por toneladas de cana-de-açúcar, 73% à menos que o valor considerado pelo CTBE; para o BioGrace o valor considerado é de 0,8 litros por toneladas de cana de açúcar, ou seja, menos da metade do que é tido como médio para o CTBE. No que tange o transporte da cana de açúcar, as quilometragens consideradas também apresentam divergências, que retorna um aumento de 35% em relação a maior quilometragem considerada entre as metodologias, que é a do BioGrace.

Expôs-se anteriormente que as porcentagens consideradas de cana queimada para a colheita são bem divergentes entre as metodologias estudadas, e o CTBE traz uma terceira porcentagem de consideração que é de 18,4%, mais próximo dos 15% considerado pelo GREET. Assim para a substituição nas duas metodologias estudadas utilizou-se o percentual considerado pelo CTBE. No que tange a cogeração de energia nas usinas, o CTBE considera o sistema de alocação com uma geração de energia excedente de 26,1 kWh/TC, dados base de 2015, enquanto que para o GREET o valor é de 75 kWh/TC, conforme evidenciado anteriormente o BioGrace não considera a cogeração. Para fins de conhecimento, durante a substituição dos dados nas ferramentas, manteve-se as questões de mudanças direta e indiretas no uso da terra inalteradas, ou seja, ambos valores zerados.

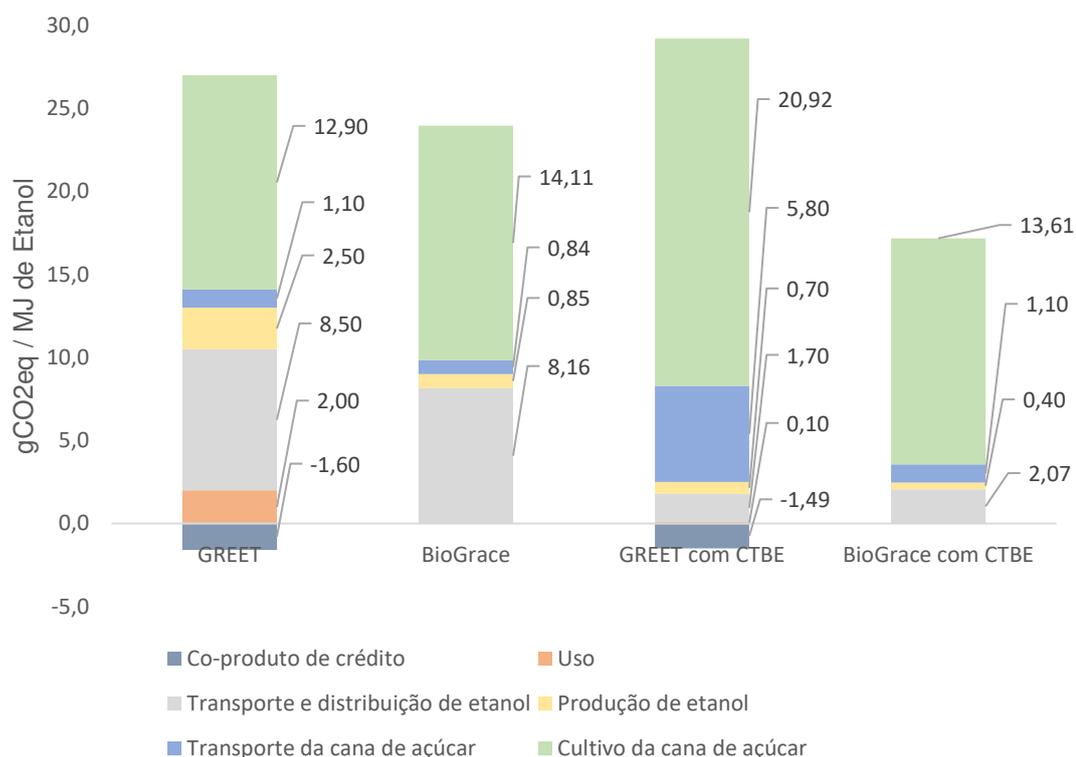


Figura 13 – Emissões de GEE após a substituição dos dados do CTBE para GREET e BioGrace – etanol de cana-de-açúcar. Fonte: Adaptado de ANL (2016) e BIOGRACE (2015). Nota: Para o BioGrace foi considerado o valor após as alocações energéticas, sendo que o valor considerado para este foi de 0,79 gCO₂eq/MJ

Observa-se que as estimativas de emissões para o GREET continuam a ser maiores que as estimativas do BioGrace. O valor total de emissões após alocações do GREET substituído com dados fornecidos pelo CTBE é de 27,73 gCO₂ eq/MJ de etanol, ou seja, cerca de 9% maior que o valor padrão da ferramenta. Esse aumento pode ser atribuído a maior consideração de utilização de queimadas no cultivo, que passou de 15% para 18,4% para CTBE. Além disso, o acréscimo nas considerações de emissões direta e indiretas de N₂ devido a utilização de fertilizantes no plantio da cana de açúcar, que passou de 5,6 gCO₂eq/ MJ de etanol para o GREET, para 8,3 gCO₂eq/MJ de etanol para os dados do CTBE. Essas emissões são decorrentes de uso do fertilizante no solo, decomposição da palha após a queima e das raízes.

Tratando-se da utilização da ferramenta BioGrace com os dados fornecidos pelo CTBE, as emissões totais do ciclo de vida foram de 17,18 gCO₂eq/MJ. Neste caso também foi observado um aumento nas emissões diretas e indiretas devido a utilização de fertilizantes, que passou de 5,49 gCO₂eq/MJ para 8,3 gCO₂eq/MJ.

Em contrapartida observa-se uma redução nas emissões decorrentes de transporte e distribuição do etanol para ambas as metodologias, uma vez que se passou a considerar apenas o uso interno do produto, visto que os valores de emissões gerados dessa fase são consideráveis, portanto penalizar o produto com as emissões decorrentes de transporte internacionais pode prejudicar esse produto, neste quesito. No caso dos cálculos com os dados do CTBE foi considerado um valor de 345 km, ou seja, apenas o transporte dentro do país.

Para o BioGrace as emissões de CO₂ do uso do combustível são desconsideradas, enquanto que para o GREET, com os dados do CTBE, o valor observado neste fator foi de 0,1 gCO₂eq/MJ. Além disso, vale destacar que houve um aumento tímido nas emissões decorrentes da etapa de cultivo da cana-de-açúcar para o BioGrace em específico, o que pode ser atribuído ao aumento na quilometragem considerada para o transporte da cana-de-açúcar.

Apresenta-se novamente o quadro analítico comparativo entre as metodologias na tabela 10, porém, com a inclusão dos dados do CTBE. Neste caso, para as substituições foram considerados os valores do CTBE e na tabela 10 estão expostos os valores antes das alocações para fins de comparabilidade entre os resultados das metodologias em estudo, porém o correto, para o BioGrace, por se tratar de uma alocação energética, é a representação após alocação, retirando os valores de etapas específicas do ciclo de vida do produto analisado.

Tabela 10 – Comparativo dos resultados das emissões de GEE após substituição com os dados do CTBE– metodologias GREET e BioGrace

	GREET com dados do CTBE			BioGrace com dados do CTBE (antes das alocações)		
	Valores Absolutos	Porcentagem de participação	Características	Valores Absolutos	Porcentagem de participação	Características
Cultivo da cana de açúcar	20,92	75,44%	Produtos químicos+ queima(18,4%)+ emissões de N ₂ O do campo (devido à produção e aplicação de fertilizantes e pesticidas)+ combustível para maquinário -diesel- o consumo passa de 1,1 L/TC para 1,9 L/TC	14,27	83,06%	Produtos químicos+ queima(18,4%)+ emissões de N ₂ O do campo (devido à produção e aplicação de fertilizantes e pesticidas)+ combustível para maquinário -diesel- o consumo passa de 0,8 L/TC para 1,9 L/TC
Transporte da cana de açúcar	5,80	20,92%	Aumento na consideração do transporte da cana de açúcar por meio de caminhão	1,15	6,69%	Aumento na consideração do transporte da cana de açúcar por meio de caminhão
Produção de etanol	0,70	2,52%	Consumo de energia considerado para efeito de movimentação da usina, portanto são considerados: cal, lubrificante	0,42	2,44%	Consumo de energia considerado nulo devido a cogeração de energia, portanto são considerados: Ácido sulfúrico, cal, lubrificante e ciclohexanos
Transporte e distribuição de etanol	1,70	6,13%	Transporte de caminhão até o consumo interno- 345km	2,07	12,05%	Transporte de caminhão até o consumo interno- 345km
Utilização	0,10	0,36%	Queima do combustível para gerar movimento	0,00	0,00%	-
Coproduto (Alocação)	-1,49	-5,37%	Substituição	-0,73	-4,25%	Energética
Emissões totais (gCO₂eq/MJ)	27,73	100%	-	17,18	100%	-

Fonte: Elaboração própria.

7 Considerações Finais

Para os dados padrões das metodologias, as maiores diferenças em termos de contribuição para as emissões totais ficam por conta do cultivo e da produção. O primeiro pode ser atribuído ao fato de o GREET considerar que apenas 15% da colheita da cana-de-açúcar é realizada de maneira manual e com a aplicação de queimada sobre o campo, enquanto que o BioGrace considera que 100% da colheita é feita desse modo. E o segundo pode ser explicado devido a consideração da necessidade de energia (óleo lubrificante ou diesel) no processo produtivo, o que acaba por abranger maiores emissões para o GREET em relação ao BioGrace. Após a substituição dos dados do CTBE, as maiores diferenças encontradas entre as metodologias foram mantidas as mesmas dos padrões, ou seja, as etapas de produção e transporte da cana-de-açúcar.

Em valores absolutos, as maiores emissões das metodologias com os dados do CTBE ficam por conta do setor de cultivo e transporte nacional da cana de açúcar; no primeiro caso, apesar de na metodologia BioGrace ter havido uma redução das considerações das queimadas de 100% para 18,4%, houve um aumento significativo de outros fatores, que acabaram compensando essa diferença, ou seja, aumentaram cerca de 51% os valores de emissões decorrentes do uso de fertilizante no solo, decomposição da palha após a queima e das raízes. Além disso, o consumo do diesel no maquinário do campo influenciou esse incremento, uma vez que aumentou de 0,8 L/TC para 1,9 L/TC. E para o GREET a elevação da porcentagem de queimadas de 15% para 18,4% influenciaram de maneira a aumentar a quantidade de emissões, bem como o aumento no consumo do diesel 1,1 L/TC para 1,9 L/TC.

No que tange os maiores valores de transporte da matéria prima pode-se atribuir ao aumento das distâncias consideradas percorridas após a substituição dos dados do CTBE, bem como ao aumento na consideração de volume em litros de diesel necessário para movimentar uma tonelada de cana-de-açúcar. No caso do BioGrace o valor mais que duplicou e no caso do GREET houve uma ampliação de 72%.

Apesar dessa divergência estrutural, outro dos fatores que contribuíram para que os valores da diferença entre as totais emissões absolutas dos dois modelos analisados não fossem tão grandes é a consideração da alocação, uma vez que representou um crédito de 6% nas emissões para o GREET.

No que tange o BioGrace, após as substituições de dados do CTBE, as emissões totais do ciclo de vida do etanol foram de 17,18 gCO₂eq/MJ, apresentando uma redução de 25% no valor considerado padrão pela ferramenta para esse produto. Esse fator pode ser explicado em termos de emissões totais pela desconsideração das emissões decorrentes do transporte internacional (exportação) do etanol, além da consideração da cogeração de energia, de acordo com dados padrões do CTBE é cerca de 4,6% do total de emissões. Assim, em termos de alocação, essa cogeração de energia entra como crédito para emissões das fases de cultivo e transporte da cana-de-açúcar e processamento do etanol na usina.

Para o GREET, após as substituições de dados do CTBE, as emissões totais subiram para 27,73 gCO₂eq/MJ de etanol, cerca de 9% maior que os dados padrões. Assim como para o BioGrace as exportações foram desconsideradas, e teve-se a aplicação da alocação, porém para o GREET, esse valor de crédito de emissões é considerado para todo o ciclo de produto, e não mais para parte em específico. O setor de produção se destacou em termos de emissões dos demais devido ao aumento das considerações de porcentagens de queimadas, aumento da consideração de emissões decorrentes do uso de fertilizantes no solo, bem como o incremento nas distâncias percorridas pelas matérias primas e o maior consumo de diesel por tonelada de cana de açúcar.

Em termos de redução de emissões de GEE do etanol em relação a gasolina é considerada diferente tanto em termos do ano base tomado para análise da gasolina em relação ao etanol, como do valor que representa essa redução. No caso do BioGrace é considerada uma redução de 71% nas emissões de GEE, ou seja, o total considerado para a gasolina é de 83,8 gCO₂eq/MJ, enquanto que o total do etanol foi de 24 gCO₂eq/MJ. O ano tomado como base para os cálculos é o de 2008. Enquanto isso, para o GREET o valor de emissões tomado para o etanol é de 25,4 gCO₂eq/MJ, e para a gasolina de 90,2 gCO₂eq/MJ, promovendo uma redução de aproximadamente 72%, com base nos dados do IPCC (2007).

Comparativamente a essas mensurações, o RFS2 coloca o etanol de cana-de-açúcar com uma redução de 50% das emissões em relação a gasolina, e o classifica como um biocombustível avançado. Assim, dentre as ações analisadas a que considera o etanol com uma melhor perspectiva em relação a redução de emissões é o GREET, seguido pelo BioGrace e a Diretiva Europeia, e por último o RFS2.

Após a substituição dos dados do CTBE no modelo GREET observou-se que a redução das emissões de GEE em relação aos combustíveis fósseis apresentou uma redução, representando agora, 69%; enquanto que para o BioGrace observou-se exatamente o oposto, a redução das emissões em relação ao combustível fóssil levado em consideração passou para o patamar de 80% de redução das emissões de GEE. Ou seja, neste novo cenário, a metodologia BioGrace acaba destacando-se em relação ao GREET, isto é, apresenta uma maior redução nas emissões.

A Bonsucro, como um sistema de certificação internacional do etanol brasileiro, possui as duas vertentes de certificação, justamente devido as discrepâncias observadas nas metodologias de cálculo que integram as regulamentações internacionais das duas potências mundiais analisadas, o que demonstra a necessidade de uma promoção de integração e unificação dos cálculos para esse produto, que representa uma importante peça do mercado mundial.

Assim, a importância dessa pesquisa vem ao encontro da necessidade de regulamentação de padrões internacionais de mesma referência na certificação do etanol como uma *commodity* global. Dessa forma, a discussão de diferentes metodologias de cálculo de emissões de GEE torna-se fundamental para a busca de padrões únicos internacionais para a comercialização do etanol de cana-de-açúcar em nível mundial como um único produto, e conseqüentemente, um único padrão de referência para diferentes mercados.

7.1 Recomendações para uma padronização de metodologia de emissões de GEE

Um dos objetivos do estudo é o de apresentar algumas recomendações sobre o que deveria abranger uma proposta de base unificada para o cálculo das emissões de GEE do biocombustível de cana-de-açúcar – bioetanol –, com base nas metodologias estudadas (GREET e BioGrace). Salienta-se que tais recomendações servem para fomento de discussões mais aprofundadas do tema, visto sua amplitude e complexidade.

Assim, no que tange a primeira fase da ACV, ou seja, o cultivo da cana de açúcar, os métodos são bem parecidos em suas considerações, pois tratam-se da utilização e produção de produtos químicos, tais como pesticidas e fertilizantes; na fase de colheita da cana de açúcar são consideradas utilização de queimadas, porém em proporções diferentes.

Conforme visto no estudo anteriormente, o Estado de São Paulo, maior produtor nacional de etanol, destaca-se em políticas para a redução da colheita da cana queimada. Portanto, considerar que 100% da cana colhida é queimada não se apresenta como a solução mais correta. Neste estado, em 2012, aproximadamente 27% do volume de cana colhido foi queimada (ALISSON, 2013). Já os dados do CTBE apresentam que 18,4% da cana de açúcar brasileira é queimada. Portanto, considerar algo entre os valores projetados pelo GREET – 15% – e o que é considerado pelo CTBE deve ser o mais factível.

A fase seguinte à colheita é o transporte da matéria prima, que acaba por ser semelhante entre as metodologias; porém, são divergentes em relação aos dados observados pelo CTBE (entre 19 e 20 km/TC nos dados padrões das metodologias e 27,3 km/TC para os dados CTBE). Isso traz à tona a necessidade de adequação dos cálculos para obtenção de um número comum, o que pode ser desenvolvido em um trabalho futuro.

Na parte de transporte do etanol tem-se particularidades e distâncias de acordo com o país de destino e nesta fase são consideradas as emissões decorrentes do transporte terrestre e marítimo. Sugere-se que a contabilização ou não destas distâncias seja debatida na elaboração de uma metodologia padrão, uma vez que são variáveis conforme o país comprador. No entanto, se contabilizadas as distâncias no cálculo, o ônus do impacto acaba sendo alocado para o produtor do biocombustível.

No que tange a cogeração de energia, visto que de acordo com aferições do Balanço Energético Nacional (BRASIL, 2016), esta representou 3,51% da geração de energia elétrica no Brasil em 2015. Importante ainda relatar que em 2006, esta mesma cogeração de energia representava apenas 0,20% da matriz elétrica nacional. Portanto, a etapa de geração desse coproduto não pode ser ignorada quando se leva em conta a mensuração das emissões de GEE do ciclo de vida do etanol de cana-de-açúcar. Logo, um método unificado deve contar com essa fase do processo, e essa cogeração deve ser considerada como um crédito de emissões de GEE ao final dos cálculos.

De acordo com Bourguignon (2015), as mudanças indiretas no uso da terra decorrentes do avanço da plantação de culturas de bioenergia não podem ser monitoradas, apenas modeladas. Além disso, não existe na literatura um consenso a respeito de como mensurar esse impacto sobre as emissões de GEE para os biocombustíveis. E mesmo no que tange essa consideração para as fronteiras da ACV

da regulamentação norte americana, são feitas projeções sobre esse item por meio do modelo *Global Trade Analysis Project* (GTAP), um modelo multi-regional e multi-setorial de equilíbrio geral computável que estima mudanças na produção agrícola mundial por meio de cenários econômicos e políticos (EPA, 2010).

De acordo com a figura 14, o bioetanol de cana de açúcar e o biodiesel de óleo de palma são os únicos dentre os biocombustíveis analisados cujas emissões em todos os cenários estudados apresentam porcentagens negativas, o que sugere que, uma vez que as estimativas de mudança indireta no uso da terra tenham sido levadas em conta, o biocombustível produzido a partir dessa cultura energética emite menos GEE do que o combustível ao qual se propõe a substituição, no caso do etanol de cana-de-açúcar, a gasolina. Assim, em um cenário mais pessimista, as mudanças indiretas no uso da terra não anulariam a capacidade do bioetanol de cana-de-açúcar em mitigar as emissões em relação ao combustível fóssil. Neste sentido, esse item poderia ser estudado mais profundamente, no caso de proposta unificada para os cálculos das emissões de GEE mas, conforme foi observado nas duas metodologias estudadas, apesar de ser considerado, os valores padrões são tidos como nulos.

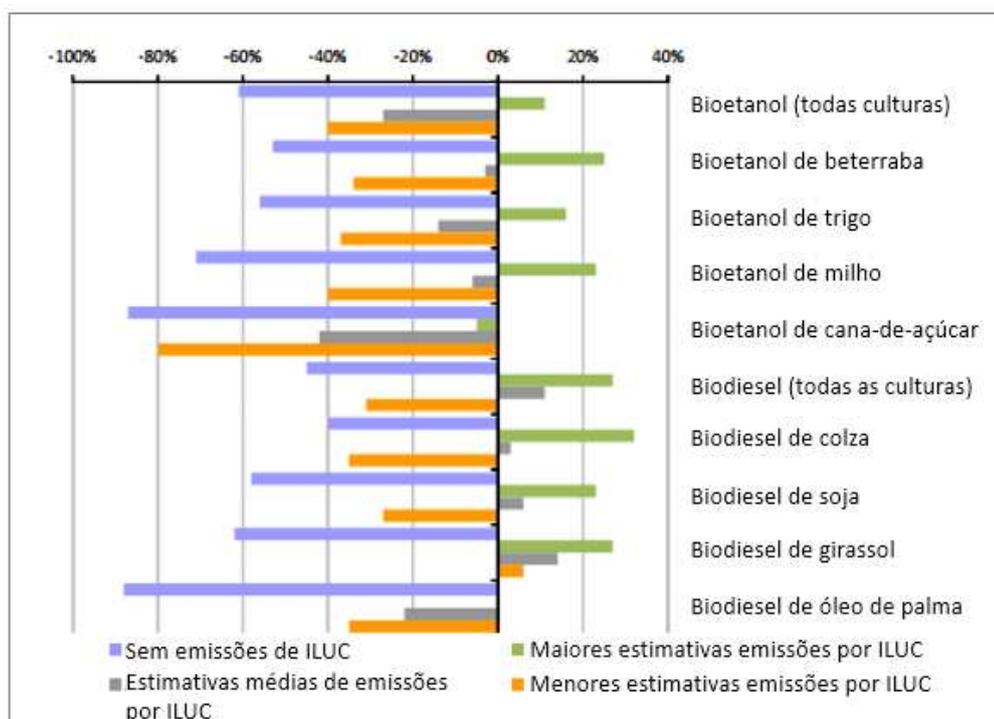


Figura 14 - Emissões líquidas de CO₂ dos biocombustíveis produzidos a partir de culturas selecionadas, expressas em % das emissões de CO₂ devido a mudanças indiretas no uso da terra (do inglês *Indirect Land Use Change* – ILUC). Fonte: Adaptado de Bourguignon (2015).

Já as mudanças diretas no uso da terra são levadas em conta em ambas as metodologias e mesmo nas fronteiras das regulamentações internacionais estudadas. Na regulamentação europeia existe uma seção que trata somente sobre esse assunto, portanto esse tema figura entre os que devem ser preservados na proposta de unificação da metodologia.

A unificação das metodologias deve também contar com a análise da fase de emissões decorrentes da queima do biocombustível no tubo de escape do veículo na ACV ainda que, de acordo com Cherubini e Strømman (2011), na maioria dos estudos esse item acaba por ser negligenciado, como ocorre para o BioGrace e para a Diretiva Europeia, enquanto que para outros são estimados apenas emissões de GEE, como N_2O e CH_4 . Assim, segundo Cherubini (2010), se a intenção for a de comparar a possibilidade de substituição do combustível fóssil pelo biocombustível, ignorar a etapa de utilização do biocombustível para gerar movimento e as emissões geradas pelo veículo pode levar a suposições inconsistentes a respeito do ciclo de vida daquele biocombustível. Daí a importância de tal consideração.

Por fim, em termos da relevância da redução de emissões devido a alocação da cogeração de energia nas usinas, ainda não existe um consenso a respeito, mas, conforme visto anteriormente, houve um aumento exponencial na participação desta na matriz elétrica brasileira de mais de 1000% nos últimos 10 anos, desde 2006. Por conseguinte, esta etapa deve ser bem avaliada e provavelmente estaria presente na proposta unificada.

Vale ressaltar que em termos de discussões internacionais sobre um padrão para os cálculos das emissões de GEE decorrentes do ciclo de vida dos biocombustíveis, poder-se-ia, à exemplo do que ocorreu com os produtos transgênicos, que há época da década de 90 e início de 2000, apresentavam-se como fruto de desacordos e conflitos entre países (OLIVEIRA; SILVEIRA, 2013), criar um espaço de discussão ou um grupo de trabalho, cujo objetivo seria o de fomentar debates a respeito da criação de um protocolo mundial, como ocorrera com o Protocolo de Cartagena. Isto com o intuito de propor padronização a esse cálculo com uma proposta concisa, equilibrada e clara a todos os países, de acordo com as necessidades mundiais.

Referências

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040. Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura.** Rio de Janeiro, 2001.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **O que é Certificação e como obtê-la?** [2014?]. Disponível em: <<http://www.abnt.org.br/certificacao/o-que-e>>. Acesso em: 30 jan. 2015.

ACEA. EUROPEAN AUTOMOBILE MANUFACTURER'S ASSOCIATION. **JEC Consortium publishes study on biofuels.** 2011. Disponível em: <<http://pr.euractiv.com/pr/jec-consortium-publishes-study-biofuels-91134>>. Acesso em: 10 mai. 2015.

ALISSON, E. **Redução de queimadas da cana já produz resultados.** 2013. Disponível em: <http://agencia.fapesp.br/reducao_de_queimadas_da_cana_ja_produz_resultados/17870/>. Acesso em: 30 out. 2015.

ANL. ARGONNE NATIONAL LABORATORY. **Greenhouse Gases, Regulated Emissions and Energy Use in Transportation (GREET) Model 2016.** Disponível em: <<http://greet.es.anl.gov/>>. Acesso em: 30 nov. 2016.

BAA. BIOFUEL ASSOCIATION OF AUSTRALIA. **Ethanol use around the world.** 2016. Disponível em: <<http://biofuelsassociation.com.au/biofuels/ethanol/ethanol-use-around-the-world/>>. Acesso em: 22 jan. 2016.

BECKMAN, J. **Biofuel Use in International Markets : The Importance of Trade.** EIB-144, U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service. 2015. Disponível em: <https://www.ers.usda.gov/webdocs/publications/eib144/53707_eib144.pdf>. Acesso em: 23 jan. 2016.

BIOGRACE. **About the BioGrace Project.** [2016]. Disponível em: <http://www.BioGrace.net/content/abouttheBioGraceproject/about_the_BioGrace_project>. Acesso em: 02 out. 2016.

_____. **The BioGrace GHG calculation tool: a recognised voluntary scheme.** 2015. Disponível em: <<http://BioGrace.net/home>>. Acesso em: 15 jul. 2016.

BONSUCRO. BETTER SUGARCANE INITIATIVE. **In Numbers.** 2016. Disponível em: <<http://bonsucro.com/site/in-numbers/>>. Acesso em: 19 out. 2016.

_____. **Padrão de Produção Bonsucro - incluindo o Padrão de Produção Bonsucro UE. Versão 4.1.1.** 2015. Disponível em: <http://bonsucro.com/site/wp-content/uploads/2013/02/PT_BonsucroStandard_v4.1.1_all.pdf>. Acesso em: 31 set. 2016.

BOURGUIGNON, D. **EU biofuels policy: Dealing with indirect land use change.** European Union, Fev. 2015. Disponível em: <

[http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2015/548993/EPRS_BRI\(2015\)548993_REV1_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2015/548993/EPRS_BRI(2015)548993_REV1_EN.pdf)>. Acesso em: 19 out. 2016.

BP STATS. **BP Statistical Review of World Energy 2015**. British Petroleum, Jun. 2015. Disponível em: <<http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/statistical-review-2015/bp-statistical-review-of-world-energy-2015-full-report.pdf>>. Acesso em: 16 out. 2016.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanco energético nacional**. Brasília, DF, 2016. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2016.pdf>. Acesso em: 04 jan. 2017.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Protocolo de Quioto**. [2015]. Brasília, DF. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/protocolo-de-quioto>>. Acesso em: 04 mar. 2016.

BURNHAM, A. **User Guide for the GREET Fleet Footprint Calculator 1.1**. 2009. Disponível em: <<https://greet.es.anl.gov/publication-4elg4zj7>>. Acesso em: 04 mar. 2016.

CARMO, J. B. et al. **Infield greenhouse gas emissions from sugarcane soils in Brazil: Effects from synthetic and organic fertilizer application and crop trash accumulation**. GCB Bioenergy, v. 5, n. 3, p. 267–280, 2013. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1757-1707.2012.01199.x/full>>. Acesso em: 22 jun. 2016.

CENAMO, M. C. **Mudanças climáticas, o protocolo de Quioto e mercado de carbono**. CEPEA-USP, p. 1–20, 2004. Disponível em: <http://laboratorios.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/28/2014/05/cenamo_mc.pdf>. Acesso em: 04 jun. 2016.

CHERUBINI, F. **GHG balances of bioenergy systems - Overview of key steps in the production chain and methodological concerns**. Renewable Energy, v. 35, n. 7, p. 1565–1573, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2009.11.035>>. Acesso em: 04 jan. 2017.

CHERUBINI, F.; STRØMMAN, A. H. **Life cycle assessment of bioenergy systems: State of the art and future challenges**. Bioresource Technology, v. 102, n. 2, p. 437–451, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2010.08.010>>. Acesso em: 04 jun. 2016.

CHERUBINI, F.; STRØMMAN, A. H.; ULGIATI, S. **Influence of allocation methods on the environmental performance of biorefinery products – A case study**. Resources, Conservation and Recycling, v. 55, n. 11, p. 1070–1077, 2011. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344911001273>>. Acesso em: 4 jun. 2016.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira – Cana-de-açúcar – Safra 2015/16 – Terceiro levantamento**. 2015. Disponível em:

<http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15_12_17_09_03_29_boletim_cana_portugues_-_3o_lev_-_15-16.pdf>. Acesso em: 08 jun. 2016.

COSTA, W. R. **Capacidade estática para etanol dos Portos Brasileiros: Santos e Paranaguá**. 2013. Disponível em: <<http://esalqlog.esalq.usp.br/wp-content/uploads/2015/05/Capacidade-est%C3%A1tica-para-etanol-dos-Portos-Brasileiros-Santos-e-Paranagu%C3%A1-COSTA-W.-R..pdf>>. Acesso em: 02 nov. 2016.

CRC. COORDINATING RESEARCH COUNCIL. **Transportation Fuel Life Cycle Assessment: Validation and Uncertainty of Well-to-Wheel GHG Estimates**. 2013. Disponível em: <<https://crcao.org/reports/recentstudies2013/E-102/CRC%20E%20102%20Final%20Report.pdf>>. Acesso em: 30 out. 2016.

DAVIS, S. C.; ANDERSON-TEIXEIRA, K. J.; DELUCIA, E. H. **Life-cycle analysis and the ecology of biofuels**. Trends in Plant Science, v. 14, n. 3, p. 140–146, 2009. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1360138509000478>>. Acesso em: 24 jul. 2016.

DENVIR, B. **Sustainability Criteria for Biofuels**. Energy Community, October-December 2014. Disponível em: <https://www.energy-community.org/portal/page/portal/ENC_HOME/DOCS/3606189/0F863ACA7E305A88E053C92FA8C09A43.PDF>. Acesso em: 2 jun. 2016.

ECODESENVOLVIMENTO.ORG. **Glossário de Termos**. [2016]. Disponível em: <<http://www.ecodesenvolvimento.org/glossario-de-termos/glossario-de-termos/>>. Acesso em: 02 jun. 2016.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Quais são os países que mais emitem gases do efeito estufa?**. [2015]. Disponível em: <http://www.aquecimento.cnpm.embrapa.br/conteudo/historico_aq_paises.htm>. Acesso em: 05 jun. 2016.

ENGELBRECHT, L. **O setor sucroenergético brasileiro e os princípios de certificação socioambiental Bonsucro: desafios e oportunidades**. Universidade de São Paulo, 2012. Disponível em: <http://www.iee.usp.br/biblioteca/producao/2012/Monografias/LucasEngelbrecht_IEE_03.pdf>. Acesso em: 25 jun. 2016.

ENMC. ENTIDADE NACIONAL PARA O MERCADO DE COMBUSTÍVEL. **Sustentabilidade**. Disponível em: <<http://www.enmc.pt/pt-PT/atividades/biocombustiveis/entidade-coordenadora-do-cumprimento-dos-criterios-de-sustentabilidade--ecs-/sustentabilidade/>>. Acesso em: 10 abr. 2016.

EPA. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Renewable Fuel Annual Standards**. 2014. Disponível em: <<https://www.epa.gov/renewable-fuel-standard-program/renewable-fuel-annual-standards>>. Acesso em: 30 out. 2016.

_____. **Renewable Fuel Standard Program (RFS2) Regulatory Impact Analysis**. 2010. Disponível em: <<https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-08/documents/420r10006.pdf>>. Acesso em: 30 out. 2016.

_____. **Understanding Global Warming Potentials**. 2016. Disponível em: <<https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>>. Acesso em: 31 out. 2016.

EUROPEAN BIOFUEL. **Advanced Biofuels in Europe**. [2016]. Disponível em: <<http://www.biofuelstp.eu/advancedbiofuels.htm>>. Acesso em: 11 jul. 2016.

EUROPEAN COMMISSION. **Commission implementing decision of 30 May 2013 on recognition of the 'BioGrace GHG calculation tool' for demonstrating compliance with the sustainability criteria under Directives 98/70/EC and 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council**. 2013. Disponível em: <http://www.BioGrace.net/img/files/Commission_Implementing_Decision_on_BioGrace_as_an_international_voluntary_scheme_-_2013-06-01.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2016.

_____. **Directiva 2009/28/CE**. Jornal Oficial da União Europeia. 2009a. Disponível em: <<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0028&from=PT>>. Acesso em: 22 jul. 2015.

_____. **Directiva 2009/30/CE**. Jornal Oficial da União Europeia. 2009b. Disponível em: <<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0030&from=PT>>. Acesso em: 17 abr. 2016.

_____. **Directive 2009/30/EC amending Directive 98/70/EC on fuel quality**. 2009c. Disponível em: <<http://ec.europa.eu/environment/air/transport/pdf/art7a.pdf>>. Acesso em: 22 jul. 2015.

_____. **EMAS – Performance, Credibility, Transparency**. 2015. Disponível em: <http://ec.europa.eu/environment/emas/about/enviro_en.htm>. Acesso em: 29 abr. 2016.

_____. **Energias renováveis: Avançar para o objectivo de 2020**. 2011. Disponível em: <<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52011DC0031&from=EN>>. Acesso em: 18 abr. 2016.

FEDERAL REGISTER. **Regulation of fuels and fuel additives**. 2009. United States. Disponível em: <http://www.epa.gov/OMS/renewablefuels/rfs2_1-5.pdf>. Acesso em: 09 jun. 2015.

FERREIRA, D. A. F. **Complemento de Regra de Certificação**. 2012. Disponível em: <http://www.tuvrheinland.com.br/downloads/regras_complemento/910-CRC-003-01%20-%20Descricao%20do%20Processo%20de%20Certificacao%20BONSUCRO.pdf>. Acesso em: 26 jun. 2015.

FRITSCHÉ, U. R. et al. **Indirect Land Use Change and Biofuels**. European Parliament. Bruxelas, 2011. Disponível em: <<http://www.europarl.europa.eu/document/activities/cont/201203/20120301ATT39667/20120301ATT39667EN.pdf>>. Acesso em: 17 abr. 2016.

GRISOLI, R. **Comparação das emissões de gases do efeito estufa no ciclo de vida do etanol de cana-de-açúcar no Brasil e os critérios da Diretiva Européia para Energias Renováveis.** 2011. Universidade de São Paulo, 2011. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-10082011-152907/pt-br.php>>. Acesso em: 18 jun. 2015.

HATANAKA, M. **Certification, partnership, and morality in an organic shrimp network: Rethinking transnational alternative agrifood networks.** *World Development*, v. 38, n. 5, p. 706–716, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.worlddev.2009.11.001>>. Acesso em: 29 abr. 2016.

HEIJUNGS, R.; GUINÉE, J. B. **Allocation and “what-if” scenarios in life cycle assessment of waste management systems.** *Waste Management*, v. 27, n. 8, p. 997–1005, 2007. Acesso em: 30 out. 2016.

HENNECKE, A. M. et al. **Biofuel greenhouse gas calculations under the European Renewable Energy Directive - A comparison of the BioGrace tool vs. the tool of the Roundtable on Sustainable Biofuels.** *Applied Energy*, v. 102, p. 55–62, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.04.020>>. Acesso em: 10 abr. 2016.

HERAS-SAIZARBITORIA, I.; BOIRAL, O.; ARANA, G. **Renewing Environmental Certification in Times of Crisis.** *Journal of Cleaner Production*, v. 115, p. 214–223, 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652615012652>>. Acesso em: 29 abr. 2016.

HU, Z. et al. **Life cycle energy, environment and economic assessment of soybean-based biodiesel as an alternative automotive fuel in China.** *Energy*, v. 33, n. 11, p. 1654–1658, 2008.

IEA. INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA. **Protocolo Agroambiental do Setor Sucroenergético Paulista : Dados consolidados das safras 2007/2008 a 2013/2014.** 2014. Disponível em: <<http://www.iea.sp.gov.br/out/LerTexto.php?codTexto=13453>>. Acesso em: 26 mai. 2015.

IEA. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Key World Energy Statistics 2009.** *Statistics*, p. 82, 2015. Disponível em: <http://www.oecd-ilibrary.org/energy/key-world-energy-statistics-2009_9789264039537-en>. Acesso em: 11 jul. 2016.

IPCC. INTERGOVERNMENTAL PAINEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change.** 2014. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/>>. Acesso em: 02 nov. 2016.

_____. **IPCC Factsheet: What is the IPCC?.** 2013. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/news_and_events/docs/factsheets/FS_what_ipcc.pdf>. Acesso em: 31 out. 2016.

ISO. INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATIONS. **ISO-14044. Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines.** v. 2002, 2006. Acesso em: 30 out. 2016.

_____. **The ISO Survey of Management System Standard Certifications – 2014.** v. 16949, p. 6, 2014. Disponível em: <<http://www.iso.org/iso/home/standards/certification/iso-survey.htm>>. Acesso em: 29 abr. 2016.

KALTSCHMITT, M.; REINHARDT, G. A.; STELZER, T. **Life cycle analysis of biofuels under different environmental aspects.** Biomass and Bioenergy, v. 12, n. 2, p. 121–134, 1997. Acesso em: 21 jun. 2016.

KEELER, B. L. et al. **U.S. Federal Agency models offer different visions for achieving renewable fuel standard (RFS2) biofuel volumes.** Environmental Science and Technology, v. 47, n. 18, p. 10095–10101, 2013.

LENDLE, A.; SCHAUS, M. **Sustainability Criteria in the EU Renewable Energy Directive: Consistent with WTO Rules?** 2010. Disponível em: <<http://www.ictsd.org/downloads/2011/12/sustainability-criteria-in-the-eu-renewable-energy-directive-consistent-with-wto-rules.pdf>>. Acesso em: 11 mai. 2015.

MACEDO, I. D. C.; LEAL, M. R. L. V.; SILVA, J. E. A. R. **Balanço das emissões de gases do efeito estufa na produção e no uso do etanol no Brasil.** Secretaria do Meio Ambiente, Governo de São Paulo, 2004. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/download.php?idSecao=17&id=11168105>>. Acesso em: 02 nov. 2016.

MAKIYA, I.K. **Certificação do setor sucroenergético.** Capítulo 5. In: Salles Filho, S. (org.) Futuros do Bioetanol: Brasil na liderança?. Editora Elsevier Academic, 2015.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica.** 7. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica.** 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003.

MEZARоба, S.; MENEGUETTI, C. C.; GTROFF, A. M. **Processos de produção do açúcar de cana e os possíveis reaproveitamentos dos subprodutos e resíduos resultantes do sistema.** Resumos IV Encontro de Engenharia de Produção Agroindustrial (FENILCAM), v. 1, p. 1–10, 2010. Disponível em: <http://www.fecilcam.br/anais_iveepa/arquivos/9/9-07.pdf>. Acesso em: 02 nov. 2016.

NEEFT, J. et al. **BioGrace Publishable final report.** 2012. Disponível em: <http://www.BioGrace.net/img/files/BioGrace_-_Final_publishable_report.pdf>. Acesso em: 31 out. 2016.

NL AGENCY. **Sustainability requirements for biofuels and biomass for energy in EU and US regulatory frameworks.** 2011. Disponível em: <http://english.rvo.nl/sites/default/files/2013/12/Report_EU_and_US_biomass_legislation_-_Partners_for_Innovation.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2015.

NOVACANA.COM. **Como é feito o processamento da cana-de-açúcar nas usinas.** 2016a. Disponível em: <<https://www.novacana.com/usina/como-e-feito-processamento-cana-de-acucar/>>. Acesso em: 20 set. 2016.

_____. **Portos usados na exportação de etanol Projeções e perspectivas.** 2016b. Disponível em: <<https://www.novacana.com/etanol/portos-usados-exportacao/>>. Acesso em: 5 out. 2016.

_____. **Processos de fabricação do etanol.** 2016c. Disponível em: <<https://www.novacana.com/etanol/fabricacao/>>. Acesso em: 10 out. 2016.

OECD/FAO. **OECD-FAO Agricultural Outlook 2015.** Paris: OECD Publishing, 2015. Disponível em: <http://www.oecd-ilibrary.org/agriculture-and-food/oecd-fao-agricultural-outlook-2015/biofuels_agr_outlook-2015-13-en>. Acesso em: 06 jun. 2016.

OLIVEIRA, A. L. R. **Logística do Etanol no Brasil.** Capítulo 3. In: Salles Filho, S. (org.) *Futuros do Bioetanol: Brasil na liderança?*. Editora Elsevier Academic, 2015.

OLIVEIRA, A. L. R.; SILVEIRA, J. M. F. J. **O caminho da coexistência: da regulação dos produtos transgênicos à criação dos mercados diferenciados.** Organizações Rurais & Agroindustriais, Lavras, v. 15, n. 2, p. 253–272, 2013. Disponível em: <<http://revista.dae.ufla.br/index.php/ora/article/view/681>>. Acesso em: 03 jan. 2017.

OLIVEIRA, E. C.; PEREIRA, R. S.; GASPAR, M. A. **Implementação de certificação ambiental Better Sugarcane Initiative – Bonsucro: Estudo de caso no setor sucroenergético.** Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, v. 55, n. 79, p. 24–45, 2013.

RAMÍREZ, P. K. S. **Análise de métodos de alocação utilizados em avaliação do ciclo de vida.** Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

REIN, P. W. **Sustainable production of raw and refined cane sugar.** SIT Conference, n. 2009, p. 1–12, 2011. Disponível em: <http://bonsucro.com/assets/rein_paper.pdf>. Acesso em: 26 jun. 2016.

REIN, P. W. **Sustainable sugar production.** 2012. Disponível em: <<http://www.thermalenergysystems.com/bsst/papers/2012agm1.pdf>>. Acesso em: 11 jul. 2016.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria do Meio Ambiente. **Desafios.** [2015a]. Disponível em: <<http://www.ambiente.sp.gov.br/etanolverde/protocolo-agroambiental/desafios/>>. Acesso em: 2 dez. 2015.

_____. **Zoneamento Agroambiental para o Setor Sucroalcooleiro.** [2015b]. Disponível em: <<http://www.ambiente.sp.gov.br/etanolverde/zoneamentoAgroambiental.php>>. Acesso em: 2 dez. 2015.

SCHNEPF, R.; YACOBUCCI, B. D. **Renewable Fuel Standard (RFS): Overview and Issues.** CRS Report for Congress, 2013. Disponível em: <<http://fas.org/sgp/crs/misc/R40155.pdf>>. Acesso em: 29 abr. 2015.

STERN, N. **STERN REVIEW: The Economics of Climate Change Executive Summary.** 2007. Disponível em:

<<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:STERN+REVIEW:+The+Economics+of+Climate+Change+Executive+Summary#5>>. Acesso em: 29 dez. 2016.

UNCTAD. UNITED NATIONS CONFERENCE ON TRADE AND DEVELOPMENT. **The State of the biofuels market: Regulatory, Trade and Development Perspectives**. 2014. Disponível em: <http://unctad.org/en/PublicationsLibrary/ditcted2013d8_en.pdf>. Acesso em: 11 jul. 2016.

UNICA. **60 países já adotaram mistura obrigatória de biocombustíveis aos combustíveis fósseis**. 2014. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/noticia/27251092920325965467/60-paises-ja-adotam-mistura-obrigatoria-de-biocombustiveis-aos-combustiveis-fosseis/>>. Acesso em: 11 mai. 2015.

VON BLOTTNITZ, H.; CURRAN, M. A. **A review of assessments conducted on bio-ethanol as a transportation fuel from a net energy, greenhouse gas, and environmental life cycle perspective**. *Journal of Cleaner Production*, v. 15, n. 7, p. 607–619, 2007. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652606001016>>. Acesso em: 23 jul. 2016.

WANG, M. **The Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation (GREET) Model Version 1.5**. 1999. Disponível em: <<https://greet.es.anl.gov/publication-h3k81jas>>. Acesso em: 01 mai. 2016.

WANG, M. et al. **Well-to-wheels energy use and greenhouse gas emissions of ethanol from corn, sugarcane and cellulosic biomass for US use**. *Environmental Research Letters*, v. 7, n. 4, p. 45905, 1 dez. 2012. Disponível em: <<http://stacks.iop.org/1748-9326/7/i=4/a=045905?key=crossref.bc2d92022ddca565108ad62fb6e4201d>>. Acesso em: 30 out. 2016.

WBA. WORLD BIOENERGY ASSOCIATION. **Biofuels for Transport**. 2013. Disponível em: <http://www.worldbioenergy.org/sites/default/files/Biofuels_for_Transport_short_version_0.pdf>. Acesso em: 22 jul. 2015.

WILLERS, C. D.; RODRIGUES, L. B.; SILVA, C. A. **Avaliação do ciclo de vida no Brasil: uma investigação nas principais bases científicas nacionais**. *Produção*, v. 23, p. 436–447, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-65132012005000037>>. Acesso em: 26 out. 2016.

WWF. WORLD WIDE FUND FOR NATURE. **As mudanças climáticas**. O que é o Aquecimento Global?. [2015]. Disponível em: <http://www.wwf.org.br/wwf_brasil/historia_wwf_brasil/>. Acesso em: 22 jul. 2015.

ANEXO A – Visão geral da ferramenta BIOGRACE

BIOGRACE I
Harmonised Calculations of
Biofuel Greenhouse Gas Emissions in Europe

www.biograce.net Intelligent Energy Europe

About Directory

Directory of pathways Version 4d for Compliance

- 1 [Ethanol from sugar beet](#)
- 2 [Ethanol from wheat \(process fuel not specified\)](#)
- 3 [Ethanol from wheat \(lignite CHP\)](#)
- 4 [Ethanol from wheat \(natural gas steam boiler\)](#)
- 5 [Ethanol from wheat \(natural gas CHP\)](#)
- 6 [Ethanol from wheat \(straw CHP\)](#)
- 7 [Ethanol from corn \(community produced\) \(natural gas CHP\)](#)
- 8 [Ethanol from sugarcane](#)
- 9 [FAME from rape seed](#)
- 10 [FAME from sunflower](#)
- 11 [FAME from soybean](#)
- 12 [FAME from palm oil \(process not specified\)](#)
- 13 [FAME from palm oil \(methane capture at oil mill\)](#)
- 14 [FAME from waste vegetable or animal oil](#)
- 15 [HVO from rape seed](#)
- 16 [HVO from sunflower](#)
- 17 [HVO from palm oil \(process not specified\)](#)
- 18 [HVO from palm oil \(methane capture at oil mill\)](#)
- 19 [PVO from rape seed](#)
- 20 [CNG from biogas from municipal organic waste](#)
- 21 [CNG from biogas from wet manure](#)
- 22 [CNG from biogas from dry manure](#)

ANEXO B – Ferramenta BIOGRACE após aplicação dos dados do CTBE



BIOGRACE I
Harmonised Calculations of
Biofuel Greenhouse Gas Emissions in Europe



www.biograce.net



Intelligent Energy Europe

About
Directory

Production of Ethanol from Sugarcane
Version 4d for Compliance

Overview Results

All results in <i>g CO_{2,eq} / MJ_{Ethanol}</i>	Non- allocated results	Allocation factor	Allocated results	Total	Actual/ Default	Default values RED Annex V.D
Cultivation e_{ec}				13,6	A	14
Cultivation of sugarcane	14,05	95%	13,41			14,45
Transport of vinasse and	0,22	95%	0,21			
Processing e_p				0,4	A	1
Ethanol plant	0,42	95%	0,40			0,84
Transport e_{td}				3,2	A	9
Transport of sugarcane	1,15	95%	1,10			0,84
Transport of ethanol	1,14	100%	1,14			7,70
Transport to filling station	0,93	100%	0,93			0,44
Land use change e_l	0,0	95,4%	0,0	0,0		0
Bonus or e_{co2}	0,0	100,0%	0,0	0,0		0
		100%	0,1	0,1		0
Totals	17,8			17,1		24

Allocation factors	Emission reduction
Ethanol plant	Fossil fuel reference (petrol)
0,954 to ethanol	83,8 g CO _{2,eq} /MJ
to electricity	GHG emission reduction
26,1 kWh/TG	80%
93,96 MJ/TG	163,062
7516,8 MJ/ha	0

Calculations in this Excel sheet.....

- strictly follow the methodology as given in Directives 2009/28/EC and 2009/30/EC
- follow J.E.C. calculations by using GWP values 25 for CH₄ and 298 for N₂O

As explained in "About" under "Inconsistent use of GWPs"

ANEXO C – Representação do transporte para o BIOGRACE após as substituições dos dados do CTBE

Transport of ethanol from plant to Europe, then to depot		Quantity of product	Calculated emissions				Info
Ethanol	1,000 MJ _{Ethanol} / MJ _{Ethanol}	155545,2 MJ _{Ethanol} ha ⁻¹ year ⁻¹	Emissions per MJ ethanol				per kg ethanol
		0,361 MJ / MJ _{Sugarcane, input}	g CO ₂	g CH ₄	g N ₂ O	g CO _{2, eq}	g CO _{2, eq}
Transport per							
Truck for liquids (Diesel)	[redacted] km (country of origin)	0,000 ton km / MJ _{Sugarcane, input}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fuel	Diesel						
Ship /product tanker 50kt (Fuel oil)	[redacted] km	0,0000 ton km / MJ _{Sugarcane, input}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fuel	HFO for maritime transport						
Truck for liquids (Diesel)	[redacted] 345 km (country of destination)	0,0046 ton km / MJ _{Sugarcane, input}	1,14	0,00	0,00	1,14	30,52
Fuel	Diesel	0,0069					
Energy consumption depot							
Export terminal	Electricity (NG CCGT) [redacted] MJ / MJ _{Ethanol}		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Import terminal	Electricity EU mix LV [redacted] MJ / MJ _{Ethanol}		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Depot inland	Electricity EU mix LV [redacted] MJ / MJ _{Ethanol}		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
			Total	1,14	0,00	0,00	1,14
			Result	g CO_{2, eq} / MJ_{Ethanol}			1,14

ANEXO D – Visão geral da ferramenta GREET

WTP

WTW

Data Editors

Simulation Parameters

Mapping

Products

Search...

- 1,4-Butanediol
- Acetone
- Acetylene
- AD Residue
- Additives
- Adhesives
- Adipic Acid

Results for **Averaged Ethanol Produced in US (at the Refueling Station)**
Output: Ethanol

Per of **Ethanol**

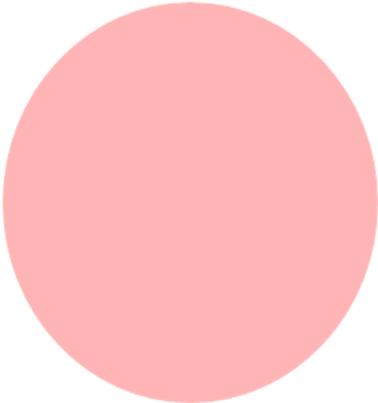
Target Year **2015**

Emissions

Well to Use	...
Emissions	...
CO2 Total	0,05 t
CO2	0,05 t
CO2_Biogenic	-7.56e-6 t
VOC	5.78e-5 t
CO	4.18e-5 t
NOx	9.87e-5 t
PM10	1.66e-5 t
PM2.5	6.09e-6 t
SOx	8.61e-5 t
CH4	1.33e-4 t

Well to Use

Averaged Ethanol Produced in US (at the Refueling Station)



	Ethanol Production from Corn Stover	0 %
Output after: Ethanol Transportation (Produced an...		
	Ethanol Production from Forest Residue	0 %
Output after: Ethanol Transportation (Produced an...		
	Ethanol Production from Miscanthus	0 %
Output after: Ethanol Transportation (Produced an...		
	Ethanol Production from Poplar	0 %
Output after: Ethanol Transportation (Produced an...		
	Ethanol Production from Sorghum	0 %
Output after: Ethanol Transportation (Produced an...		
	Ethanol Production from Sugarcane	100,00 %
Output after: Ethanol Transportation (Produ...		
	Ethanol Production from Willow	0 %
Output after: Ethanol Transportation (Produced an...		
	Ethanol Production from Corn and Corn stover (combined gallon)	0 %
Output after: Ethanol Transportation (Produced an...		
	Ethanol Production from Switchgrass	0 %
Output after: Ethanol Transportation (Produced an...		

ANEXO E – Ferramenta GREET após a substituição dos dados do CTBE

Drag and Drop Inputs below					
<p> Nitrogen</p> <p>Quantity: <input type="text" value="0,00 t"/></p> <p>Source: <input type="text" value="Pathway Mix"/></p> <p>Pathway Mix <input type="text" value="Pathway Mix: Brazil Nitroge"/></p>	<p> Phosphoric acid P205</p> <p>Quantity: <input type="text" value="0,00 t"/></p> <p>Source: <input type="text" value="Single Pathway"/></p> <p>Pathway <input type="text" value="Pathway: Phosphoric acid"/></p>				
<p> Potassium Oxide</p> <p>Quantity: <input type="text" value="0,00 t"/></p> <p>Source: <input type="text" value="Single Pathway"/></p>	<p> Calcium Carbonate</p> <p>Quantity: <input type="text" value="0,01 t"/></p> <p>Source: <input type="text" value="Single Pathway"/></p>				
Drag and Drop Group Inputs below					
<p>Group amount: <input type="text" value="68,60 MJ"/></p>					
<p> Diesel For Non Road Applications (High sulfur content)</p> <p>Share: <input type="text" value="100,00 %"/></p>	<table border="1"> <tbody> <tr> <td>Farming Tractor - Diesel For Non Road Engines</td> <td><input type="text" value="0 %"/></td> </tr> <tr> <td>Agricultural_Tractors_Diesel_HP600</td> <td><input type="text" value="100,00 %"/></td> </tr> </tbody> </table>	Farming Tractor - Diesel For Non Road Engines	<input type="text" value="0 %"/>	Agricultural_Tractors_Diesel_HP600	<input type="text" value="100,00 %"/>
Farming Tractor - Diesel For Non Road Engines	<input type="text" value="0 %"/>				
Agricultural_Tractors_Diesel_HP600	<input type="text" value="100,00 %"/>				

ANEXO F – Representação do Transporte e Distribuição para o GREET