

**BALANÇO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA DE BIODIESEL
PRODUZIDO A PARTIR DE SOJA E DENDÊ NO BRASIL**

Patricia Turano de Carvalho

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Planejamento Energético, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Planejamento Energético.

Orientador: Emilio Lèbre La Rovere

Rio de Janeiro

Março de 2012

BALANÇO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA DE BIODIESEL
PRODUZIDO A PARTIR DE SOJA E DENDÊ NO BRASIL


Patricia Turano de Carvalho

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM PLANEJAMENTO ENERGÉTICO.

Examinada por:



Prof. Emilio Lèbre La Rovere, D.Sc



Prof. Roberto Schaeffer, D.Sc



Dr. Luciano Basto Oliveira, D.Sc

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2012

Carvalho, Patricia Turano de

Balanço de Emissões de Gases de Efeito Estufa de Biodiesel Produzido a Partir de Soja e Dendê no Brasil / Patricia Turano de Carvalho. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2012.

XIII, 153 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Emilio Lèbre La Rovere

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Planejamento Energético, 2012.

Referencias Bibliográficas: p. 135-151.

1. Biodiesel de óleo vegetal. 2. Cadeia de produção. 3. Gases de Efeito Estufa. I. La Rovere, Emilio Lèbre. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Planejamento Energético. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais por toda a educação e valores que me deram e que permitiram que eu chegasse até aqui, e ao apoio dado mesmo durante os momentos difíceis vividos por nossa família nos últimos anos. Agradeço também à Helô, minha irmã, por compreender meu monopólio sobre o computador principal da casa.

Agradeço ao Prof. Emílio pela orientação e pelo apoio dado durante os momentos de maiores dificuldades, e agradeço a todos os outros professores do PPE por me proporcionarem momentos tão importantes de aprendizado ao longo do mestrado.

Também deixo aqui minhas palavras de gratidão a todos os funcionários do PPE, especialmente a Sandrinha e ao Paulo, que sempre estão de prontidão para atender às nossas solicitações.

Agradeço a todos os colegas e amigos que fiz no PPE e que compartilharam comigo momentos de aprendizado, dúvidas, desespero, distração, solidariedade, e outros muitos vividos ao longo desses últimos anos e que, de uma forma ou de outra, também me ensinaram algo durante o mestrado, especialmente à Carol e ao Giuseppe, pelo companheirismo e ajuda quando precisei.

Agradeço a todos do LIMA, pelos poucos, porém importantes, momentos que convivemos, e pela boa vontade de todos, principalmente à Carmen.

Agradeço ao Prof. Roberto Schaeffer e ao Dr. Luciano Basto Oliveira por aceitarem fazer parte da minha banca, e agradeço ao CNPQ pelo apoio financeiro durante o primeiro ano do mestrado.

Agradeço a todos os meus amigos que se preocuparam comigo e que compreenderam o meu sumiço. Estendo meus agradecimentos a todos os meus amigos que, embora não tenham me ajudado diretamente neste trabalho, me tornam uma pessoa melhor por serem meus amigos. Agradeço em especial ao Felipe, por tudo que sempre fez por mim.

E, por fim, agradeço ao meu namorado, Rodrigo, pelo amor, carinho e apoio incondicional me dado em todos os momentos difíceis. Sem ele esta dissertação não seria possível.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

BALANÇO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA DE BIODIESEL PRODUZIDO A PARTIR DE SOJA E DENDÊ NO BRASIL

Patricia Turano de Carvalho

Março/2012

Orientador: Emilio Lèbre La Rovere.

Programa: Planejamento Energético

O uso do biodiesel em substituição parcial ao diesel de origem fóssil em meios de transporte rodoviário possui, entre outras finalidades, o objetivo de reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) para a atmosfera. A maior parte ou totalidade das emissões de carbono provenientes de sua queima é anulada pela captura de carbono através do processo de fotossíntese realizado por plantas oleaginosas utilizadas na sua produção. No entanto, quando toda a cadeia de produção do biodiesel é levada em consideração, essa redução pode ser pequena ou até mesmo negativa. Nesse contexto, o presente trabalho comparou o biodiesel produzido a partir de soja com o biodiesel de dendê, de forma a verificar qual apresenta maior redução de emissões de GEE quando comparados entre si e ao diesel fóssil. As emissões estimadas para o biodiesel metílico de soja foram maiores que para o de dendê, mesmo quando a alocação das emissões entre os coprodutos da cadeia é considerada. Na comparação com o diesel, o biodiesel de soja apresentou um balanço de emissões negativo, com um aumento de 7,3% nas emissões quando a alocação não é considerada. O biodiesel de dendê apresentou um balanço positivo, reduzindo as emissões de GEE em 63,6%. Com a alocação por valor econômico, ambos apresentaram reduções em relação ao diesel, sendo de 36,0% para a soja e 66,6% para o dendê. Concluiu-se que, sob a ótica das emissões de GEE, o biodiesel de dendê representa uma alternativa mais promissora de produção de biodiesel para o Brasil se o cultivo dessa oleaginosa ocupar áreas degradadas disponíveis no país.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

GREENHOUSE GAS EMISSIONS BALANCE FROM BIODIESEL PRODUCED
FROM SOYBEAN AND PALM OIL IN BRAZIL

Patricia Turano de Carvalho

March/2012

Advisor: Emilio Lèbre La Rovere

Department: Energy Planning

Substituting fossil-based diesel by biodiesel as the primary fuel source for vehicles has the potential to significantly reduce greenhouse gas (GHG) emissions. Emissions from burning biodiesel are canceled by the capture of carbon during the photosynthesis of the plants used in production. However, when we take into consideration the process of producing biodiesel, the reduction of greenhouse gas emissions can be minor or even negative. In this context, the goal of this study was to compare biodiesel produced from soybean oil to biodiesel produced from palm oil in order to determine which fuel has the lowest emissions in relation to fossil diesel. Even when GHG allocation is considered along with the coproducts of the production chain, the estimated value of soy methyl biodiesel is bigger than the same amount of palm oil methyl biodiesel. When compared to fossil-based diesel, soy biodiesel presents a negative balance of emissions, with a 7,3% increase in emissions when the GHG allocation is not considered, while biodiesel from palm oil presented a positive balance, reducing GHG emissions by 63,6%. When coproduct emissions are accounted for using the market value allocation method, both biodiesel sources provide reduced emissions compared to fossil-based diesel: 36,0% for soy and 66,6% for palm oil. Assuming cultivation occurs in existing degraded areas, palm-based biodiesel is the more promising option for the production in Brazil from the perspective of GHG emissions.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	1
1. ASPECTOS GERAIS DO BIODIESEL	6
1.1. Conceituação e Características do Biodiesel.....	6
1.2. O Biodiesel no Mundo	12
1.3. O Biodiesel no Brasil	18
1.3.1. O PNPB.....	18
1.3.2. Produção e Comercialização de Biodiesel no Brasil	21
2. CADEIA PRODUTIVA DO BIODIESEL.....	32
2.1. Cultivo de Oleaginosas	34
2.1.1. Oleaginosas usadas na produção de biodiesel.....	34
2.1.2. Dendê	36
2.1.3. Soja	41
2.2. Extração do Óleo Vegetal	45
2.3. Produção de Biodiesel.....	48
3. ASPECTOS METODOLÓGICOS PARA REALIZAÇÃO DE BALANÇO DE EMISSÕES DE GEE	52
3.1. Contribuições da ACV para a Realização de um Balanço de Emissões	52
3.2. Metodologia Utilizada para Estimar as Emissões de GEE da Cadeia Produtiva do Biodiesel no Brasil	63
3.2.1. Emissões de GEE da produção dos principais insumos usados na lavoura ..	68
3.2.2. Emissões de GEE da combustão de diesel mineral nas máquinas agrícolas.	69
3.2.3. Emissões de CO ₂ da aplicação da cal ao solo	70
3.2.4. Emissões da aplicação de fertilizantes nitrogenados sintéticos e orgânicos ao solo	71
3.2.5. Emissões diretas de N ₂ O do manejo da lavoura.....	72
3.2.6. Emissões indiretas de N ₂ O do manejo da lavoura.....	74
3.2.7. Emissões do transporte entre as etapas agrícola e industrial.....	75
3.2.8. Emissões de GEE da etapa de extração do óleo vegetal.....	76
3.2.9. Emissões da etapa de produção de biodiesel.....	78
3.2.10. Emissões de GEE do consumo do biodiesel.....	80
4. BALANÇO DE EMISSÕES DO BIODIESEL PRODUZIDO A PARTIR DE SOJA E DENDÊ.....	82
4.1. Alguns Fatores de Emissão Utilizados	82
4.1.1. Fator de emissão da produção de diesel B0	82

4.1.2.	Fator de Emissão da Combustão de Diesel B0 em Máquinas Agrícolas Móveis	84
4.1.3.	Fator de Emissão da Combustão de Diesel B0 em Meios de Transporte Rodoviários	85
4.1.4.	Fator de Emissão da Combustão de Diesel B0 em Máquinas Térmicas Estacionárias	86
4.1.5.	Fatores de Emissão da Produção e da Aplicação de Cal nas Lavouras	87
4.1.6.	Fatores de Emissão da Produção de Pesticidas	88
4.1.7.	Fatores de Emissão da Produção de Fertilizantes Nitrogenados	88
4.1.8.	Fatores de Emissão da Produção de Fertilizantes com Fósforo	89
4.1.9.	Fatores de Emissão da Produção de Fertilizantes com Potássio	90
4.1.10.	Fatores de Emissão da Geração de Eletricidade da Rede no Brasil	91
4.1.11.	Fator de Emissão da Produção de Hexano	92
4.1.12.	Fatores de Emissão da Produção e da Combustão de Metanol.....	92
4.1.13.	Fator de Emissão da Produção de Catalisador	93
4.2.	Considerações Gerais	93
4.3.	Principais insumos usados na cadeia produtiva do biodiesel	94
4.3.1.	Soja	94
4.3.2.	Dendê	97
4.4.	Balanco de Emissões do Biodiesel	100
4.4.1.	Emissões de GEE da produção dos principais insumos usados na lavoura ..	100
4.4.2.	Emissões de GEE da combustão de diesel nas máquinas agrícolas	100
4.4.3.	Emissões de CO ₂ da aplicação da cal ao solo	101
4.4.4.	Emissões da aplicação de fertilizantes nitrogenados ao solo	102
4.4.5.	Emissões diretas de N ₂ O do manejo da lavoura.....	102
4.4.6.	Emissões indiretas de N ₂ O do manejo da lavoura.....	104
4.4.7.	Emissões totais da etapa agrícola	105
4.4.8.	Emissões do transporte entre etapa agrícola e a industrial.....	106
4.4.9.	Emissões de GEE da etapa de extração do óleo vegetal.....	108
4.4.10.	Emissões de GEE da etapa de produção do biodiesel.....	109
4.4.11.	Emissões totais de GEE da produção do biodiesel	110
4.4.12.	Emissões do consumo do biodiesel.....	110
4.4.13.	Emissões Totais do Biodiesel	111
4.4.14.	Alocação entre os coprodutos	111
4.4.15.	Comparação com o diesel mineral	114
5.	DISCUSSÃO	117
5.1.	Considerações acerca dos resultados encontrados.....	117

5.2.	Análise dos resultados.....	118
5.3.	Comparação dos resultados com alguns resultados da literatura	122
5.3.1.	Soja	122
5.3.2.	Dendê	126
5.4.	Outros aspectos ambientais da produção e uso de biodiesel.....	130
6.	CONCLUSÃO	132
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	135

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Reação de transesterificação.	6
Figura 2 - Produção de biodiesel (em t de barris/dia) por país, de 2006 a 2010.	14
Figura 3 - Quantidade de biodiesel produzida (em bilhões de litros) pelos principais países produtores do mundo no ano de 2010.....	15
Figura 4 - Comparação entre a produção e a capacidade instalada de produção de biodiesel no mundo (em milhões de toneladas), de 2002 a 2008.	16
Figura 5 - Produção anual de biodiesel (em m ³) por região, de 2005 a 2011.	23
Figura 6 - Porcentagem de cada matéria-prima usada na produção de biodiesel no Brasil, no ano de 2011 (até novembro).	24
Figura 7 - Evolução anual da produção, da demanda compulsória e da capacidade nominal autorizada pela ANP, Brasil 2005 – 2010 (em 10 ³ m ³ /ano).	28
Figura 8 - Volumes arrematados por região durante o 23º leilão (agosto 2011).....	30
Figura 9 - Diferentes organizações das etapas de produção de biodiesel.	33
Figura 10 - Partes do fruto de dendê de onde são extraídos óleos de valor comercial. ..	36
Figura 11 - Tempo (em anos) necessário para zerar as emissões de CO ₂ liberadas na mudança de uso do solo com a redução de emissões do uso do biocombustível em substituição a um correspondente fóssil.....	62
Figura 12 – Variação das emissões (em %) da substituição de 1 t diesel por 1 t de biodiesel.	119

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Metas e quantidades obrigatórias de uso/mistura de biodiesel ao diesel para alguns países.	17
Tabela 2 - Produção de Biodiesel B100 (em m ³) no Brasil e por Estado/ Região, de 2005 a 2011.	22
Tabela 3 – Contribuição de cada região (em %) à produção nacional de biodiesel, de 2005 a 2011.	23
Tabela 4 - Evolução do número de famílias participantes do PNPB nas regiões brasileiras, de 2005 a 2010.	25
Tabela 5 - Distribuição do valor da produção da agricultura familiar (em %) para o PNPB, segundo principais matérias primas, de 2008 a 2010.	26
Tabela 6 - Valor (em R\$ milhões) e participação (em %) da agricultura familiar no fornecimento de matérias-primas para empresas de biodiesel no Brasil, de 2008 a 2010.	26
Tabela 7 - Potencialidade de produção de oleaginosas por região geográfica.	34
Tabela 8 – Teor médio de óleo (%), produção em 2010 (10 ³ t), rendimento de óleo (t óleo/ha), ciclo de vida e origem do óleo para algumas oleaginosas produzidas no Brasil.	35
Tabela 9 - Produtividade esperada de um plantio de palma no Pará, em t cachos de frutos frescos (cff)/ha.	37
Tabela 10- Produção anual de cachos de frutos frescos (cff) de dendê por estado e região do Brasil, de 2005 a 2010, em mil toneladas de cff.	38
Tabela 11 - Produtividade média de dendê por estado e região do Brasil, de 2005 a 2010, em kg de cff/ha.	39
Tabela 12 - Produção de soja (em mil toneladas) nas safras de 2005/06 a 2009/10, por região e estado.	42
Tabela 13 - Área cultivada de soja (em mil hectares) nas safras de 1979/80, 1989/90, 1999/2000, e de 2005/06 a 2009/10, por região e estado.	43
Tabela 14 - Produtividade média da soja nas safras de 1979/80, 1989/90, 1999/2000, e de 2005/06 a 2009/10, por região e estado, em kg/ha.	44
Tabela 15 - Emissões de gases de efeito estufa do processo de produção do diesel no Brasil.	82

Tabela 16 - Fatores de emissão de GEE da produção de diesel utilizados na literatura, em kg CO ₂ e/GJ diesel.	83
Tabela 17 - Emissões de GEE do uso de diesel em máquinas agrícolas móveis, em kg do GEE/GJ de diesel.	84
Tabela 18 - Emissões de gases de efeito estufa do uso de diesel em máquinas agrícolas móveis, em kg do GEE/t de diesel.	84
Tabela 19- Emissões (kg do GEE/GJ de diesel) do uso de diesel em meios de transporte rodoviários.	85
Tabela 20 – Emissões (kg do GEE/t de diesel) do uso de diesel em meios de transporte rodoviários.	85
Tabela 21 - Emissões (kg do GEE/t de diesel) do uso de diesel em máquinas térmicas estacionárias.	87
Tabela 22 - Emissões (kg do GEE/t de diesel) do uso de diesel em máquinas térmicas estacionárias.	87
Tabela 23 - Emissões de GEE da produção de fertilizantes nitrogenados, em kg do GEE/t de N.	89
Tabela 24 - Emissões de GEE da produção de fertilizantes de fosfato, em kg do GEE/t de P ₂ O ₅	90
Tabela 25 - Emissões de gases de efeito estufa da produção de fertilizantes de potássio, em kg do GEE/t de K ₂ O.	91
Tabela 26 - Emissões de CO ₂ da geração de eletricidade no Brasil, em t CO ₂ /MWh.	92
Tabela 27 - Quantidades (Q), em t/ha, e fatores de emissão da produção (FE _{prod}), em t CO ₂ e/t, dos principais insumos utilizados nas lavouras de soja e dendê.	100
Tabela 28 - Quantidade de diesel (Q _{diesel}) utilizado nas lavouras de soja e dendê, em t/ha, e outros parâmetros usados na equação A2.	101
Tabela 29 - Quantidade de cal (Q _{cal}) utilizada nas lavouras de soja e dendê, em t/ha, e fator de emissão da aplicação de cal ao solo (FE _{calagem}), em t CO ₂ e/t de cal.	101
Tabela 30 - Quantidades de N sintético (Q _{Nsin}), N orgânico (Q _{Norg}) e de ureia (Q _{ureia}) utilizadas nas lavouras de soja e dendê, fator de emissão de N ₂ O da aplicação de N e fator de emissão de CO ₂ da aplicação de ureia.	102
Tabela 31 - Parâmetros para calcular a quantidade de N nos resíduos da lavoura de soja que retornam ao solo (Q _{CR}).	103
Tabela 32 - Frações e fatores para as equações A6.1 e A6.2	105

Tabela 33 - Emissões da etapa agrícola por diferentes processos e total, para a soja e a palma, em t CO ₂ e/ha.	106
Tabela 34 - Valores utilizados para os parâmetros da equação T1.....	108
Tabela 35 - Quantidades (Q), em t de insumo/t de biodiesel produzido, e fatores de emissão da produção (FE _{prod}) dos principais insumos utilizados para extração de óleo de soja e dendê, em t CO ₂ e/t de insumo.	108
Tabela 36 - Valores utilizados para os demais parâmetros das equações I1 e I2.	109
Tabela 37 - Quantidades (Q), em t de insumo/t de biodiesel produzido, e fatores de emissão da produção (FE _{prod}) dos principais insumos utilizados para produção de biodiesel metílico de soja e dendê, em t CO ₂ e/t de insumo.	109
Tabela 38 - Emissões das etapas de produção e emissões totais da produção de biodiesel metílico de soja e de palma, em t CO ₂ e/t biodiesel produzida.	110
Tabela 39 – Preços de mercado dos produtos da cadeia de produção do biodiesel, em R\$/t.....	112
Tabela 40 – Alocação por valor econômico e por massa das emissões totais entre os produtos da cadeia produtiva do biodiesel de soja e de palma, em t CO ₂ e/t de biodiesel.	113
Tabela 41 – Percentual de emissões (%) relativo a cada etapa do ciclo de vida do biodiesel de soja e dendê, para os casos sem alocação e com alocação por valor econômico.	114
Tabela 42 - Emissões totais do diesel mineral, incluindo a produção e o consumo, em t CO ₂ e/t diesel.....	114
Tabela 43 – Emissões Totais do Biodiesel, em t CO ₂ e, para 1,122 t de biodiesel, e em kg CO ₂ e para 1,071 l de biodiesel e para 1 GJ de biodiesel, e redução de emissões em relação ao diesel, em % e em kg CO ₂ e/l.	116
Tabela 44 – Reduções em emissões de poluentes da combustão de biodiesel B100 e das misturas B20 e B5 em relação ao diesel puro.....	131
Tabela 45 - Matérias-primas utilizadas (%) na produção mensal de biodiesel no Brasil em 2010.....	152
Tabela 46 - Área cultivada de palma (em hectares) entre 2006 e 2010, por região e estado.....	153

INTRODUÇÃO

Um combustível renovável é um combustível derivado de biomassa renovável, ou seja, material de origem orgânica proveniente de seres vivos que viveram na mesma época do seu uso¹ (CENBIO, 2012). Dessa forma, pode-se dizer que a humanidade usa esse tipo de combustível desde milhares de anos atrás. A descoberta do fogo permitiu ao homem se utilizar da biomassa, principalmente a lenha, para aquecimento e o preparo de alimentos. A gordura animal também vem sendo utilizada há milhares de anos como combustível para essas e outras atividades, embora, diferentemente da lenha², seu uso tenha diminuído com a intensificação do uso de outros combustíveis.

Embora o uso de combustíveis renováveis venha acompanhando a humanidade há milhares de anos, com a descoberta dos combustíveis fósseis, estes começaram a ser usados preferencialmente para a realização de certas atividades por apresentarem melhores rendimentos que a lenha e que outros combustíveis de origem vegetal e animal (PORTO, 2006; U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2011). Com a criação de máquinas e de meios de transporte movidos a vapor, entre os séculos XVII e XIX, o uso de combustíveis fósseis foi se intensificando até os dias atuais, criando uma grande dependência do homem em relação a esses combustíveis (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2011). No entanto, eles são combustíveis não renováveis, pois se formam a partir de matéria orgânica soterrada e submetida a certas condições de pressão e temperatura em um processo que demora milhares de anos, e, portanto, seu ciclo de renovação fica muito além da escala de vida humana.

Além de não renováveis, esses combustíveis liberam vários gases poluentes e gás carbônico (CO₂) quando utilizados, devolvendo para atmosfera o carbono armazenado no subsolo durante milhares de anos. Esse gás é um dos principais gases causadores do

¹ Esta definição exclui os combustíveis fósseis, que, mesmo tendo sido originários de matéria orgânica vegetal e animal, necessitaram de milhões de anos para serem convertidos na forma que se encontram

² A lenha ainda é a principal fonte de energia primária em muitos países em desenvolvimento, principalmente países africanos (GARCIA, 2007; MACQUEEN & KORHALILLER, 2011).

efeito estufa. A intensificação desse fenômeno natural³ a níveis preocupantes vêm acontecendo por conta do aumento da concentração do CO₂ e de outros gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, para muito além da concentração atmosférica normal apresentada ao longo das últimas centenas de anos (IPCC, 2007). Esses GEE têm a propriedade de reter uma parte da radiação solar que é transformada em radiação infravermelha (calor) na superfície do planeta. Assim, parte do calor fica retida entre atmosfera e a superfície, o que tem provocado um aumento da temperatura média do planeta, levando a mudanças no clima com severas consequências para os seres vivos (IPCC, 2007; ROCHA, 2009).

Embora já existam há algumas décadas por parte da comunidade científica, as preocupações em torno das mudanças do clima vêm ganhando destaque na mídia e na sociedade de forma geral, tornando-se um assunto muito discutido na última década, inclusive em níveis políticos. Segundo o Painel Intergovernamental de Mudança do Clima, o IPCC, desde a Revolução Industrial até 2005, a concentração de CO₂ na atmosfera aumentou de 280 ppm para 379 ppm (partes por milhão) (IPCC, 2007). Vários pesquisadores afirmam que as consequências desse aumento já estão acontecendo, os fenômenos climáticos extremos estão se tornando cada vez mais frequentes, de forma que, para minimizar o problema, mudanças radicais deveriam ser feitas na forma que a humanidade vem vivendo atualmente. A redução do uso de combustíveis fósseis, através da produção de fontes renováveis de energia e de uma maior eficiência energética, somada a diminuição do desmatamento e queimadas de vegetações naturais são as principais medidas para reduzir a emissão de gases de efeito estufa para a atmosfera.

O investimento em fontes renováveis de energia vem sendo feito de maneira significativa em muitos países. Os biocombustíveis são um dos tipos de energia renovável que mais vem recebendo incentivos nas duas últimas décadas. A produção de biocombustíveis líquidos que substituam a gasolina e o diesel no setor de transportes tem se expandido muito pelo mundo por várias razões, entre elas: a busca pela

³ A existência desse fenômeno permite que a temperatura média da superfície do Planeta Terra seja propícia a vida. Sem esse efeito, essa temperatura média, que hoje é de 14°C, seria de – 19°C (IPCC, 2007).

segurança energética e redução das importações de petróleo e seus derivados, o aumento da demanda por combustíveis devido ao aumento populacional e ao crescimento esperado na economia de alguns países em desenvolvimento, a oportunidade de desenvolver a área rural e aumentar a quantidade de empregos no campo, e os aspectos ambientais positivos, entre eles a redução da emissão de poluentes e de gases de efeito estufa quando usados em substituição a um combustível fóssil (BERGHOUT, 2008; GNANSOUNOU *et al*, 2009; GBEP, 2011).

Ao mesmo tempo, o aumento da popularidade dos biocombustíveis tem provocado um aumento da preocupação em torno de suas cadeias de produção, devido aos impactos ambientais, sociais e econômicos que elas podem desencadear. Entre eles estão o desmatamento, a perda de biodiversidade, pressão adicional sobre os recursos aquáticos, e o aumento da demanda por terra e insumos agrícolas (GBEP, 2011). A possível redução da produção de alimentos e consequente aumento dos preços, e a mudança direta e indireta do uso da terra vêm sendo os principais pontos de crítica contra os biocombustíveis (GERMAN *et al*, 2010; FARGIONE *et al*, 2008; SEARCHINGER *et al*, 2008; FAO, 2008; FAO, 2010).

Em resposta a essas críticas, várias certificações estão sendo desenvolvidas em todo o mundo, de modo a estabelecer critérios e indicadores que comprovem a sustentabilidade do biocombustível em diversos aspectos. Entre as que já existem, pode-se citar a RSPO (Roundtable on Sustainable Palm Oil) e a RSB (Roundtable on Sustainable Biofuels) (SCHAEFFEL & LA ROVERE, 2010). Um dos aspectos mais comentados é a própria redução das emissões de GEE.

As emissões de CO₂ vindas da combustão do biocombustível podem ser consideradas nulas quando toda a matéria-prima para sua produção tem origem renovável, como o etanol ou o biodiesel⁴ produzido a partir de plantas, pois o carbono liberado durante essa combustão foi fixado pela planta pelo processo de fotossíntese, meses ou anos antes. Dessa forma, ao queimar em um motor um biocombustível ao invés de um combustível fóssil, é considerado que se deixa de emitir certa quantidade de carbono para a

⁴ No caso do biodiesel, é necessário um álcool para sua produção; este álcool pode ser de origem renovável ou fóssil e, caso seja de origem fóssil, parte das emissões de GEE da combustão do biodiesel não podem ser consideradas nulas.

atmosfera. No entanto, quando se considera também a produção desse biocombustível e não só a combustão, a redução pode não ser tão efetiva ou até mesmo negativa, emitindo-se mais GEE usando o biocombustível do que seu equivalente fóssil.

Alguns estudos apontam para uma baixa redução ou até um aumento de emissões de GEE com o uso de biocombustíveis de primeira geração em substituição aos combustíveis fósseis quando se considera toda cadeia produtiva do biocombustível, desde a produção da matéria-prima até a distribuição e uso do biocombustível pelos consumidores (TILMAN *et al*, 2006; FARGIONE *et al*, 2008; SEARCHINGER *et al*, 2008; DAVIS *et al*, 2009). Outros estudos avaliaram, também ou somente, o balanço energético de alguns biocombustíveis e encontraram balanços negativos: se gasta mais energia para produzir determinado biocombustível do que a energia presente nele (PIMENTEL & PATZEK, 2005). No entanto, os resultados são bastante influenciados pelos aspectos metodológicos levados em consideração, e também pela matéria-prima utilizada e seu modo de produção.

Nesse contexto, esta dissertação buscou analisar os aspectos relacionados à elaboração de um balanço de emissões de GEE para o biodiesel produzido a partir de plantas oleaginosas cultivadas no Brasil, sendo o objetivo deste estudo fazer uma comparação entre a soja e o dendê como matérias-primas para a produção de biodiesel, buscando responder o quão favoráveis ou desfavoráveis são seus balanços de emissões de GEE em relação ao óleo diesel. O óleo diesel é definido como um destilado médio derivado do refino do petróleo, próprio para o consumo em motores de Ciclo Diesel, e neste estudo ele foi denominado diesel fóssil, diesel mineral ou somente diesel.

O capítulo 1 apresenta uma explanação geral sobre biodiesel: definição, características em comparação com o diesel, surgimento e consumo no mundo, o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB), produção e comercialização no Brasil. O capítulo 2 apresenta cada etapa da cadeia de produção do biodiesel feito a partir de oleaginosas no Brasil: cultivo da matéria-prima, a extração do óleo vegetal e a produção de biodiesel, dando atenção especial à soja e ao dendê. O capítulo 3 discute os aspectos metodológicos relacionados com a elaboração de um balanço de emissões e mostra as opções adotadas para realizar as estimativas de emissões para o biodiesel de soja e o biodiesel de dendê. O capítulo 4 apresenta os dados utilizados e os resultados das

estimativas para cada oleaginosa. O capítulo 5 faz uma análise e discussão dos resultados e o capítulo 6 expõe as conclusões.

1. ASPECTOS GERAIS DO BIODIESEL

1.1. Conceituação e Características do Biodiesel

O biodiesel é um combustível derivado de biomassa renovável para uso em motores a combustão interna com ignição por compressão, que pode substituir, parcial ou totalmente, o óleo diesel derivado de petróleo. Pode ser obtido por diferentes processos, tais como o craqueamento, esterificação ou a transesterificação, a partir de gorduras animais, óleos vegetais, ou ainda de espuma de esgoto. Ele pode ser usado puro ou misturado ao óleo diesel em diversas proporções, tanto em motores automotivos de ciclo diesel (de caminhões, tratores, camionetas, automóveis, entre outros) como em motores estacionários (geradores de eletricidade ou calor) (BRASIL, 2005; MME, 2011).

A transesterificação é o processo mais utilizado atualmente para a produção desse biocombustível (MME, 2011). Consiste numa reação química dos triglicerídeos⁵ (gorduras animais e óleos vegetais) com um álcool (geralmente etanol ou o metanol), estimulada por um catalisador, produzindo ésteres de cadeia longa, o biodiesel, e glicerina, produto com aplicações diversas na indústria química. Outros coprodutos, além da glicerina, podem ser produzidos, dependendo das matérias-primas usadas. A Figura 1 exemplifica uma reação de transesterificação.

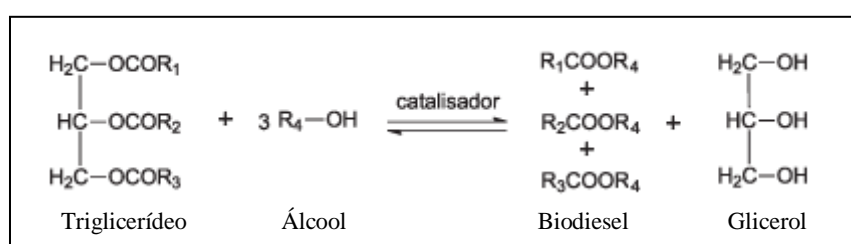


Figura 1 - Reação de transesterificação.

Fonte: Adaptado de Geris *et al* (2007).

De acordo com a proporção em que o biodiesel é misturado ao diesel, este combustível misturado passa a se chamar BX, sendo X o percentual de biodiesel adicionado ao combustível fóssil. A mistura de 2% de biodiesel ao diesel de petróleo é chamada de

⁵ Ésteres formados por ácidos graxos e glicerol (LOBO, 2007).

B2, a de 5% é chamada de B5 e assim sucessivamente, até o biodiesel puro, denominado B100 (ANP, 2010; MME, 2011).

Os combustíveis podem possuir variações em suas características, mesmo sendo classificados como de um mesmo tipo (diesel, gasolina, etanol, biodiesel, entre outros). Essas variações geralmente estão relacionadas à matéria-prima que lhes deu origem. O diesel, por exemplo, é um derivado do petróleo obtido com o processo de refino. Suas características, portanto, estão relacionadas ao petróleo que lhe deu origem: petróleo mais leve ou mais pesado, com maior ou menor teor de enxofre, entre outras. Já o biodiesel é formado a partir de óleos vegetais ou gorduras animais, que se diferenciam entre si devido a combinação de ácidos graxos que os formam. Essa combinação interfere nas propriedades dos óleos e gorduras e consequentemente nas do biodiesel produzido a partir deles. Mesmo assim, de forma geral, o biodiesel apresenta características que lhe permitem ser usado em mistura ao diesel sem necessidade de adaptação ou regulação dos motores de Ciclo Diesel, ainda que haja diferenças em certas propriedades entre os dois (PARENTE, 2006). Essas diferenças, bem como as vantagens ou desvantagens relativas a elas, estão evidenciadas nos parágrafos seguintes.

Uma das vantagens técnicas é que o biodiesel possui ponto de fulgor bem maior que o do diesel: por volta de 150°C para o biodiesel e variando de 52 a 66° C para o diesel (SZULCZYK & McCARL, 2010; FETRANSPOR, 2011). O ponto de fulgor é a temperatura na qual um líquido se torna inflamável em presença de uma faísca ou chama, o que faz do biodiesel um combustível mais seguro que o diesel (CARRARETTO *et al*, 2004; PARENTE, 2006). Além disso, o biodiesel, dependendo do seu material de origem, também tem um maior índice de cetano que o diesel. Quanto maior o índice de cetano, melhor a qualidade da ignição e da combustão em um motor do ciclo Diesel. O índice de cetano do biodiesel varia de 48 a 61, enquanto do diesel mineral varia entre 40 e 50⁶ (SZULCZYK & McCARL, 2010). Segundo Szulczyk & McCarl (2010), um biodiesel produzido a partir de óleos/gorduras saturados, como sebo

⁶ O índice de cetano do cetano, 100, é usado como referência.

animal, apresenta um maior índice de cetano que um derivado de óleos insaturados⁷, como o de soja.

Em relação às desvantagens técnicas, o biodiesel tem pontos de névoa e de fluidez mais altos que o diesel mineral. O ponto de névoa é a temperatura em que um líquido, quanto mais frio, começa a cristalizar, e o ponto de fluidez é a temperatura na qual o líquido começa a se transformar numa espécie de gel, e passa a não escoar livremente (PARENTE, 2006; SZULCZYK & McCARL, 2010). Esses pontos também variam em relação à origem do biodiesel: em biodiesel de origem animal esses pontos são ainda mais altos em relação ao diesel que o biodiesel derivado de óleos vegetais (SZULCZYK & McCARL, 2010). Portanto, essas características exercem influência nas temperaturas sob as quais o biodiesel pode ser utilizado ou armazenado, podendo trazer complicações quando utilizado no inverno em certos locais ou em qualquer época em países bem frios. No entanto, não representam grandes problemas em países tropicais como o Brasil.

Além disso, o biodiesel tem um maior índice de iodo que o diesel, sendo que esse índice é bastante variável de acordo com o óleo vegetal com que é produzido. Ele expressa o grau de insaturação do líquido, que está relacionado com a estabilidade das propriedades químicas contra a oxidação (estabilidade oxidativa). Quanto maior o índice de iodo, maior é o número de insaturações e menor é a estabilidade oxidativa, o que aumenta a chance de polimerização (CASTRO *et al*, 2010b). Assim, combustíveis formados a partir de óleos com alto índice de iodo podem formar polímeros⁸ que vão se acumulando no fundo do tanque de combustível, podendo causar problemas no sistema de injeção e outros prejuízos⁹ (ARREDONDO, 2009; VILLELA, 2009).

⁷ A insaturação corresponde à quantidade de ligações duplas entre os átomos de carbono das moléculas.

⁸ Estruturas sólidas semelhantes a plástico (VILLELA, 2009).

⁹ Isso tem representado um entrave ao aumento da mistura de biodiesel ao diesel, uma vez que são constantes as reclamações de donos de frotas de caminhões ou ônibus e donos de distribuidoras e postos revendedores em relação a esses depósitos no fundo de tanques de combustível ou de armazenamento, o que exige uma maior periodicidade de limpeza, acarretando em maiores custos (BIODIESELBR, 2010).

Contrariamente, quanto menos insaturações existem em um óleo ou gordura (quanto mais saturado ele for), mais viscoso ele é¹⁰. Os óleos vegetais são muito mais viscosos que o diesel, e o processo de transformação em biodiesel reduz substancialmente essa propriedade. Ainda assim, a viscosidade do biodiesel é maior que a do diesel, podendo ser pouco maior ou muito maior, de acordo com a composição do óleo que lhe deu origem. A viscosidade é a medida de resistência interna ao escoamento de um líquido (CASTRO *et al*, 2010b). Ela interfere contrariamente no escoamento e na capacidade lubrificante do combustível. Combustíveis com alta viscosidade tendem a formar grandes gotas na injeção, o que pode causar má combustão e aumento da fumaça e emissões do escapamento. Entretanto, combustíveis com baixa viscosidade podem não fornecer lubrificação suficiente, o que provoca aumento do desgaste no motor (CASTRO *et al*, 2010b). Segundo Parente (2006), os motores Diesel exigem que o combustível, ao passar por suas peças em movimento, as lubrifique. Uma maior lubrificação aumenta a vida útil do motor ao lubrificar o sistema de injeção e a bomba de combustível (SZULCZYK & McCARL, 2010). Como a utilização de óleos diesel com teores cada vez menores de enxofre vem se tornando obrigatória em muitos países, a adição de biodiesel ao diesel devolve a lubricidade perdida com a redução da quantidade de enxofre (CARRARETTO *et al*, 2004).

Outra desvantagem em relação ao diesel é que o biodiesel tem uma maior capacidade de absorver água, chamada higroscopicidade, que aliada a maior quantidade de oxigênio presente nele e a maior capacidade de dissolver substâncias orgânicas devido a sua composição, contribui para a proliferação de microorganismos que degradam o biocombustível, podendo levar a corrosão dos tanques e consequentes falhas prematuras dos sistemas de injeção de combustível (FETRANSPOR, 2011). Para se evitar isso, cuidados devem ser tomados, como a verificação da existência de água no tanque de armazenamento e transporte do combustível, principalmente após a lavagem desses sistemas (PARENTE, 2006; CAVALCANTI, 2010 *apud* FETRANSPOR, 2011).

Em relação às características energéticas e ambientais, o biodiesel apresenta um conteúdo mais alto de oxigênio e uma quantidade similar de hidrogênio em relação ao

¹⁰ A gordura animal possui um maior percentual de ácidos graxos saturados que os óleos vegetais e por isso é sólida à temperatura ambiente (VILLELA, 2009).

diesel e, por isso, seu poder calorífico inferior (PCI) é menor que o do diesel, apresentando uma diferença em torno de 10% (CARRARETTO *et al*, 2004). De acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN) (EPE, 2011a), o PCI do biodiesel é 9.000 kcal/kg, enquanto o do diesel é de 10.100 kcal/kg. Alguns autores indicam um maior consumo de biodiesel em relação ao diesel, ou da mistura biodiesel e diesel em relação ao diesel puro, para gerar a mesma quantidade de trabalho no motor, enquanto outros apontam que as diferenças não são significativas. Parente (2006) coloca que a combustão mais completa do biodiesel em relação ao diesel, explicada a seguir, pode tornar o consumo específico do biocombustível equivalente ao do combustível fóssil.

A maior quantidade de oxigênio permite uma queima mais completa do biodiesel quando comparado ao diesel, reduzindo a emissão de material particulado (MP), monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos (HC) (SHARMA *et al*, 2009). Entretanto, aumenta a emissão de óxidos nitrosos (NO_x) (SZULCZYK & McCARL, 2010). Todos esses compostos comprometem a qualidade do ar e são prejudiciais à saúde: o CO diminui o suprimento de oxigênio às células do corpo, os MP e os HC podem causar irritações na pele, nos olhos, na garganta, além de danificar os pulmões, causando doenças como asma, bronquite e câncer de pulmão, e os NO_x podem reagir com os HC na atmosfera na presença de radiação solar e formar o ozônio (O₃) troposférico, que também acarreta nos mesmos problemas de saúde citados acima (YOUNG, 2010 *apud* FETRANSPOR, 2011).

FETRANSPOR (2011) aponta para o fato de que alguns estudos indicam que as emissões de NO_x também são maiores para o biodiesel do que para o diesel porque a câmara de combustão do motor é projetada para a composição química do diesel, que é diferente, e que ajustes na regulação do ponto de injeção do motor ou o uso de conversores catalíticos podem reduzir essas emissões. Além disso, ainda de acordo com FETRANSPOR (2011), o uso de um aditivo para redução das emissões de NO_x se tornaria obrigatório nos veículos a diesel fabricados partir de 2012 no Brasil.

O biodiesel apresenta uma quantidade muito reduzida ou nula de enxofre, mercúrio, fósforo e compostos aromáticos, vários deles carcinogênicos (SHARMA *et al*, 2009; SZULCZYK & McCARL, 2010). O enxofre liberado na queima de combustíveis fósseis é emitido na forma de óxidos de enxofre (SO_x), que, ao serem lançados na

atmosfera, podem formar compostos de ácido sulfúrico e assim formar a chuva ácida, que traz muitos prejuízos aos ecossistemas e aos bens materiais humanos. O SO_x , em altas concentrações, também é muito prejudicial à saúde (BAIRD, 2002 *apud* FETRANDSPOR, 2011). No entanto, quanto mais enxofre, maior capacidade de lubrificação tem o combustível.

A poluição atmosférica é apontada como uma das principais causas de morte nas grandes cidades, e são altos os gastos do sistema de saúde devido aos problemas causados por ela. O uso de biodiesel, de forma geral, reduz a quantidade de poluentes emitidos à atmosfera, trazendo benefícios à saúde da população e economia aos cofres públicos. Além disso, sua queima não contribui ou contribui pouco para o aumento líquido do nível de CO_2 na atmosfera, uma vez que esse carbono foi capturado da atmosfera pela planta através da fotossíntese, podendo ser usado como forma de mitigar as emissões de gases de efeito estufa no setor de transportes ou de geração de energia elétrica. Pouco carbono pode ser emitido na queima caso o biodiesel tenha sido produzido com o uso de metanol na transesterificação, visto que o metanol mais usado é de origem fóssil. É importante observar que a vantagem frente à intensificação do efeito estufa existe quando levamos em conta somente a etapa da queima do biodiesel no motor. Considerando todo seu ciclo produtivo, essa vantagem pode não existir ou mesmo se tornar uma desvantagem, sendo esse o objetivo de investigação desse estudo.

Além das características técnicas e ambientais, existem várias outras de caráter social e econômico que se apresentam como vantagens ou desvantagens do uso do biodiesel em substituição parcial ou total ao diesel. Uma das principais vantagens é que o biodiesel é um combustível renovável, pois é produzido a partir de parte de plantas ou de gordura animal, sendo ambos recursos que a princípio não vão se esgotar. Além disso, a produção de biodiesel pode ser usada como forma de gerar renda para classes sociais fragilizadas, como agricultores familiares, promovendo o desenvolvimento rural e ajudando a manter homem no campo, reduzindo assim a migração para áreas urbanas, cujos problemas relativos à superpopulação (acesso a empregos, moradia, sistema de saúde, entre outros) são bastante conhecidos.

Para os países importadores de petróleo e/ou de diesel mineral, a produção interna de biodiesel pode representar uma importante vantagem econômica, tanto pela economia

de recursos financeiros como pelo aumento da segurança energética¹¹ (BERGHOUT, 2008; SZULCZYK & McCARL, 2010). Além disso, a menor demanda por petróleo e seus derivados pode potencialmente reprimir o crescimento dos preços desses combustíveis fósseis (SZULCZYK & McCARL, 2010).

Como desvantagem econômica, tem-se o fato de que o biodiesel é mais caro que o diesel, mesmo contando com subsídios governamentais, pois suas matérias-primas possuem alto custo de produção, além de que o biodiesel compete por elas com mercados tradicionais de alimentação e indústrias farmacêuticas ou de cosméticos. Somado a isso, muitas delas são *commodities* no mercado internacional, e seus preços variam de acordo com ele, interferindo na decisão de seu produtor em relação à destinação (GARCIA, 2007).

Conclui-se que as características técnicas do biodiesel, embora não sejam iguais as do diesel mineral, não apresentam grandes diferenças que inviabilizem seu uso em motores de ciclo diesel, ainda mais quando misturado ao combustível fóssil. Em termos econômicos, a desvantagem do maior preço do biodiesel pode se contrapor à vantagem da redução da importação de petróleo ou diesel. Em termos ambientais, de forma geral, o uso do biodiesel apresenta vantagens em relação ao uso do diesel, porém essas vantagens podem se tornar desvantagens quando a análise de toda a cadeia de produção do biocombustível é feita.

1.2. O Biodiesel no Mundo

A produção de biodiesel no mundo se intensificou a partir da década de 80, quando a primeira patente de um processo de fabricação desse biocombustível foi desenvolvida por um brasileiro, o Prof. Expedito Parente da Universidade Federal do Ceará. No entanto, os óleos vegetais já eram usados em motores de combustão interna desde a

¹¹ No entanto, em muitos países, o álcool necessário para produzir o biodiesel, geralmente metanol, acaba sendo importado, pelo menos uma parte, como acontece no Brasil. Dessa forma, a dependência em relação a outros países pode continuar.

criação desses motores, no final do século XIX, pelo inventor alemão Rudolph Diesel (GARCIA, 2007; SINISCALCHI, 2010).

Apesar do óleo de amendoim ter sido usado como demonstrativo para o funcionamento dessa invenção na Exposição Mundial de Paris, o petróleo tornou-se mais popular para o uso nesses motores por ser, na época, mais barato de ser produzido e apresentar melhores rendimentos que os óleos vegetais. Até o final dos anos 40, os motores de ciclo diesel consumiam petróleo filtrado e padronizado, com baixo nível de fracionamento. O combustível especificado como “óleo diesel” somente começou a ser usado com o surgimento dos motores de injeção direta, sem pré-câmara. A disseminação desses motores e do diesel se deu na década de 50, com a forte motivação de melhores rendimentos, resultando em consumos mais reduzidos de combustível (PARENTE, 2003).

Assim, nas primeiras décadas do século XX, os óleos vegetais foram utilizados somente em iniciativas esporádicas e espalhadas pelo mundo, e em situações de falta de combustíveis fósseis em certos locais, como durante as grandes Guerras Mundiais (RATHMANN, 2007; SHARMA *et al*, 2009; BIODIESELBR, 2011a).

O baixo custo de exploração e produção, a aparente abundância, a infinidade de produtos para qual servia de matéria-prima e o ótimo desempenho como combustível em comparação com o carvão mineral e a lenha fizeram do século XX a “Era do Petróleo”, pois esse combustível foi o grande impulsionador do progresso alcançado pela humanidade nesse período (NEUTZLING, 2009; PARENTE, 2003).

A percepção dos produtores de petróleo de que este era um combustível finito e de que, com as jazidas descobertas na época e o consumo desenfreado, ele poderia se esgotar em pouco tempo levou a um grande aumento nos preços durante a década de 70, as chamadas crises do petróleo. Assim, muitos países importadores, entre eles o Brasil, começaram a investir em outras fontes de combustível para reduzirem sua dependência em relação a esse combustível e seus derivados. Nessa época, o Governo Federal brasileiro criou o PROÁLCOOL, um programa de incentivo a produção de etanol a partir da cana de açúcar, com objetivo de se adicionar de 20 a 25% de etanol anidro à gasolina. Já na década seguinte, muitos veículos leves foram fabricados com ajustes para serem movidos somente a etanol. A aposta nesse combustível era tão alta no Brasil

que, em meados da década de 80, cerca de 90% dos veículos leves novos vendidos eram com motor movido ao combustível renovável e não à gasolina (ANP, 2010; BIODIESELBR, 2011a; RATHMANN, 2007).

Em relação ao biodiesel, a fabricação desse combustível no Brasil foi feita em escala suficiente para permitir que muitos testes em veículos pudessem ser desenvolvidos. Diversas experiências foram realizadas, porém o combustível não chegou a ser produzido para venda em escala comercial, por causa dos elevados preços dos óleos vegetais atrelados a uma queda nos preços dos barris de petróleo a partir de 1986. Os programas foram paralisados e as pesquisas interrompidas. No entanto, outros países, como a Áustria e a França, deram continuidade a suas pesquisas e começaram a produzir o biodiesel em escala comercial no final dos anos 80, sendo seguidos pelos EUA e outros países europeus durante a década de 90 (BIODIESELBR, 2011a; RATHMANN, 2007). A produção comercial de biodiesel na França, Alemanha e outros países europeus obteve sucesso devido aos fortes subsídios oferecidos pelos governos. Estes países, juntamente com os Estados Unidos, foram os principais produtores de biodiesel do mundo até alguns anos atrás, com destaque para a produção alemã, que se manteve muito superior a dos outros países.

No entanto, nos últimos anos a produção da Alemanha não tem crescido, enquanto a de outros países apresentou crescimento significativo, como a do Brasil e a da Argentina, conforme a Figura 2.

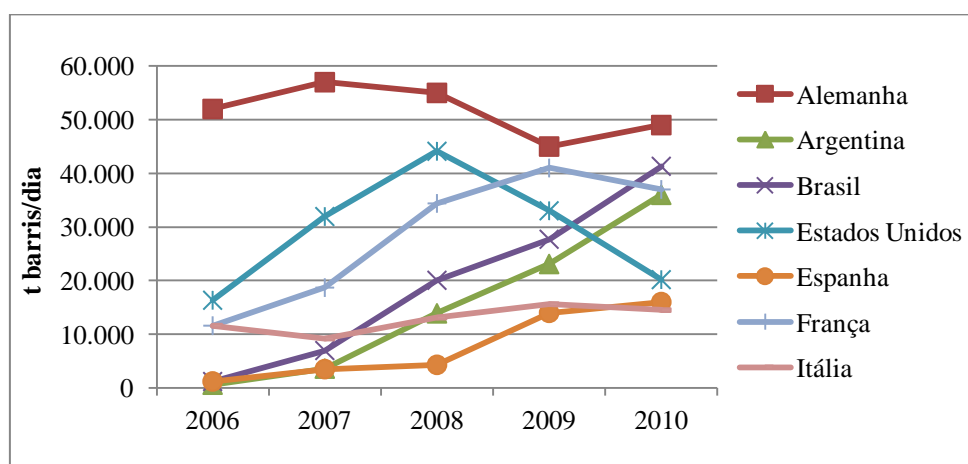


Figura 2 - Produção de biodiesel (em t de barris/dia) por país, de 2006 a 2010.

Fonte: Elaboração Própria, com base em dados de U.S. Energy Information Administration (2011).

A queda acentuada na produção norte-americana a partir de 2008 se deve ao cancelamento dos subsídios federais naquele ano (CAMARA ARGENTINA DE ENERGIAS RENOVABLES, 2011). Em 2010, os Estados Unidos ocuparam o quinto lugar na produção mundial de biodiesel, enquanto o Brasil assumiu o posto de segundo maior produtor mundial, produzindo cerca de dois bilhões de litros de biodiesel a menos do que a Alemanha, e a Argentina ocupou o terceiro lugar de maior produtor mundial, como mostra a Figura 3. Muitos outros países têm investido na produção de biodiesel e passaram a apresentar produções expressivas desse combustível, principalmente Malásia, Tailândia, Indonésia, China e Coreia do Sul (U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, 2011).

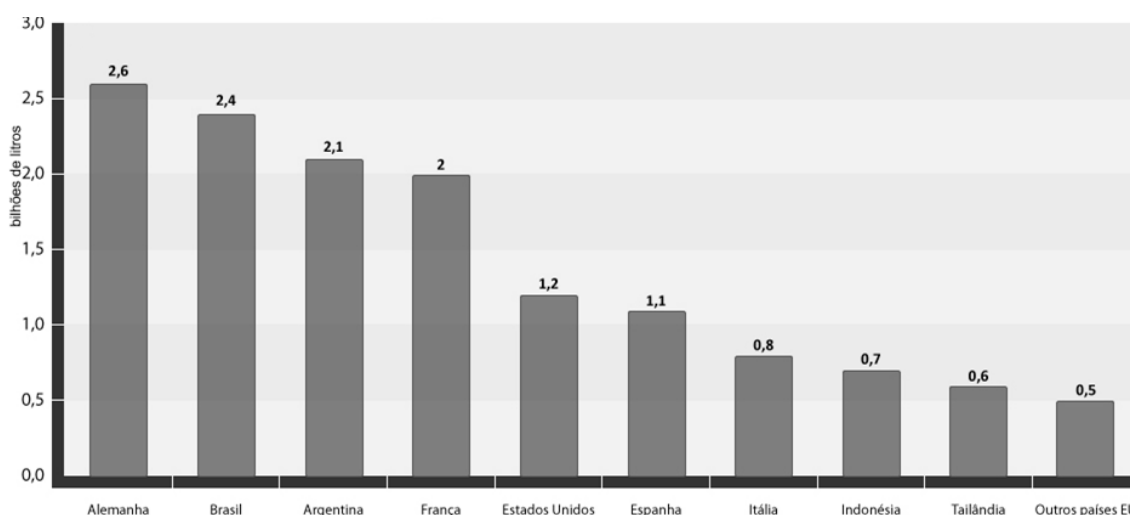


Figura 3 - Quantidade de biodiesel produzida (em bilhões de litros) pelos principais países produtores do mundo no ano de 2010.

Fonte: BiodieselBR (2011b)

Embora exista um expressivo crescimento da produção de biodiesel no mundo, ela tem ficado muito aquém da capacidade instalada de produção em vários países. A partir de 2005, a capacidade de produção passou a apresentar um crescimento significativamente maior do que a produção em si, como apresentado na Figura 4. De acordo com Lima & Castro (2010a), em 2008 os Estados Unidos tinham uma capacidade instalada quase quatro vezes superior a sua produção, enquanto na União Europeia era quase três vezes maior. Uma das explicações para a ociosidade da indústria mundial de biodiesel é que os incentivos e isenções governamentais, na maioria dos países produtores, têm sido dados apenas para as empresas produtoras de biodiesel e não para os produtores de matérias-primas, principalmente as de origem vegetal (LIMA & CASTRO, 2010a). Esta

se torna, portanto, a principal limitação da produção mundial. O Brasil também possui parte significativa de sua capacidade produtiva ociosa. Maiores detalhes são dados na próxima seção deste capítulo.

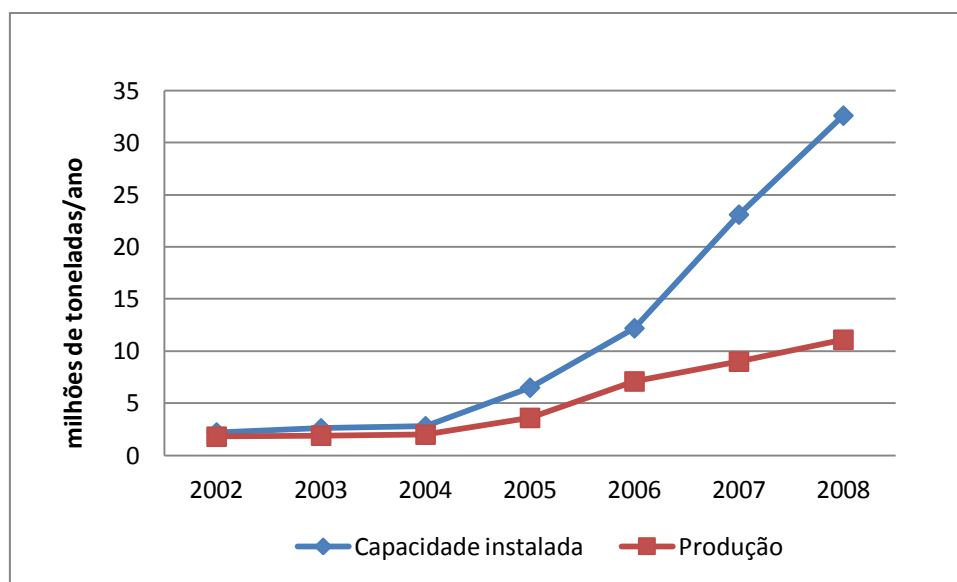


Figura 4 - Comparação entre a produção e a capacidade instalada de produção de biodiesel no mundo (em milhões de toneladas), de 2002 a 2008.

Fonte: EMERGING MARKETS ONLINE (2011).

Enquanto nos países da União Europeia a matéria-prima principal para a produção do biodiesel é o óleo de colza, o óleo de soja ocupa esse papel nos Estados Unidos, Brasil e Argentina. O óleo de palma (dendê) é a principal matéria-prima para o biodiesel na Indonésia, Malásia e Tailândia. De forma geral, a União Europeia também utiliza os óleos de soja, girassol e palma, embora em menor quantidade do que o de colza, além das gorduras animais, enquanto nos Estados Unidos também é significativo o uso de óleos vegetais residuais (usados em frituras).

Além de grandes produtores, Alemanha, França, Itália, Estados Unidos e Brasil são também grandes consumidores de biodiesel, sendo que para os três primeiros a importação tem sido necessária para suprir a demanda nos últimos anos, pois o consumo vem sendo maior que a produção interna desses países (LIMA & CASTRO, 2010a). Já a Argentina exporta quase que toda a sua produção. No Brasil, a produção vem sendo suficiente para suprir a demanda de B5 do mercado interno, criada pela obrigatoriedade do uso deste nível de mistura.

Na última década, não só os principais países produtores e consumidores de biodiesel, como diversos outros países, estabeleceram metas desejáveis ou mandatórias de uso de biodiesel em misturas com o diesel. Alguns não apresentaram metas específicas para o uso de biodiesel e sim de biocombustíveis de forma geral. A União Europeia, por exemplo, estabeleceu como meta para seus países-membros aumentar gradualmente a proporção de biocombustíveis no consumo total usado para transportes para até 10% em 2020, sendo que cada país teve que traçar um plano para cumprir essa meta. A Tabela 1 mostra metas de alguns outros países.

Tabela 1 - Metas e quantidades obrigatórias de uso/mistura de biodiesel ao diesel para alguns países.

País/Região	Obrigatoriedade ou Meta em 2010	Obrigatoriedade ou Meta Futura
Argentina	Obrigatório: B7	n.a.
Austrália	Obrigatório: B2 em New South Wales	Obrigatório: B5 em New South Wales (2012)
Bolívia	Meta: B2,5	Meta: B20 (2015)
Brasil	Obrigatório: B5	n.a.
Canadá	Obrigatório: B2-B3 (em 3 províncias)	Obrigatório: B2 (2012)
Chile	Meta: B5	n.a.
Colômbia	Obrigatório: B10	Obrigatório: B20 (2012)
Coréia	Obrigatório: B2	Obrigatório: B2,5 (2011) e B3 (2012)
Costa Rica	Obrigatório: B20	n.a.
Estados Unidos	Obrigatório: 48 bilhões de litros de biocombustíveis	Obrigatório: 136 bilhões de litros de biocombustíveis (2022)
Filipinas	Obrigatório: B2	Obrigatório: B5 (2011)
Índia	n.a.	Obrigatório: B20 (2017)
Indonésia	Obrigatório: B2,5	Obrigatório: B5 (2015) e B20 (2025)
Malásia	Obrigatório: B5	n.a.
Moçambique	n.a.	Obrigatório: B5 (2015)
Noruega	Obrigatório: 3,5% de biocombustíveis	Obrigatório: 5% de biocombustíveis proposto para 2011; possível alinhamento com a UE
Paraguai	Obrigatório: B1	n.a.
Peru	Obrigatório: B2	Obrigatório: B5 (2011)
República Dominicana	n.a.	Obrigatório: B2 (2015)

País/Região	Obrigatoriedade ou Meta em 2010	Obrigatoriedade ou Meta Futura
Tailândia	Obrigatório: B3	Obrigatório: B5 (2011)
Taiwan	Obrigatório: B2	n.a.
Uruguai	Obrigatório: B2	Obrigatório: B5 (2012)

Fonte: Adaptado de IEA (2011).

1.3. O Biodiesel no Brasil

1.3.1. O PNPB

As pesquisas com o biodiesel foram retomadas no Brasil no final da década de 90, e em 2003 o Governo Federal instituiu um Grupo de Trabalho Interministerial para realizar estudos sobre a viabilidade de produção e uso desse combustível (RATHMANN, 2007; MONTEIRO, 2007). Embora a produção brasileira de petróleo tivesse apresentado um grande crescimento nos últimos anos devido a descoberta de novas reservas no território nacional, parte do petróleo aqui extraído era muito pesado para produzir diesel no parque de refino existente, e portanto o petróleo mais leve para a produção desse derivado e o próprio diesel continuavam sendo importados. Em 2003, o Brasil importou cerca de 25 milhões de m³ de petróleo e 6 milhões de m³ de óleo diesel (EPE, 2011a).

Trabalhando em conjunto com os setores automotivo e agrícola, órgãos de financiamento, órgãos de pesquisa e órgãos reguladores, em um ano o governo conseguiu estabelecer certos aspectos necessários para iniciar a produção de biodiesel em escala comercial: organização da cadeia produtiva, definição de linhas de financiamento, estruturação da base tecnológica e edição de um marco regulatório próprio para o biodiesel (MME, 2004). Dessa forma, em dezembro de 2004 foi lançado o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB), cujo objetivo era a inserção do biodiesel, principalmente o produzido a partir de plantas oleaginosas, na matriz energética brasileira. As principais diretrizes do PNPB são (MME, 2011):

- Implantar um programa sustentável, promovendo inclusão social;

- Garantir preços competitivos, qualidade e suprimento;
- Produzir o biodiesel a partir de diferentes fontes oleaginosas e em regiões diversas.

Além de reduzir a dependência do petróleo e derivados importados frente a uma nova alta dos preços, o Governo Brasileiro pretendia, através desse programa, diversificar a matriz energética brasileira, reduzir as disparidades econômicas e sociais nas zonas rurais, e reduzir as emissões de poluentes e gases de efeito estufa para a atmosfera, diminuindo assim gastos na área da saúde. Esses também foram os motivadores para o desenvolvimento da escala produtiva desse biocombustível em muitos outros países (GARCIA, 2007; SCARLAT & DALLEMAND, 2011).

Em janeiro de 2005 foi publicada a Lei nº 11.097, que introduziu o biodiesel na matriz energética brasileira, estabelecendo a obrigatoriedade da adição de um percentual mínimo desse biocombustível ao óleo diesel comercializado ao consumidor, em qualquer parte do território nacional. Esse percentual mínimo, inicialmente, seria de 5% oito anos após a publicação dessa lei, havendo percentuais obrigatórios intermediários de 2 e 3% a entrarem em vigência a partir dos anos de 2008 e 2011, respectivamente (BRASIL, 2005; ANP, 2010). Entre janeiro de 2005 e dezembro de 2007, a adição de 2% seria opcional. No entanto, novas resoluções do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) acabaram adiantando essa obrigatoriedade, de forma que a adição de 3% começou a ser obrigatória a partir do meio de 2008, a de 4% no meio de 2009, e a de 5% a partir de janeiro de 2010.

A Lei nº 11.097 também ampliou a competência administrativa da Agência Nacional do Petróleo (ANP), atribuindo a esse órgão a responsabilidade de regular e fiscalizar as atividades relativas à produção, controle de qualidade, distribuição, revenda e comercialização do biodiesel e da mistura óleo diesel-biodiesel. A ANP passou, desde então, a denominar-se Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Além disso, foram revisadas várias resoluções da Agência que tratam sobre combustíveis líquidos, de forma a incluir o biodiesel (MME, 2011). À ANP, também foi atribuída a incumbência de organizar os leilões de comercialização do biodiesel, criados como um mecanismo de incentivar a produção (SINISCALCHI, 2010).

Outra lei importante foi publicada nesse mesmo ano, em torno dos tributos incidentes sobre o biodiesel. A Lei 11.116, publicada em maio de 2005, estabeleceu que a Contribuição para o Programa de Integração Social (PIS)/Programa de Formação de Patrimônio do Servidor Público (PASEP) e a Contribuição Social para o Financiamento da Seguridade Social (Cofins) sejam pagas uma única vez e pelo produtor industrial de biodiesel ou importador, podendo ele optar uma alíquota percentual sobre o preço do produto ou uma alíquota fixa específica por m³ comercializado. Recentemente, foi sancionada outra lei que estabelece novos benefícios aos usineiros em relação ao pagamento do PIS/COFINS (CRUZ, 2011).

A preocupação por parte do governo em inserir os trabalhadores rurais nos benefícios do novo programa, em detrimento ao que aconteceu no PROALCOOL, onde pequenos produtores de cana-de-açúcar não foram beneficiados, pode ser percebida com o lançamento, junto ao PNPB, do Selo Combustível Social. Esse selo é uma identificação concedida pelo Ministério do Desenvolvimento Agrário (MDA) aos produtores de biodiesel que comprem de agricultores familiares um percentual mínimo estabelecido da matéria-prima a ser adquirida para a produção do biocombustível, promovendo assim a inclusão social e o desenvolvimento regional por meio de geração de emprego e renda para essa classe de agricultores.

Inicialmente, a validade era só para as matérias-primas mamona e palma, e esse percentual mínimo era de 50% para Região Nordeste e semiárido fora dos limites nordestinos, 30% para as regiões Sul e Sudeste e 10% para as regiões Norte e Centro-Oeste. Atualmente, devido às dificuldades de se cumprir esse percentual mínimo na região Nordeste e no semiárido, o mesmo foi reduzido para 30%, e o do Norte e Centro-Oeste foi aumentado para 15%, além de o benefício ter sido ampliado outras matérias-primas (MONTEIRO, 2007; MDA, 2011). Além disso, para possuir o selo, cada produtor industrial deve assegurar assistência e capacitação técnica aos agricultores familiares, bem como estabelecer contratos contendo informações como prazos de duração da parceria, valores de compra, condições de entrega da matéria-prima, entre outras (MDA, 2011).

Os produtores de biodiesel detentores desse selo possuem maiores incentivos tributários, melhores condições de financiamento, e preferência nos leilões de comercialização de biodiesel promovidos pela ANP.

Ainda no sentido de incentivar a agricultura familiar, bem como privilegiar a produção de mamona e palma em detrimento de outras oleaginosas, o decreto regulamentador da Lei 11.116 estabeleceu três níveis distintos de desoneração tributária para as usinas de biodiesel: 100% em relação à alíquota geral para o biodiesel fabricado a partir de palma e mamona proveniente da agricultura familiar nas regiões Norte, Nordeste e no Semiárido; 67,9% para o biodiesel fabricado a partir de qualquer matéria-prima produzida pela agricultura familiar independente da região; e 30,5% para o biodiesel fabricado a partir de palma ou mamona produzidas nas regiões Norte, Nordeste e semiárido pelo agronegócio (COINFRA, 2007).

Através de novos decretos e regulamentações, mudanças em torno do PNPB vêm acontecendo com certa frequência. Alterações nas regras de participação dos leilões, na incidência de impostos, nos mecanismos de incentivos e em outras questões mostram que o país vem tentando adequar o Programa às dificuldades que ele vem sendo submetido desde que foi lançado. A seção 1.3.2 expõe alguns resultados do Programa nos últimos anos.

1.3.2. Produção e Comercialização de Biodiesel no Brasil

O Brasil produziu cerca de 2,4 milhões de m³ de biodiesel em 2010 (ANP, 2012a; EPE, 2011a) e 2,6 milhões de m³ de biodiesel em 2011 (ANP, 2012a). Analisando os dados da Tabela 2, percebe-se que a produção de biodiesel no país teve um crescimento muito acentuado do início do PNPB até antes da obrigatoriedade de adição ao diesel. O crescimento, a partir da adição mandatória, se tornou menos acentuado, embora ainda significativo. Não ocorreu um grande crescimento do total de 2011 em relação a 2010, visto que o percentual de B100 adicionado compulsoriamente ao diesel mineral foi constante em 5%, tendo somente que acompanhar o aumento da demanda por diesel.

Tabela 2 - Produção de Biodiesel B100 (em m³) no Brasil e por Estado/ Região, de 2005 a 2011.

Região/ Estado*	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
BRASIL	736	69.002	404.329	1.167.128	1.608.448	2.385.173	2.640.703
Bahia	-	4.238	70.942	65.982	79.941	91.952	123.844
Ceará	-	1.956	47.276	19.208	49.154	66.337	44.524
Maranhão	-	-	23.509	36.172	31.195	18.705	-
Piauí	156	28.604	30.474	4.548	3.616	-	-
Nordeste	156	34.798	172.200	125.910	163.905	176.994	168.368
Tocantins	-	-	22.773	13.135	33.547	85.345	86.092
Pará	510	2.421	3.717	2.625	3.494	2.345	-
Rondônia	-	-	99	228	4.779	6.190	2.189
Norte	510	2.421	26.589	15.987	41.821	93.881	88.281
Goiás	-	10.108	110.638	241.364	268.702	442.293	505.586
Mato Grosso	-	13	15.170	284.923	367.009	568.181	491.124
Mato Grosso do Sul	-	-	-	-	4.367	7.828	31.014
Centro-Oeste	-	10.121	125.808	526.287	640.077	1.018.303	1.027.724
Rio de Janeiro	-	-	-	-	8.201	20.177	7.716
Minas Gerais	44	311	138	-	40.271	72.693	76.619
São Paulo	-	21.251	36.885	185.594	236.302	327.458	295.046
Sudeste	44	21.562	37.023	185.594	284.774	420.328	379.381
Paraná	26	100	12	7.294	23.681	69.670	114.819
Rio Grande do Sul	-	-	42.696	306.056	454.189	605.998	862.131
Sul	26	100	42.708	313.350	477.871	675.668	976.950

* Alguns estados não aparecem porque não possuem/possuíram produção de biodiesel.

Fonte: Elaboração própria, com base em dados de ANP (2012a).

A Tabela 3 mostra a contribuição de cada região à produção de nacional de biodiesel desde a criação do PNPB até o último ano. No primeiro ano de programa, a região Norte foi a maior produtora de biodiesel do país, mais precisamente o estado do Pará, responsável por 100% da produção da região naquele ano. No entanto, a partir dos anos seguintes, o crescimento da produção dessa região foi muito pequeno comparado às demais regiões do país. Nos anos de 2006 e 2007 a região Nordeste liderou a produção nacional, e a partir de 2008, a região Centro-Oeste obteve destaque ao assumir essa liderança. Já em 2011, a produção da região Sul aumentou bastante em relação à produção brasileira total, enquanto as outras regiões apresentaram participações mais baixas em comparação com o ano anterior. Assim, a região Sul tem se aproximado da região Centro-Oeste em quantidade produzida, o que fica evidenciado na Figura 5.

Tabela 3 – Contribuição de cada região (em %) à produção nacional de biodiesel, de 2005 a 2011.

Região	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
NE	21,2%	50,4%	42,6%	10,8%	10,2%	7,4%	6,4%
N	69,3%	3,5%	6,6%	1,4%	2,6%	3,9%	3,3%
CO	0,0%	14,7%	31,1%	45,1%	39,8%	42,7%	38,9%
SE	6,0%	31,2%	9,2%	15,9%	17,7%	17,6%	14,4%
S	3,5%	0,1%	10,6%	26,8%	29,7%	28,3%	37,0%

Fonte: Elaboração própria, com base em dados de ANP (2012a).

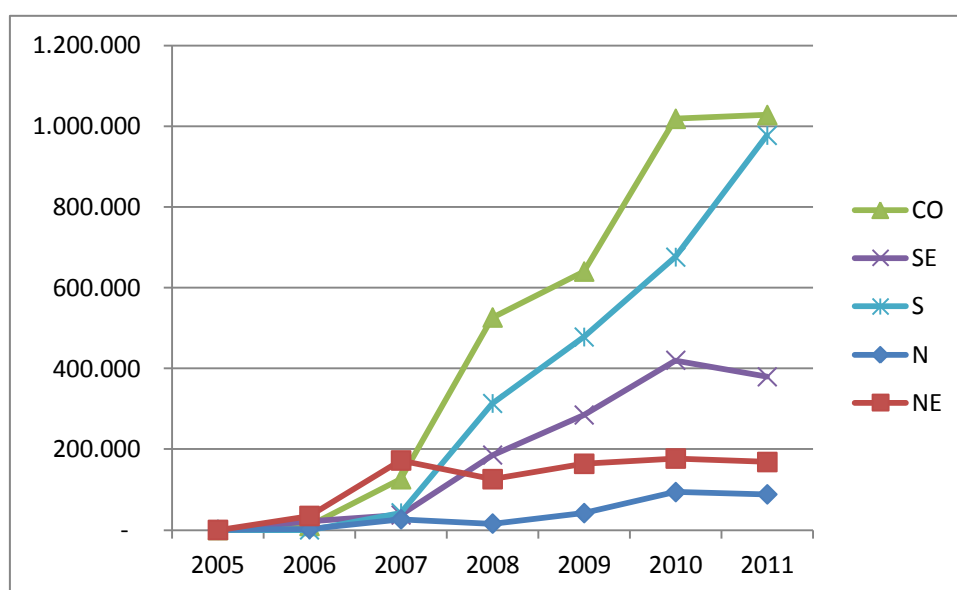


Figura 5 - Produção anual de biodiesel (em m³) por região, de 2005 a 2011.

Fonte: Elaboração própria com base em dados de ANP (2012a).

No ano de 2011, a produção nacional foi de 2,641 milhões de m³, sendo que 81,46% deste total tiveram como matéria-prima o óleo de soja, 13,39%, a gordura de origem animal, principalmente bovina, 2,94%, o óleo de algodão e somente 0,06%, os óleos de dendê, girassol e amendoim juntos (Figura 6). Esse padrão vem se repetindo desde 2008, quando a ANP começou a publicar boletins mensais com dados sobre a produção de biodiesel.

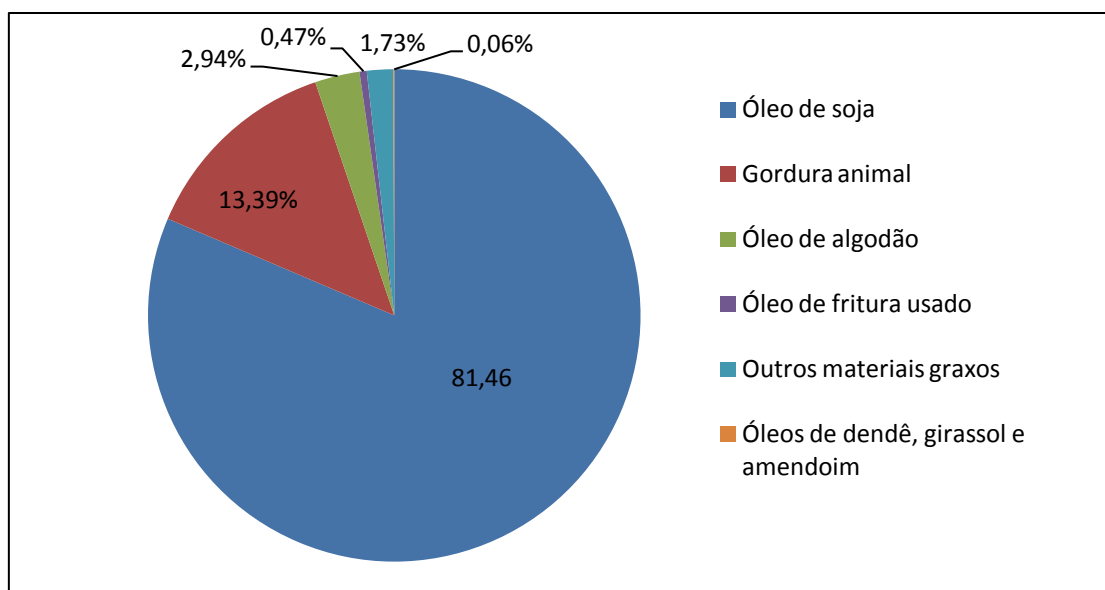


Figura 6 - Porcentagem de cada matéria-prima usada na produção de biodiesel no Brasil, no ano de 2011 (até novembro).

Fonte: Elaboração própria com base em dados de ANP (2012b).

A predominância na utilização do óleo de soja como matéria-prima para a produção deve-se ao fato da cultura de soja apresentar uma produção em larga escala e uma cadeia produtiva bem estruturada há muitos anos, além do preço do óleo mais acessível (WILKINSON & HERRERA, 2010; CASTRO & LIMA, 2010a; CASTRO & LIMA, 2010b; CASTRO, 2011). No entanto, o que vem acontecendo não é condizente com os objetivos iniciais do PNPB de inclusão social e desenvolvimento regional, principalmente do semiárido nordestino, visto que a produção com base na matéria-prima comprada desses agricultores familiares é marginal, e o crescimento da produção de biodiesel se deve ao agronegócio¹² (WILKINSON & HERRERA, 2010; SCHAFFEL & LA ROVERE, 2010).

Os óleos de mamona, dendê e girassol são mais caros do que o óleo de soja, o que encareceria muito a produção do biodiesel a partir deles. As usinas produtoras de biodiesel que compram a matéria-prima bruta, ao invés de comprar o óleo pronto, muitas vezes optam por vender no mercado externo o óleo que produzem a partir dela, conseguindo assim um preço muito maior com ele do que conseguiria com o biodiesel e

¹² A região Sul é a única região cuja agricultura familiar produz soja.

mantendo o Selo Combustível Social. Isso vem acontecendo com frequência no caso da mamona (CASTRO & LIMA, 2010a; CASTRO & LIMA, 2010b).

É necessária a ampliação da produção desses óleos, tanto a nível nacional como mundial, para que seus preços sejam reduzidos. Embora programas governamentais de fomento estejam sendo lançados, bem como algumas iniciativas de empresas como Vale e Petrobras, é provável que os efeitos só sejam sentidos em médio prazo. Dessa forma, o óleo de soja deve permanecer como matéria-prima base para a produção de biodiesel nos próximos anos (EPE, 2011b).

A Tabela 4 mostra a evolução da participação da agricultura familiar no PNPB em cada região brasileira. Em 2010 essa participação chegou a 100.371 famílias, praticamente metade do objetivo inicial, que era atingir 200 mil (DIESEE, 2011).

Tabela 4 - Evolução do número de famílias participantes do PNPB nas regiões brasileiras, de 2005 a 2010.

Ano	Norte	Nordeste	Sudeste	Sul	Centro-Oeste	Brasil
2005	414	15.000	914	0	0	16.328
2006	185	30.226	7	8.736	1.441	40.595
2007	223	6.850	55	27.928	1.690	36.746
2008	215	17.187	27	8.767	1.662	27.858
2009	179	17.711	1.457	29.150	2.550	51.047
2010	246	41.253	3.297	52.187	3.388	100.371

Fonte: DIESEE (2011)

É importante notar que mais da metade desse número é de estabelecimentos agrícolas familiares do Sul do Brasil, as quais participam principalmente através da venda da soja. Na Tabela 5, embora os dados se refiram à porcentagem de participação de cada matéria-prima em cima do valor total do fornecimento de matérias-primas, e não da quantidade física de matéria-prima fornecida, pode-se perceber prevalência da soja em detrimento das outras, mesmo para os agricultores familiares. Como colocado por Neutziling (2009), cabe destacar que a realidade da agricultura familiar brasileira varia muito de região para região. Os agricultores familiares do Sul, de forma geral, apresentam um maior acesso a insumos e tecnologias, e muitos estão organizados em cooperativas, recebendo vantagens na compra de insumos e na assistência técnica. Já no Nordeste, muitos ainda usam métodos rudimentares de plantio e são descapitalizados,

dificultando o acesso a insumos, o que se reflete na baixa produtividade de seus cultivos.

Tabela 5 - Distribuição do valor da produção da agricultura familiar (em %) para o PNPB, segundo principais matérias primas, de 2008 a 2010.

Matérias-primas	2008	2009	2010
Soja	96,3	95,2	94,6
Mamona	1,9	4,0	4,4
Gergelim	0,0	0,0	0,4
Dendê	0,9	0,4	0,3
Girassol	0,7	0,2	0,1
Amendoim	0,0	0,2	0,1
Canola	0,2	0,1	0,1
Outros	0,0	0,0	0,0
Total	100,0	100,0	100,0
Total (em R\$ milhões)	276,5	677,3	1.058,70

Fonte: DIESEE (2011).

Em 2010, a agricultura familiar participou com 26,2% do valor arrecadado com o fornecimento de matérias-primas, valor significativamente superior aos dos anos anteriores (Tabela 6), mas ainda modesto em relação aos objetivos do PNPB, principalmente no que diz respeito à participação dos agricultores familiares da região Norte.

Tabela 6 - Valor (em R\$ milhões) e participação (em %) da agricultura familiar no fornecimento de matérias-primas para empresas de biodiesel no Brasil, de 2008 a 2010.

Fornecimento de matérias-primas	2008	2009	2010
Agricultura familiar	276,50	677,30	1.058,70
Outros Fornecedores	2.090,70	2.750,80	2.984,60
Total	2.367,20	3.428,10	4.043,30
(%) da Agricultura Familiar	11,7	19,8	26,2

Fonte: DIESEE (2011).

São várias as dificuldades enfrentadas para mudar essa realidade, entre elas podemos citar a falta de instrução dos agricultores, a dificuldade de aquisição de insumos produtivos, insuficiência de avanços tecnológicos dos métodos de produção e os atrasos nos pagamentos por parte dos fabricantes de biodiesel, fazendo com que muitos

agricultores optem por vendê-la a preços inferiores a atravessadores, entre outras dificuldades (OBERMAIER *et al*, 2010; CASTRO & LIMA, 2010a). Muitos estudos foram feitos explicitando as dificuldades de inserção desses agricultores no programa, principalmente na região do semiárido nordestino (GARCIA, 2007; AVZARADEL, 2008; SINISCALCHI, 2010; OBERMAIER *et al*, 2010).

Para os fabricantes de biodiesel, isso também representa uma dificuldade de se manter no programa, uma vez que precisam continuar comprando desses agricultores para permanecer com o Selo Combustível Social e ter maior participação nos leilões. Wilkinson & Herrera (2010) expõem a preocupação com a continuação da agricultura familiar no programa quando os leilões acabarem e o comércio de biodiesel se tornar aberto.

Em 2010, a capacidade nominal autorizada de produção¹³ de biodiesel puro (B100) foi mais de cinco milhões m³. Entretanto, a produção efetiva do Brasil foi de aproximadamente 2,4 milhões m³, o que correspondeu a menos da metade da capacidade total (ANP, 2011b). Pela Figura 7 é perceptível que desde o começo do PNPB a capacidade instalada de produção vem crescendo mais rapidamente que a produção de biodiesel em si, similarmente ao que acontece em grande parte dos países produtores.

Dentre as 54 empresas que produziram biodiesel (B100) em 2010, 51 adotaram a rota metânica (uso de metanol), representando 96,7% desta produção, e consumindo um total de 279,4 mil m³ de metanol; e somente três empresas, duas localizadas na região Sudeste e uma na Centro-Oeste, produziram biodiesel (B100) pela rota etânica (uso de etanol anidro), representando 3,3% da produção total de biodiesel do país. A geração de glicerina durante a produção total de biodiesel do país nesse mesmo ano foi de 257,9 mil m³ (ANP, 2011b).

¹³ Entende-se por capacidade nominal autorizada de produção a capacidade instalada de produção declarada por usinas de biodiesel que já receberam autorização de funcionamento da ANP.

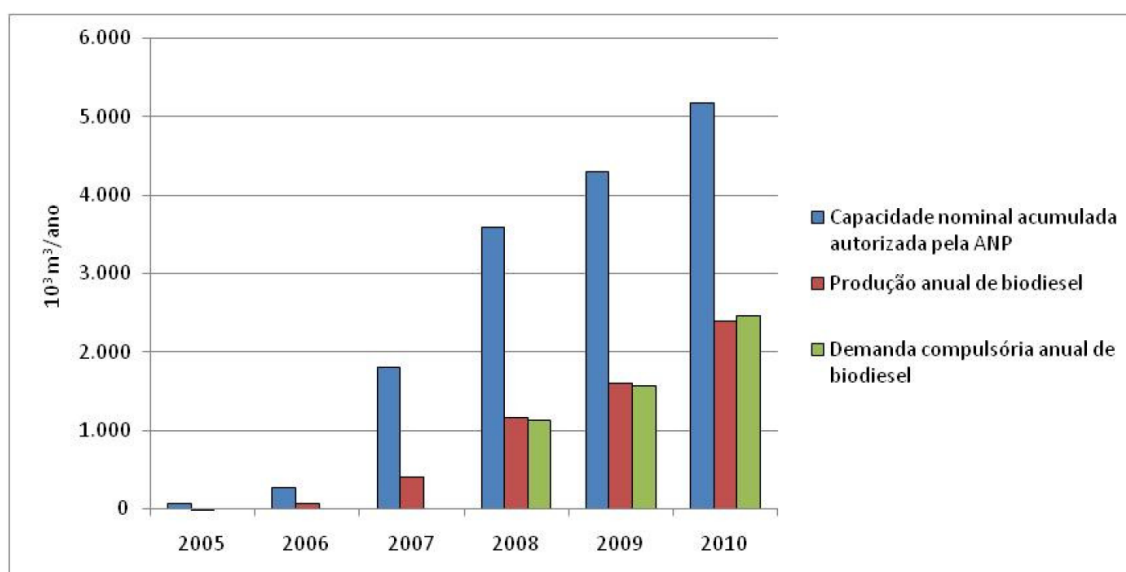


Figura 7 - Evolução anual da produção, da demanda compulsória e da capacidade nominal autorizada pela ANP, Brasil 2005 – 2010 (em $10^3 \text{ m}^3/\text{ano}$).

Fonte: ANP (2012b).

No boletim mensal de outubro de 2011 da ANP (2012b), a Agência relatou a existência de 64 usinas produtoras de biodiesel autorizadas para operação no país atualmente, sendo que 60 possuem autorização para comercializar o biodiesel produzido. Ainda há 10 novas usinas, já autorizadas, para serem construídas, e mais 16 solicitações de autorização para construção de outras. Além disso, várias usinas têm buscado autorização para ampliação de suas capacidades de produção.

O comércio interno do biodiesel é realizado por meio de leilões e releilões trimestrais: as usinas produtoras cadastradas na ANP vendem suas produções de B100 à Petrobrás e à Refinaria Alberto Pasqualini (REFAP) através de leilões inversos, onde a Agência estabelece o preço máximo a ser cobrado e ganham as usinas que oferecerem os menores preços. Após a definição de todos os vencedores e da quantidade arrematada, é feito o releilão, onde os compradores citados acima vendem por leilão para os distribuidores, que fazem a mistura com o diesel e entregam aos postos de venda ao consumidor (CASTRO, 2010; IPEA, 2010). Na prática, as empresas distribuidoras ficam responsáveis também por buscar o combustível nas usinas produtoras, durante o trimestre seguinte à realização do leilão. A compra direta realizada entre as distribuidoras e os produtores de biodiesel só pode ser realizada fora do sistema de

leilões caso as quantidades de biodiesel excedam o necessário para atender o percentual mínimo obrigatório estabelecido em lei (ANP, 2011a).

Embora a tendência seja de abertura do comércio daqui a uns anos, acredita-se que o país ainda não esteja pronto para isso. Dessa forma, os leilões são uma forma eficiente de incentivo à produção de biodiesel, oferecendo aos produtores uma maior confiabilidade com relação à comercialização do produto final (CASTRO, 2010). De acordo com IPEA (2010) os leilões ainda são importantes para a padronização, garantia de qualidade, viabilização da fiscalização, além do incentivo à agricultura familiar através do benefício da participação no maior lote das usinas que comprem matérias-primas desse segmento de agricultores. Para as indústrias que produzem também o óleo vegetal além do biodiesel, os leilões podem ainda ser importantes por dar previsibilidade sobre o que é mais vantajoso: vender seu óleo vegetal para outras indústrias ou transformá-lo em biodiesel (IPEA, 2010).

Os leilões vêm sofrendo mudanças desde quando surgiram até os dias atuais, como explicitado na seção 1.3.1 deste capítulo. Uma das principais modificações correspondeu à divisão do volume ofertado em lotes: até o 11º leilão o volume total era ofertado em lote único, do 12º até o 22º leilão o volume ofertado era dividido em dois lotes, um maior, para atender a 80% da demanda, para as usinas detentoras do Selo Combustível Social e outro menor, para atender 20% da demanda, para todas as usinas; a partir do 23º o volume ofertado passou a ser dividido em dez lotes, dois pra cada região, um para as usinas possuidoras do selo e o outro para todas dentro daquela região (ANP, 2011a). A Figura 8 mostra os volumes arrematados por região dentro de cada lote e de quais regiões eles foram originados.

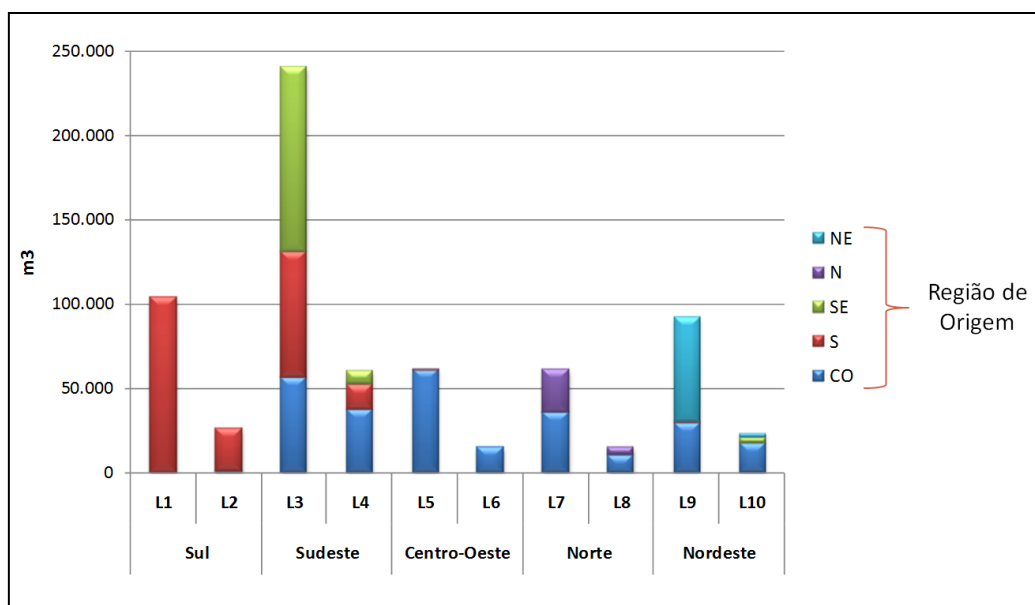


Figura 8 - Volumes arrematados por região durante o 23º leilão (agosto 2011).

Fonte: ANP (2011b).

Outra modificação foi a introdução do Fator de Ajuste Logístico (FAL) com o propósito de ajustar os valores de venda às distâncias percorridas pelos compradores para adquirir o combustível, uma vez que é comum usinas de uma região venderem para distribuidoras em outra região. O FAL desconta do preço final de venda uma parcela que corresponderia ao custo de transporte. De acordo com a ANP (2011a), o FAL considera a média das distâncias rodoviárias entre a capital do Estado de origem da produção e as capitais da região para onde será destinado o combustível comercializado no leilão.

A produção brasileira de biodiesel, assim como na maioria dos países, ainda é muito dependente dos incentivos governamentais. Mesmo assim, os preços do biodiesel têm sido superiores ao do diesel mineral desde a criação do programa, por conta dos altos preços dos óleos vegetais nos mercados externo e interno, e tendem a permanecer superiores no curto prazo, pois até mesmo um aumento nos preços do diesel geralmente acaba refletindo em um encarecimento da produção de certos óleos vegetais cuja produção é dependente desse insumo fóssil, como o óleo de soja. É necessária a expansão da produção de matérias-primas e assim de óleos vegetais para que haja redução desses preços.

Embora certos fatores sejam apontados como favoráveis à expansão do mercado do biodiesel no Brasil¹⁴, como capacidade ociosa da indústria acima de 50%, disponibilidade de terras e mão de obra, infraestrutura da cadeia considerada razoável para sustentar uma produção até B20, disponibilidade de financiamento, pressão de diferentes segmentos de atores (produtores agrícolas, produtores industriais, políticos, pesquisadores), outros fatores são apontados como limitadores dessa expansão produtiva, como a carência de oferta de oleaginosas e seu alto custo, sazonalidade das oleaginosas mais usadas, limitação da armazenagem e falta de definição de quem fica responsável por ela, além dos altos preços em relação ao diesel, já mencionados (SANTOS, 2010).

¹⁴ Através, por exemplo, de um aumento mandatário da mistura.

2. CADEIA PRODUTIVA DO BIODIESEL

A cadeia produtiva do biodiesel possui várias etapas: produção ou obtenção da matéria-prima básica (óleos vegetais, gorduras animais, óleos residuais) e dos outros insumos para o processo de transesterificação, o processo de transesterificação em si, e a distribuição do biodiesel através de distribuidoras atacadistas e varejistas para os consumidores finais no mercado interno, onde é vendido misturado ao diesel, ou exportação para o mercado externo (GARCIA, 2007).

No caso do biodiesel produzido a partir de óleos vegetais, antes da etapa de produção do óleo vegetal considera-se também a etapa de produção das plantas de onde se extrai o óleo. Já no caso do biodiesel produzido a partir da gordura animal ou de óleos residuais costuma-se considerar só o processo de recolhimento da matéria-prima, visto que esses são considerados resíduos de outras atividades, ainda que tenham valor de mercado, como o sebo bovino.

Como o foco desse estudo é o biodiesel produzido a partir de óleos vegetais, as etapas consideradas serão: cultivo da planta oleaginosa para obtenção de frutos ou grãos, extração do óleo contido nesses grãos ou frutos em usinas esmagadoras e produção do biodiesel em usinas de transesterificação. Ao final de cada uma dessas etapas deve-se considerar o transporte do produto gerado para a etapa seguinte, quando cada uma dessas etapas ocorre em locais separados. No entanto, é comum haver algum tipo de verticalização da cadeia, ou seja, a agregação de duas ou mais etapas em um mesmo local, não havendo dessa forma o transporte. A Figura 9 mostra diferentes possibilidades de ocorrência dessas etapas no Brasil, atualmente.

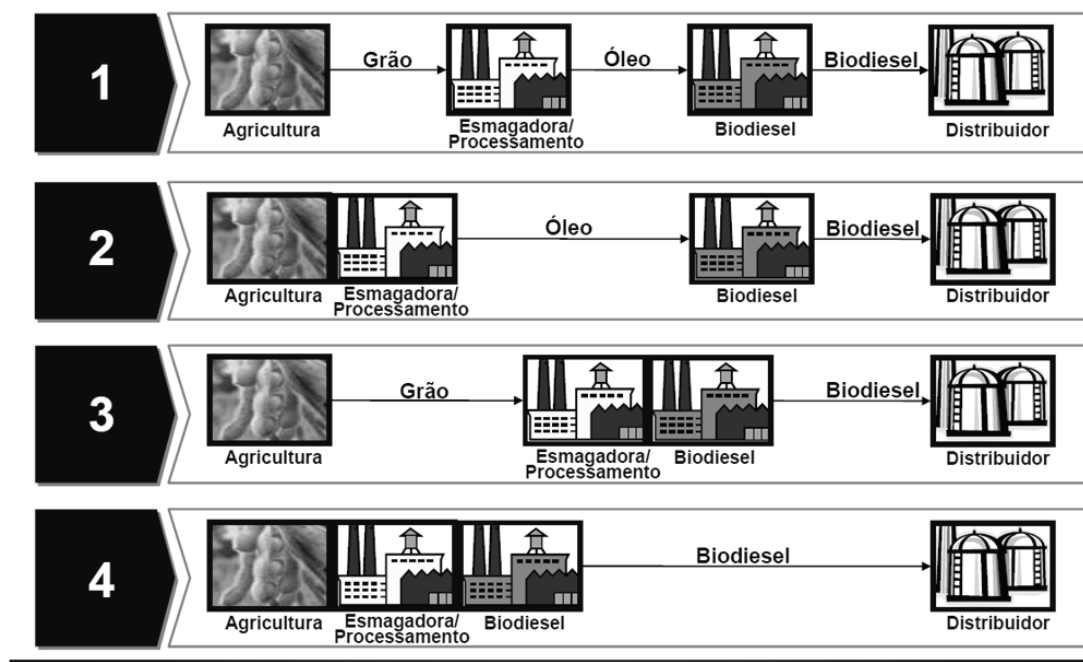


Figura 9 - Diferentes organizações das etapas de produção de biodiesel.

Fonte: IBP & COPPEAD (2007)

No modelo 1, cada uma das etapas acontece em locais separados, tendo que haver transporte de produtos entre as etapas, representado por seta com o nome do produto que é transportado entre uma etapa e outra. Nesse modelo, a indústria esmagadora e a de produção de biodiesel podem ocorrer em locais próximos ou afastados uma da outra, e ambas podem ocorrer com maior proximidade da área agrícola ou com maior proximidade do distribuidor, que geralmente fica próximo ao centro consumidor. Já no modelo 2, a extração do óleo acontece no mesmo local do cultivo, ou seja, existe uma usina esmagadora atrelada à etapa agrícola, eliminando uma etapa de transporte significativo, mas a usina produtora de biodiesel continua afastada. No modelo 3, a extração do óleo acontece na própria usina de biodiesel, que possui equipamentos de indústria esmagadora também, fazendo necessário o transporte dos grãos/frutos do cultivo até esse tipo de usina e de lá direto para o distribuidor. Geralmente essas usinas conjuntas acabam ficando mais próximas do centro consumidor. No modelo 4 as usinas de extração de óleo e de produção de biodiesel são atreladas e ficam bem próximas da área agrícola.

De acordo com IBP & COPPEAD (2007), nos modelos 2 e 3 a cadeia de produção do biodiesel é parcialmente verticalizada, e no modelo 4 a cadeia é totalmente

verticalizada. No modelo 2, o produtor de biodiesel adquire o óleo vegetal de uma esmagadora verticalizada, que planta a própria matéria-prima. No modelo 3, o produtor de biodiesel adquire os grãos/frutos e realiza a extração de óleo, além da produção de biodiesel. No modelo 4, é o próprio produtor de biodiesel que planta a matéria-prima e realiza a extração do óleo, além de produzir o biodiesel.

Cada uma das etapas da cadeia produtiva do biodiesel é discutida com mais detalhes nas seções seguintes deste capítulo.

2.1. Cultivo de Oleaginosas

2.1.1. Oleaginosas usadas na produção de biodiesel

Diversas são as plantas no Brasil das quais se pode extrair óleo e transformar em biodiesel. A Tabela 7 apresenta essas plantas de acordo com a potencialidade agroclimática de produção de cada região.

Tabela 7 - Potencialidade de produção de oleaginosas por região geográfica.

Região	Oleaginosas
Norte	Soja*, Dendê e Babaçu.
Nordeste	Soja, Dendê, Mamona, Amendoim, Algodão, Coco, Babaçu e Pinhão-Manso.
Centro-Oeste	Soja, Algodão, Girassol e Mamona.
Sudeste	Soja, Algodão, Amendoim, Girassol, Mamona e Pinhão-Manso.
Sul	Soja, Algodão, Girassol e Canola.

*A Moratória da Soja proíbe o plantio de soja em grande parte da região Norte, em áreas de floresta.

Fonte: Elaboração própria, a partir de Khalil (2006) e IBP & COPPEAD (2007).

Algumas oleaginosas possuem alto teor de óleo, mas são produzidas em pequena escala no Brasil, como o girassol, enquanto a soja apresenta um baixo teor de óleo, porém o óleo de soja é o mais produzido e consumido no país. A Tabela 8 mostra o teor de óleo, a quantidade de grãos/frutos produzida no Brasil e o rendimento médio de óleo por hectare para algumas delas.

Tabela 8 – Teor médio de óleo (%), produção em 2010 (10³ t), rendimento de óleo (t óleo/ha), ciclo de vida e origem do óleo para algumas oleaginosas produzidas no Brasil.

Oleaginosa	Teor médio de óleo (%)	Produção em 2010 (10 ³ t)	Rendimento óleo (t óleo/ha)	Ciclo	Origem do óleo
Soja (grãos)	19,0	68.688	0,3 a 0,7	4 meses	Grão
Algodão (pluma + caroço)	18,0	3.037	0,1 a 0,8	5 meses	Caroço
Girassol (grãos)	45,0	81	0,5 a 1,5	4 meses	Grão
Mamona (bagas)	45,0	101	0,3 a 0,9	6-8 meses	Grão
Amendoim (grãos)	45,0	261	0,6 a 0,8	4 meses	Grão
Dendê (cachos de frutos frescos)	21,5*	1.293	3,0 a 6,0	25 anos (perene)	Polpa e amêndoa do fruto

*20,0% correspondendo ao óleo de palma, extraído da polpa do dendê, e 1,5% ao óleo de palmiste, extraído da amêndoa encontrada dentro do fruto de dendê.

Fonte: Elaboração própria com base em Vianna (2006), IBP & COPPEAD (2007), Santos (2007), Castro & Lima (2010b), CONAB (2012) e IBGE (2012).

Como apresentado no primeiro capítulo, a soja tem sido a matéria-prima base para cerca de 80% da produção anual brasileira de biodiesel, embora existam no país muitas outras oleaginosas com maior teor de óleo. Dentre as gorduras vegetais, o óleo de algodão assume a segunda posição, porém com parcela bastante inferior à soja. Como pode ser observado de forma desagregada na Tabela 41 no anexo I, os outros óleos têm contribuído muito pouco no total de biodiesel produzido, embora matérias-primas como a mamona e o dendê tenham recebido incentivos governamentais. De acordo com Castro & Lima (2010b), a indústria do biodiesel é mais influenciada pela escala de produção e organização da cadeia de produção da oleaginosa do que pelos incentivos governamentais e teores do óleo no grão/fruto.

As seções seguintes aprofundam um pouco o estudo sobre as duas oleaginosas que são objetos de comparação dessa dissertação, a soja e o dendê, com enfoque na produção agrícola de ambas.

2.1.2. Dendê

O dendê é o fruto de uma palmeira africana (*Elaeis guineensis*), também chamada de palma ou dendezeiro, que se desenvolve em climas quentes e úmidos das regiões tropicais, tendo sido introduzido no Brasil por escravos africanos no litoral baiano (MARZULLO, 2007; MACEDO *et al*, 2010). Embora o extrativismo tenha ocorrido desde então, o plantio comercial dessa oleaginosa se iniciou na década de 60 no Pará, por iniciativa do governo e apoio de instituição francesa, e logo se estendeu ao estado do Amazonas e da Bahia (SANTOS, 2008; MACEDO *et al*, 2010).

Desse fruto pode ser extraído óleo tanto da polpa como da semente (amêndoa). O óleo extraído da polpa do dendê é usualmente chamado de óleo de dendê ou de palma enquanto o óleo extraído da amêndoa é chamado de óleo de palmiste. A Figura 10 mostra de qual parte do o fruto de dendê é extraído cada um desses óleos. O óleo de palma possui elevado valor comercial para a indústria alimentícia por ser naturalmente livre de gordura trans, sendo utilizado na produção de biscoitos, margarinas, óleo de cozinha, cremes vegetais, e outros produtos alimentícios, além de ser utilizado na produção de detergentes e cosméticos (SANTOS, 2008; MACEDO *et al*, 2010). Em muitos países, o óleo de palma também tem sido bastante utilizado na produção de biodiesel, porém isso não ocorre no Brasil devido sua baixa oferta, e grande demanda pelas indústrias citadas. Em 2010, a Malásia e a Indonésia juntas foram responsáveis por mais de 87% da produção mundial de óleo de dendê (USDA, 2012) e parte desse percentual destina-se à indústria europeia de biodiesel.

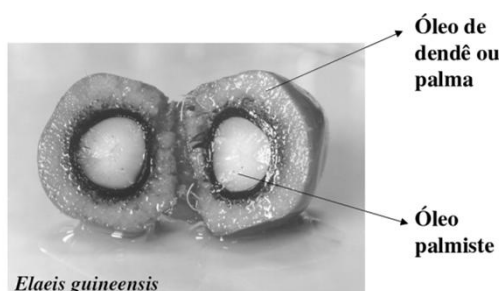


Figura 10 - Partes do fruto de dendê de onde são extraídos óleos de valor comercial.

Fonte: Vianna (2006).

O cultivo da palma é um cultivo perene, cuja produção de frutos se inicia no terceiro ou quarto ano de plantio, aumentando gradativamente até obter a produtividade máxima que ocorre entre o sétimo e o vigésimo ano de plantio. A partir desse momento, a produtividade começa a diminuir e vai decaindo até o 25º ou 30º ano de cultivo, quando a cultura deixa de ser economicamente viável por causa da altura que a palmeira atinge somada a baixa produtividade nessa fase. A Tabela 9 mostra a produtividade esperada de um hectare de plantio de palma no Pará em cada fase do ciclo de vida.

Tabela 9 - Produtividade esperada de um plantio de palma no Pará, em t cachos de frutos frescos (cff)/ha.

Idade do Plantio (ano)	Produtividade (t cff/ha)
1	0,0
2	0,0
3	7,2
4	14,4
5	18,0
6	21,6
7 ao 9	25,2
10 ao 20	22,0
21	20,0
22 ao 23	15,0
24	12,0
25	8,0

Fonte: AGRIANUAL (2006 *apud* MARZULLO, 2007).

De acordo com Macedo *et al* (2010), a produção nacional de óleo de palma atingiu 185.548 toneladas em 2008, sendo o estado do Pará responsável por mais de 95% dessa produção. A Agropalma, maior empresa produtora do país, produziu sozinha cerca de 75% da produção total do país naquele ano. A produção de óleo de palma por localidade está relacionada com a quantidade de cachos de frutos frescos (cff) produzidos, pois os frutos da palma precisam ser processados em até 24 horas para não comprometer a qualidade do óleo, e assim as unidades industriais se encontram próximas aos locais de plantios fornecedores da matéria-prima (VIANNA, 2006; SANTOS, 2008; SOUZA *et al*, 2010). Em 2010, o estado do Pará sozinho foi responsável por mais de 80% da produção brasileira de cachos de frutos frescos (cff) de dendê, como apresenta a Tabela 10.

Tabela 10- Produção anual de cachos de frutos frescos (cff) de dendê por estado e região do Brasil, de 2005 a 2010, em mil toneladas de cff.

REGIÃO/UF*	2005	2006	2007	2008	2009	2010	% 2010
	Produção (10³ t cff)						
NORTE	747,85	1031,19	869,95	896,48	916,85	1061,44	82,11%
AM	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	3,06	0,24%
PA	747,67	1031,00	869,77	896,30	916,66	1058,38	81,87%
NORDESTE	155,65	176,09	203,77	194,63	205,55	231,27	17,89%
BA	155,65	176,09	203,77	194,63	205,55	231,27	17,89%
BRASIL	903,50	1.207,28	1.073,73	1.091,10	1.122,40	1.292,71	100,00%

* Os estados e regiões não mostrados na tabela não possuíram produção de dendê registrada pelo IBGE.

Fonte: Elaboração própria a partir de IBGE (2011).

A Tabela 11 apresenta valores de produtividade média, calculados a partir dos dados de produção da Tabela 10 e dos dados de área plantada da Tabela 46, que se encontra no anexo II. Visto que a produtividade média é calculada dividindo-se a quantidade produzida pela área plantada, os valores obtidos, considerando todo o país, foram bastante baixos. Os estados do Amazonas e da Bahia tiveram uma produtividade média variando entre 1.000 e 4.300 kg de cff/ha no período de 2006 a 2010, enquanto que a produtividade média do Pará variou entre 16.000 e 20.250 kg de cff, como mostra a Tabela 11. Dessa forma, foi proposto pela autora do presente estudo um cálculo de produtividade média ponderada, atribuindo à produtividade de cada estado um peso relativo à quantidade produzida. Estes valores recalculados de produtividade estão na última linha da Tabela 11, abaixo dos valores calculados da maneira usual. Observa-se que, embora esses valores ainda assim pareçam baixos em relação ao que potencialmente o plantio de dendê pode produzir, eles representam plantios em diferentes idades e fases.

Tabela 11 - Produtividade média de dendê por estado e região do Brasil, de 2005 a 2010, em kg de cff/ha.

REGIÃO/UF*	2005	2006	2007	2008	2009	2010
	Produtividade Média (kg de cff/ha)					
NORTE	15.902	19.888	17.666	18.069	18.193	19.231
AM	3.000	3.000	3.000	2.614	2.614	1.038
PA	15.918	19.907	17.684	18.091	18.215	20.258
NORDESTE	3.733	3.918	3.839	3.510	3.841	4.305
BA	3.733	3.918	3.839	3.510	3.841	4.305
BRASIL	10.184	12.473	10.494	10.386	10.801	11.869
BRASIL med.pond.	13.817	17.573	15.054	15.488	15.580	17.359

*Alguns estados não aparecem porque não possuem/possuíram produção de dendê.

Fonte: Elaboração própria.

As exigências agroclimáticas para uma alta produtividade do plantio de dendê são (MARZULLO, 2007; SANTOS, 2008):

- Pluviosidade bem distribuída em torno de 2.000 mm por ano;
- Temperatura média entre 24° e 28° C;
- Insolação bem distribuída em torno de 2.000 horas por ano;
- Alta umidade relativa do ar, com média mensal variando entre 75 e 90%;
- Terrenos planos ou de baixa declividade;
- Solos profundos e bem drenados.

De acordo com o zoneamento de risco climático, as regiões com maior aptidão ao plantio de dendê são grande parte da Amazônia Legal e uma faixa do litoral nordestino.

É comum a verticalização da cadeia produtiva do dendê no Brasil. As empresas de extração de óleo de palma, de forma geral, também realizam a produção agrícola. Pequenos agricultores geralmente possuem contrato com essas empresas e lhes vendem sua produção, em contrapartida recebem ajuda com insumos e/ou assistência técnica. No entanto eles respondem por muito pouco do total de cff produzido no Brasil (MACEDO *et al*, 2010).

O processo de produção agrícola do dendê é dividido em duas etapas, a de implantação, que engloba as atividades de produção de mudas, preparo do terreno e plantio, e a de manutenção, que engloba atividades a serem realizadas periodicamente. A produção de

mudas exige tratos culturais como adubação, eliminação de plantas invasoras e controle de pragas e doenças, e demora de 12 a 16 meses (MACEDO *et al*, 2010). O plantio de palma é incentivado a ocorrer somente em áreas degradadas de forma a não desmatar áreas de floresta. Quando isso é respeitado, é feito um preparo do solo, com uma limpeza total ou parcial da área degradada. Geralmente as palmeiras são plantadas com espaçamento de 9x9x9m, como triângulos equiláteros, resultando em um total de 143 plantas por hectare (MARZULLO, 2007; MACEDO *et al*, 2010). É feita uma adubação nas covas onde são colocadas as mudas. As sementes são produzidas pela Embrapa Amazônia Oriental, mas de acordo com Macedo *et al* (2010), a instituição só conseguiu atender a 3% da demanda de 2008, tendo que importar o restante, principalmente da Costa Rica.

Juntamente com a palma, é plantada uma leguminosa de cobertura, com objetivos de reduzir a compactação do solo pela ação das chuvas, evitar o desenvolvimento de plantas invasoras, reduzindo os custos de manutenção, incorporar matéria orgânica pela produção de biomassa e aumentar o input de nitrogênio por conta da fixação biológica. A espécie de leguminosa mais utilizada a *Pueraria phaseoloides* (MACEDO *et al*, 2010; SOUZA *et al*, 2010). Em alternativa a esse modelo de monocultivo de palma, consorciado apenas com uma leguminosa, o estudo de Buzzatti (2011) descreveu o plantio de palma em Sistemas Agroflorestais (SAF) em áreas experimentais, onde a palmeira é cultivada em consórcio com culturas alimentares, trazendo benefícios para o solo e para o agricultor, principalmente quando a palmeira ainda não está produzindo frutos.

Na etapa de manutenção do plantio, são feitas operações periódicas, como coroamento, adubação, roçagem e rebaixamento da leguminosa de cobertura, controle de pragas e doenças, controle de plantas invasoras, poda e colheita. O coroamento é a limpeza da área em torno da planta para evitar competição com alguma planta invasora, bem como o ataque de pragas. Até o terceiro ano, esse processo geralmente é feito de forma manual e depois é feito com produtos químicos. Produtores familiares geralmente só realizam o coroamento manual, que é feito algumas vezes no ano. A roçagem e rebaixamento da leguminosa são feitas através de roçadeiras mecânicas acopladas a um trator nos primeiros anos de plantio e depois é feita de forma manual (MACEDO *et al*, 2010). O controle de pragas e doenças e de plantas invasoras é feito de forma manual e

através de agrotóxicos, quando identificada a necessidade. A adubação ao longo do período produtivo deve ser feita com base na análise foliar e levar em conta a idade e a produtividade do plantio. Os cachos vazios retornam ao plantio após o processamento dos cff durante a etapa de extração de óleo, sendo usualmente aplicados ao solo como adubo orgânico (SOUZA *et al*, 2010).

A colheita é feita de forma manual com auxílio de instrumento que permita o corte do cacho. Geralmente é feita uma colheita a cada dez dias, durante todo o ano. O transporte dos cachos colhidos dentro da área do plantio é feito por tratores adaptados quando o plantio pertence a grandes ou médias empresas ou por tração manual no caso de agricultores familiares.

2.1.3. Soja

A soja (*Glycine max*) é a principal oleaginosa cultivada no mundo, devido ao seu elevado teor proteico, muito relevante na alimentação humana e de animais criados para o consumo humano. Além disso, é a cultura com maior produção e área plantada do Brasil, o que faz do país o segundo maior produtor dessa *commodity*, atrás apenas dos EUA. Na safra 2009/2010, a cultura ocupou uma área de 23,5 milhões de hectares no país, o que totalizou uma produção de 68,7 milhões de toneladas. A produtividade média da soja brasileira nessa safra foi de 2.927 kg/ha (CONAB, 2012). A Tabela 12 mostra a produção de soja no Brasil nos últimos anos, por estado. As regiões Centro-Oeste e Sul foram responsáveis por produzir, respectivamente, 46,0% e 37,3% da produção brasileira de soja em 2010, com destaque para os estados do Mato Grosso, Paraná e Rio Grande do Sul, atualmente os três maiores produtores de soja.

Tabela 12 - Produção de soja (em mil toneladas) nas safras de 2005/06 a 2009/10, por região e estado.

REGIÃO/UF*	2005/06	2006/07	2007/08	2008/09	2009/10	% 2009/10
	Produção (10³ t)					
NORTE	1.255,2	1.079,9	1.472,4	1.414,0	1.691,7	2,5%
RR	28,0	15,4	48,8	22,4	3,9	0,0%
RO	283,0	277,5	311,6	326,5	384,3	0,6%
AM	5,7	-	-	-	-	0,0%
PA	238,1	140,5	201,1	208,7	232,5	0,3%
TO	700,4	646,5	910,9	856,4	1.071,0	1,6%
NORDESTE	3.560,9	3.867,2	4.829,8	4.161,9	5.309,5	7,7%
MA	1.025,1	1.084,0	1.262,8	975,1	1.330,6	1,9%
PI	544,5	486,0	819,4	768,8	868,4	1,3%
BA	1.991,3	2.297,2	2.747,6	2.418,0	3.110,5	4,5%
CENTRO-OESTE	27.824,7	26.494,8	29.114,0	29.134,9	31.586,7	46,0%
MT	16.700,4	15.359,0	17.847,9	17.962,50	18.766,90	27,3%
MS	4.445,1	4.881,3	4.569,2	4.179,7	5.307,8	7,7%
GO	6.533,5	6.114,0	6.543,5	6.836,2	7.342,6	10,7%
DF	145,7	140,5	153,4	156,50	169,40	0,2%
SUDESTE	4.137,1	4.005,4	3.983,4	4.057,6	4.457,6	6,5%
MG	2.482,5	2.567,9	2.536,9	2.751,1	2.871,5	4,2%
SP	1.654,6	1.437,5	1.446,5	1.306,5	1.586,1	2,3%
SUL	18.249,2	22.944,5	20.618,1	18.397,1	25.642,7	37,3%
PR	9.645,6	11.915,6	11.896,1	9.509,7	14.078,7	20,5%
SC	827,5	1.104,3	946,6	974,8	1.345,2	2,0%
RS	7.776,1	9.924,6	7.775,4	7.912,6	10.218,8	14,9%
BRASIL	55.027,1	58.391,8	60.017,7	57.165,5	68.688,2	100,0%

*Os estados não mostrados em cada região não tiveram produção de soja registrada na CONAB.

Fonte: CONAB (2012).

O cultivo comercial no Brasil dessa oleaginosa de origem asiática teve início na década de 50, com grande expansão a partir da década de 70 quando a soja se tornou uma *commodity* por conta da vasta agroindústria que se formou para processar seus derivados (SILVA *et al*, 2010a). A evolução da área de cultivo de soja no Brasil pode ser verificada na Tabela 13. Percebe-se que nos últimos dez anos a área ocupada com soja no Brasil aumentou em 72,3 %, mais do que o aumento de 55,6% verificado em 20 anos entre as safras de 1979/80 e 1999/2000. Nota-se que a região Sul apresenta uma grande área de cultivo desde a década de 70, visto que a introdução da soja no Brasil se

deu por essa região, e que o cultivo de soja na região Norte só se iniciou na década de 80, com uma área plantada bem pequena se comparada com a das outras regiões.

Tabela 13 - Área cultivada de soja (em mil hectares) nas safras de 1979/80, 1989/90, 1999/2000, e de 2005/06 a 2009/10, por região e estado.

UF*	1979/80	1989/90	1999/2000	2005/06	2006/07	2007/08	2008/09	2009/10
	Área (10³ ha)							
N	-	42,0	70,6	507,5	410,6	517,5	497,6	574,9
RR	-	-	-	10,0	5,5	15,0	8,0	1,4
RO	-	7,8	11,8	106,4	90,4	99,8	106,0	122,3
AM	-	-	-	1,9	-	-	-	-
PA	-	-	2,3	79,7	47,0	71,1	72,2	86,9
TO	-	34,2	56,5	309,5	267,7	331,6	311,4	364,3
NE	1,9	385,4	851,0	1.487,1	1.454,9	1.580,1	1.608,0	1.861,7
MA	-	16,0	175,7	382,5	384,4	421,5	387,4	502,1
AL	-	3,0	-	-	-	-	-	-
PI	-	0,4	40,0	232,0	219,7	253,6	273,1	343,1
BA	1,9	366,0	635,3	872,6	850,8	905,0	947,5	1.016,5
CO	1.117,0	3.706,0	5.499,4	10.742,6	9.105,1	9.634,8	9.900,1	10.539,2
MT	70,0	1.503,0	2.904,7	6.196,8	5.124,8	5.675,0	5.828,20	6.224,50
MS	792,0	1.209,0	1.106,6	1.949,6	1.737,1	1.731,4	1.715,8	1.712,2
GO	247,0	940,5	1.454,5	2.542,2	2.191,4	2.179,7	2.307,2	2.549,5
DF	8,0	53,5	33,6	54,0	51,8	48,7	48,90	53,00
SE	710,0	1.165,0	1.152,9	1.717,5	1.468,8	1.396,0	1.460,4	1.591,2
MG	150,0	583,0	594,4	1.060,9	930,4	870,0	929,1	1.019,0
SP	560,0	582,0	558,5	656,6	538,4	526,0	531,3	572,2
S	6.927,0	6.253,0	6.049,0	8.294,7	8.247,4	8.184,7	8.277,0	8.900,9
PR	2.420,0	2.286,0	2.832,9	3.982,5	3.978,5	3.977,3	4.069,2	4.485,1
SC	520,0	390,0	207,0	344,8	376,9	373,4	385,3	439,6
RS	3.987,0	3.577,0	3.009,1	3.967,4	3.892,0	3.834,0	3.822,5	3.976,2
BR	8.755,9	11.551,4	13.622,9	22.749,4	20.686,8	21.313,1	21.743,1	23.467,9

*Os estados não mostrados em cada região não tiveram produção de soja registrada na CONAB.

Fonte: CONAB (2012).

A produtividade média brasileira da cultura da soja vem crescendo ao longo dos anos, como mostra a Tabela 14. Uma grande variação, porém, pode ser observada entre os últimos anos do século XX, quando a produtividade média brasileira foi de 1.740 kg/ha na safra de 1989/90 para 2.414 kg/ha na safra de 1999/2000. Esses dados mostram a

maturidade alcançada já no começo da última década em relação ao conhecimento e desenvolvimento tecnológico em torno dessa oleaginosa, reflexo dos grandes investimentos feitos em pesquisa e desenvolvimento desde a década de 70, que foram desde o desenvolvimento de variedades adaptadas ao clima tropical até o desenvolvimento de variedades com maior resistência a pragas e de variedades mais produtivas, passando pelo aperfeiçoamento de técnicas de plantio e manejo.

Tabela 14 - Produtividade média da soja nas safras de 1979/80, 1989/90, 1999/2000, e de 2005/06 a 2009/10, por região e estado, em kg/ha.

REGIÃO/UF*	1979/80	1989/90	1999/00	2005/06	2006/07	2007/08	2008/09	2009/10
Produtividade Média (kg/ha)								
NORTE	-	1.267	2.507	2.473	2.630	2.845	2.841	2.943
RR	-	-	-	2.800	2.800	3.250	2.800	2.800
RO	-	2.000	3.000	2.660	3.070	3.122	3.080	3.142
AM	-	-	-	3.000	-	-	-	-
PA	-	-	2.120	2.987	2.990	2.828	2.890	2.675
TO	-	1.099	2.420	2.263	2.415	2.747	2.750	2.940
NORDESTE	1.158	695	2.425	2.395	2.658	3.057	2.588	2.852
MA	-	419	2.500	2.680	2.820	2.996	2.517	2.650
AL	-	1.500	-	-	-	-	-	-
PI	-	1.000	2.500	2.347	2.212	3.231	2.815	2.531
BA	1.158	700	2.400	2.282	2.700	3.036	2.552	3.060
CENTRO-OESTE	1.657	1.707	2.813	2.590	2.910	3.022	2.943	2.997
MT	1.670	1.930	3.030	2.695	2.997	3.145	3.082	3.015
MS	1.600	1.600	2.260	2.280	2.810	2.639	2.436	3.100
GO	1.820	1.500	2.800	2.570	2.790	3.002	2.963	2.880
DF	2.100	1.488	2.765	2.699	2.712	3.150	3.200	3.196
SUDESTE	1.838	1.582	2.229	2.409	2.727	2.853	2.778	2.801
MG	1.700	1.500	2.350	2.340	2.760	2.916	2.961	2.818
SP	1.875	1.665	2.100	2.520	2.670	2.750	2.459	2.772
SUL	1.693	1.857	2.085	2.200	2.782	2.519	2.223	2.881
PR	2.240	2.000	2.517	2.422	2.995	2.991	2.337	3.139
SC	1.400	1.540	2.494	2.400	2.930	2.535	2.530	3.060
RS	1.400	1.800	1.650	1.960	2.550	2.028	2.070	2.570
BRASIL	1.700	1.740	2.414	2.419	2.823	2.816	2.629	2.927
BRASIL med.pond.	-	-	-	2.446	2.835	2.873	2.686	2.941

*Os estados não mostrados em cada região não tiveram produção de soja registrada na CONAB.

Fonte: CONAB (2012).

A produtividade média foi recalculada de uma forma ponderada, atribuindo maior peso às produtividades de estados com maior produção. Para a soja, a diferença entre as duas formas é pouco significativa, porém para outras culturas, como o dendê, a diferença é bastante significativa.

A soja é uma cultura anual, cujo ciclo dura em média de 3 a 4 meses. No Brasil, deve ser cultivada em locais onde a temperatura média varia de 20° a 30° C, e em solos bem drenados, mas com boa capacidade de retenção de água. A declividade do terreno deve ser baixa, pois é uma cultura altamente mecanizada. Ela necessita de 450 a 800 mm de chuva durante o ciclo, dependendo das condições climáticas, do manejo e da duração do ciclo da variedade plantada, buscando coincidir a época mais chuvosa no período entre a floração e o enchimento de grãos, e a menos chuvosa com a época da colheita. O plantio é feito geralmente na primavera e a colheita no final do verão ou começo do outono (MARZULLO, 2007).

Atualmente quase toda soja tem sido produzida em sistema de plantio direto, onde se faz o preparo mínimo do solo antes de plantar a nova safra, deixando os restos culturais da safra anterior, seja de soja ou de algum cultivo entre safra, sobre o solo. Nesse sistema, apenas é feita a aplicação de cal para redução da acidez do solo, seguida da aplicação de agrotóxicos, antes da realização da semeadura, que é feita com sementes já com inóculo de bactérias fixadoras de nitrogênio. A aplicação de fertilizantes é feita nos sulcos onde as sementes são colocadas. Todos os processos na lavoura da soja costumam ser feitos com máquinas, até mesmo no caso de produtores familiares.

2.2. Extração do Óleo Vegetal

O processo de extração do óleo depende da planta oleaginosa da qual ele vai ser extraído. Os principais processos empregados são a extração mecânica, através do uso de uma prensa (prensagem), e a extração por uso de solventes. A prensagem é mais indicada para oleaginosas com alto teor de óleo, como o babaçu, a mamona, o amendoim. Já o uso de solventes é mais indicado para oleaginosas com teores menores de óleo, como soja. Para algumas oleaginosas, com teor de óleo médio a alto, é comum o uso dos dois processos, como para o algodão, o girassol, e também em certos casos até

a mamona e o amendoim (PARENTE, 2003; AZVARADEL, 2008). O teor de óleo residual, decorrente da extração por solventes pode ser inferior a 1%, enquanto só com a prensagem são obtidos valores da ordem de 10% (DAG/UEM, 2007 *apud* AZVARADEL, 2008). A extração de óleo do fruto do dendê, embora este não tenha um alto teor de óleo se considerada a massa total de cachos de frutos frescos, é geralmente feita só por prensagem, por ser um processo mais simples e de investimentos mais baixos e por evitar a perda das propriedades naturais, que pode acontecer com a utilização de solventes (VIANA, 2008; CARVALHO, 2011; PARADIGMA, 2012). Além disso, imagina-se que haja uma maior facilidade de extração do óleo por prensagem a partir da polpa do fruto do que de grãos, o que acontece na extração do óleo de dendê.

Antes da extração, os grãos de soja e os cachos de frutos do dendê devem passar por um preparo. Os tratamentos realizados para preparar a matéria-prima são específicos para cada uma, e dependem também de qual o processo de extração a ser adotado. Em todos os casos, é feita uma limpeza para retirada de materiais indesejados que podem estar misturados a elas, evitando danos nos equipamentos de extração.

Após a limpeza, os grãos de soja passam por uma nova secagem, uma vez que apresentam alto teor de umidade, seguida da decorticação, que é a retirada de fibras do grão por meio de atrito ou impacto. Após a decorticação, os grãos passam por processos de cozimento, laminação e expansão, para permitir a melhor penetração do solvente nas células visando a uma extração mais eficiente de óleo (ASCHERI, 2008 *apud* AZVARADEL, 2008; LIMA & CASTRO, 2010b). Já os cachos de dendê são submetidos à esterilização, seguida de debulhamento, para soltar os frutos, e novamente a outra esterilização dos frutos (LIMA & CASTRO, 2010b). A esterilização facilita o desprendimento dos frutos do pedúnculo e neutraliza as enzimas lipases que fazem com que o óleo se torne ácido.

A extração de óleo bruto dos grãos de soja é feita só por solvente. O solvente mais usado é o hexano, um derivado de petróleo que possibilita a extração de quase todo óleo, deixando um resíduo desgordurado chamado farelo, usado como ração animal. O hexano não interage com outras substâncias presentes no grão, é miscível em água, altamente inflamável e tóxico para consumo humano, devendo ser separado do óleo

bruto resultante. Essa separação é feita através de destilação da mistura por evaporação em três estágios (a 85°C, a 90°C e a 95°C), seguida de condensação e decantação do solvente, permitindo seu reuso em novas extrações. O óleo bruto resultante passa por uma desumidificação e segue para degomagem e refino (LIMA & CASTRO, 2010b).

Para o dendê, é feita a prensagem que extrai praticamente todo o óleo do mesocarpo dos frutos, formando uma torta que contém nozes presentes nos frutos. As nozes são descascadas para retirar as amêndoas, que podem ser usadas para extrair óleo de palmiste. Já as cascas costumam ser usadas como adubo ou na produção de vapor e energia elétrica em caldeiras. A torta de palmiste resultante da extração do óleo de palmiste é vendida para ração animal ou usada como adubo. O óleo de dendê também tem que passar por desumidificação e degomagem para ser refinado, em processo muito semelhante ao realizado para o óleo de soja (LIMA & CASTRO, 2010b).

A separação das gomas do restante do óleo é feita por centrifugação, e a primeira operação do refino é a neutralização de ácidos graxos livres presentes no óleo com soda cáustica (hidróxido de sódio). Em seguida, o óleo é lavado com água quente para remover sabões resultantes da neutralização e é submetido à centrifugação. As próximas operações do refino, branqueamento e desodorização¹⁵, só são realizadas se o destino do óleo for à indústria alimentícia, sendo desnecessárias para a produção de biodiesel (LIMA & CASTRO, 2010b). Além disso, para a produção de biodiesel, o óleo degomado deve ser desumidificado, pois com a umidade superior a 0,05% pode haver maior consumo de catalisador. Esse preparo do óleo bruto antes da transformação em biodiesel é necessário para maximizar a conversão em biodiesel, evitar a perda de qualidade do combustível e não danificar os reatores (PARENTE, 2003; MONTEIRO, 2007).

¹⁵ O branqueamento é feito misturando-se terras clarificantes ao óleo para remover certas substâncias presentes nele. A mistura é agitada e o óleo é filtrado. A desodorização é a retirada de odores e sabores desagradáveis presentes no óleo, através de injeção de vapor direto em condições de alto vácuo (LIMA & CASTRO, 2010b).

2.3. Produção de Biodiesel

Os óleos vegetais, embora muitas vezes utilizados *in natura* em mistura com o diesel ou até mesmo sozinhos em motores móveis e estacionários, não apresentam as características necessárias para substituir o diesel sem trazer prejuízos aos motores¹⁶. Os óleos vegetais *in natura* são muito viscosos e apresentam baixa volatilidade, necessitando passar por algum tipo de processamento que altere sua estrutura molecular e suas propriedades, de modo a torná-las bem parecidas com as do diesel mineral (SANTOS, 2007; SHARMA *et al*, 2009; ARREDONDO, 2009).

Os processos de alteração mais comuns desse tipo de matéria-prima são o craqueamento térmico (pirólise) e a transesterificação. O craqueamento térmico é um método de quebra das moléculas do material graxo ao ser submetido a temperaturas muito altas (superiores a 450°C) na ausência de oxigênio, podendo ser necessário um catalisador, como os óxidos de silício (SiO₂) ou de alumínio (Al₂O₃) (KNOTHE *et al*, 2006 *apud* VILLELA, 2009). De acordo com BIODIESELBR (2011c) o combustível produzido pelo craqueamento térmico não é considerado biodiesel pela nomenclatura internacional, apesar de ser um biocombustível semelhante ao óleo diesel. No entanto, às vezes esse processo acaba gerando um material mais parecido com a gasolina do que com o diesel (SHARMA *et al*, 2009). Além disso, o equipamento necessário é caro e o consumo energético é muito alto, tornando inviável o seu uso na obtenção do biodiesel (VIANNA, 2006).

A transesterificação, também chamada de alcoólise, é a reação de transformação de um éster em outro éster ao reagir com um álcool. No caso das gorduras animais e óleos vegetais, que são ésteres do tipo triglicerídeos, o álcool quebra a molécula do triglicerídeo, separando, em duas fases, a parte correspondente ao glicerol e o restante da molécula. O resultado, portanto, é a formação de outro éster, o biodiesel, e o glicerol, chamado comercialmente de glicerina. A retirada do glicerol, por centrifugação ou decantação, deixa o óleo mais fino e reduz sua viscosidade e densidade, tornando-o com características bem semelhantes às do óleo diesel (MONTEIRO, 2007; RAMOS, 2006

¹⁶ Carbonização e depósitos nos bicos injetores, nas válvulas de admissão e escapamento; desgaste prematuro dos pistões, anéis de segmento e cilindros; diluição do óleo lubrificante; entre outros (FETRANSPOR, 2011).

apud FETRANSPOR, 2011). A grosso modo, o glicerol representa cerca de 12% das moléculas de óleos vegetais, e necessita de uma quantidade correspondente de outro álcool (etanol ou metanol) para substituí-lo na molécula.

A transesterificação é o processo de obtenção de biodiesel a partir de óleos vegetais mais utilizados no mundo. Esse estudo assume que no Brasil todo biodiesel de óleo vegetal é produzido por transesterificação. Portanto, as informações a seguir apresentadas neste estudo são relativas a esse processo.

Essa reação geralmente é feita em presença de um catalisador, ácido ou alcalino. Apesar de o catalisador ácido evitar a produção de sabões durante o processo e não ser afetado por ácidos graxos livres possivelmente presentes na matéria-prima, como é o alcalino, a velocidade da reação com ele é muito menor do que com o catalisador alcalino e a remoção dele do biodiesel deve ser mais cuidadosa de modo a não prejudicar os motores (OLIVEIRA, 2004; VIANNA, 2006). Dessa forma, os catalisadores mais usados são os alcalinos, principalmente o hidróxido de potássio (KOH) e o hidróxido de sódio (NaOH). O catalisador é misturado ao álcool antes da reação, em um tanque com agitador, e a quantidade utilizada é muito pequena se comparada aos outros insumos, variando de 0,5 a 1% da quantidade de óleo (VIANNA, 2006; KHALIL, 2006; SANTOS, 2007).

Os alcoóis mais comumente utilizados no caso da produção de biodiesel são o etanol anidro e o metanol. Quando o primeiro é utilizado, diz-se que a rota de produção usada é a etílica, e o biodiesel formado é um éster etílico; quando o segundo é usado, a rota é a metílica e o biodiesel, um éster metílico. O álcool deve ser adicionado em maior quantidade do que a reação em si precisaria, para deslocar o equilíbrio da reação para a formação de biodiesel, visto que a transesterificação é uma reação reversível.

O metanol é mais utilizado em todo mundo por ser mais barato¹⁷ e apresentar várias vantagens técnicas em comparação ao etanol anidro: menor tempo de reação; menor temperatura necessária para a reação ocorrer (menor gasto de energia); menor consumo, inclusive de excedente, para uma mesma quantidade de óleo vegetal; maior facilidade

¹⁷ O metanol é uma *commodity*.

de recuperação e reintrodução do excedente em uma nova reação; maior facilidade de retirada do glicerol; entre outras (PARENTE, 2003; MONTEIRO, 2007).

Em contrapartida, o metanol é mais inflamável e tóxico do que o etanol, representando um risco à saúde e necessitando de maiores cuidados em seu manuseio. Ele geralmente é derivado do gás natural, um combustível fóssil, enquanto o etanol é produzido a partir de biomassa renovável. Portanto, enquanto as emissões de CO₂ da combustão¹⁸ do biodiesel etílico podem ser consideradas nulas, pelo carbono ter sido capturado na fotossíntese, parte das emissões da combustão do biodiesel metílico é de origem não renovável e devem ser contabilizadas. Além disso, o Brasil é importador de metanol¹⁹.

Embora o Brasil seja o segundo maior produtor de etanol do mundo, e o etanol aqui produzido a partir da cana-de-açúcar apresente um balanço energético bastante favorável em comparação a outros biocombustíveis, somente poucas usinas brasileiras tem usado a rota etílica, pelos motivos supracitados.

Depois de ocorrida a transesterificação, a fase mais pesada, composta pela glicerina impregnada com água, impurezas da matéria-prima e excesso do álcool usado, é separada por decantação ou centrifugação da fase mais leve, o éster (biodiesel) também impregnado por álcool e água. O processo de decantação é mais simples e muitas vezes é suficiente para a reação que utilizou o metanol. Já o de centrifugação exige um maior gasto de energia, e se faz necessário para os produtos da reação que utilizou etanol.

O álcool impregnado tanto na glicerina como no éster passam por processo de recuperação: cada fase é submetida, separadamente, à evaporação dos compostos voláteis (álcool e água), que, na forma de vapor, passam por um condensador (PARENTE, 2003; VIANNA, 2006). Os compostos voláteis vindos da glicerina, ao

¹⁸ O etanol, assim como o biodiesel, emite GEE ao longo do seu processo produtivo.

¹⁹ O Brasil atualmente importa mais de 60% da sua demanda interna de metanol (BLOGS PETROBRÁS – FATOS E DADOS, 2012). Mesmo assim, esse álcool chega ao mercado interno mais barato que o etanol de cana-de-açúcar aqui produzido, visto que o etanol apresenta preços para competir com a gasolina e não com o metanol.

serem condensados, passam por uma destilação a vácuo para retirar impurezas. Os condensados formados em ambos os processos são submetidos a um processo de desidratação, para retirada da água impregnada. No entanto, a desidratação do metanol é muito mais simples que a do etanol, porque este último tende a absorver mais água e se torna um etanol hidratado, uma mistura azeotrópica. Assim, enquanto a desidratação do metanol pode ser feita por destilação normal, a do etanol deve ser feita por destilação azeotrópica, processo mais intensivo em energia, ou ainda pode-se optar pelo não reaproveitamento do etanol no processo, embora ainda sejam necessárias pesquisas sobre outros usos para ele (PARENTE, 2003; VIANNA, 2006; VILLELA, 2009).

O éster resultante da separação deve ser purificado, através de lavagem por centrifugação e posterior desumidificação para resultar no biodiesel pronto para ser usado em motores do Ciclo Diesel. A glicerina (glicerol) resultante da separação pode ser vendida dessa forma, chamada de bruta, ou passar por um tratamento de purificação, através da destilação a vácuo, resultando na glicerina destilada, de valor mais alto no mercado (PARENTE, 2003).

3. ASPECTOS METODOLÓGICOS PARA REALIZAÇÃO DE BALANÇO DE EMISSÕES DE GEE

Diversos estudos avaliaram o desempenho energético e ambiental de diferentes biocombustíveis através de vários indicadores. Entre os aspectos mais importantes para um biocombustível ser considerado vantajoso é que ele deve fornecer um ganho líquido de energia, ou seja, a entrada total de energia durante seu processo de produção deve ser menor que a energia liberada por ele durante o seu uso, e deve emitir menos GEE ao longo de todo seu ciclo de vida do que o combustível fóssil que ele venha a substituir (HILL *et al*, 2006). Dessa forma, os indicadores mais usados são o balanço energético e o balanço de emissões de GEE. Ferramentas mais complexas como a análise exergética²⁰ e a análise emergética²¹ também têm sido bastante utilizadas para comparar combustíveis diferentes. No entanto, de forma geral, a maioria dos estudos utiliza princípios e fundamentos da Análise de Ciclo de Vida (ACV) e, portanto, estes são brevemente analisados a seguir em relação à produção de biodiesel.

3.1. Contribuições da ACV para a Realização de um Balanço de Emissões

De acordo com Cherubini (2010), a ACV é uma metodologia de investigação e avaliação dos impactos ambientais de um produto ou serviço no que diz respeito não só ao seu uso final, mas a todos os impactos causados ao longo de sua cadeia produtiva. É uma análise do produto ou serviço do “berço ao túmulo”²², ou seja, no caso de um produto, se inicia na extração das matérias-primas necessárias para sua produção, e

²⁰ De acordo com Tsatsaronis (2007) e Talens (2007), a exergia pode ser definida como a quantidade máxima de trabalho útil que pode ser feita por um sistema enquanto ele se aproxima do equilíbrio termodinâmico com o entorno, onde a exergia é nula.

²¹ De acordo com Odum (1988 *apud* TAKAHASHI & ORTEGA, 2010), “emergia é definida como a soma de todas as entradas de energia diretamente ou indiretamente requeridas em um processo de produção de um dado produto e expressa em joules solar equivalente (seJ)”. A análise emergética considera as entradas da natureza, como energia do sol, do vento, da chuva, entre outras, e as da economia, como serviços, máquinas, combustíveis fósseis, e outros.

²² Em inglês, “cradle-to-grave”.

termina na disposição dos resíduos gerados por todo processo (BERGHOUT, 2008). Dessa forma, ela permite a comparação entre diferentes produtos de um mesmo tipo, permitindo que o usuário possa usar o desempenho ambiental como critério de escolha.

A ACV é uma metodologia internacionalmente reconhecida, que tem como guia de elaboração padrão a série de normas ISO 14040. Esta série estabelece que uma análise de ciclo de vida deve considerar os seguintes estágios (CHERUBINI, 2010):

- 1- Definição de objetivo e escopo do estudo (norma ISO 14041): define e descreve o objeto de análise, estabelece sob qual contexto a avaliação está sendo desenvolvida, discute pressupostos e qualidade de dados, define os limites do sistema e a unidade funcional a ser usada (CHERUBINI, 2010);
- 2- Inventário do Ciclo de Vida (ICV) (norma ISO 14041): coleta e modelagem de dados de entradas e saídas, (*inputs* e *outputs*) como os fluxos de matéria e energia e as emissões ao meio ambiente (solo, água, ar), ao longo de todo ciclo de vida de produção do produto ou serviço em estudo; adaptação dos dados à unidade funcional definida no escopo do estudo; apresentação dos resultados (MORTIMER *et al*, 2003; CHERUBINI, 2010);.
- 3- Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida (AICV) (norma ISO 14042): avaliação dos impactos potenciais associados ao uso de recursos e às emissões resultantes dos processos ocorridos ao longo de todo ciclo de vida do produto, calculados a partir dos resultados do inventário. Ela deve ser feita para categorias de impactos: impactos no efeito estufa, impactos na qualidade do ar, da água, do solo, impactos na saúde das pessoas, impactos na biodiversidade, entre outras. Em seguida, são opcionais a normalização e a ponderação; a primeira para permitir a comparação entre diferentes categorias de impactos, colocando todos os impactos numa mesma unidade; e a segunda para mostrar a importância relativa de cada categoria através da atribuição de pesos diferentes (MORTIMER *et al*, 2003; CHERUBINI, 2010);
- 4- Interpretação do Ciclo de Vida (norma ISO 14043): interpretação dos resultados encontrados em relação aos objetivos do estudo, e elaboração de conclusões (CHERUBINI, 2010).

O objetivo desse trabalho não é fazer uma Avaliação do Ciclo de Vida do biodiesel, e sim fazer estimativas das emissões de GEE do processo de produção desse biocombustível feito a partir de soja e dendê. No entanto, alguns aspectos mencionados acima merecem atenção, pois serão úteis na elaboração dessas estimativas. São eles: unidade funcional, fronteira do sistema, sistema de referência e critérios de alocação. Além disso, uma breve discussão sobre a mudança de uso de solo está incluída nesta seção.

Nos últimos anos, balanços realizados por diferentes pesquisadores frequentemente apresentaram resultados divergentes, mesmo se tratando de biocombustíveis do mesmo tipo a partir da mesma matéria-prima. Estas divergências podem estar relacionadas aos seguintes motivos (CHERUBINI, 2010; HOEFNAGELS *et al*, 2010):

- Diferença na definição das fronteiras do sistema;
- Diferença no método de alocação adotado;
- Diferença no sistema de referência;
- Diferença nas tecnologias empregadas na produção;
- Diferença de comportamento no plantio, como tipo de manejo, quantidade de fertilizantes aplicados (também dependente do tipo de solo), quantidade de combustível gasto no maquinário, entre outros;
- Diferença no rendimento da plantação;
- Diferença nas distâncias percorridas para transportar a matéria-prima até as usinas e o biocombustível até os distribuidores;
- Inclusão ou não da mudança do uso do solo, direta ou indireta; entre outras.

Como este estudo busca comparar diferentes matérias-primas oleaginosas para produzir biodiesel de óleo vegetal, alguns dos parâmetros citados acima (rendimento, quantidade de insumos utilizada, distância de transporte, entre outros) são específicos de cada tipo de cultura e certamente serão diferentes entre elas. No entanto, é preciso que a unidade funcional, as fronteiras do sistema e o método de alocação assumidos sejam os mesmos para cada matéria-prima.

Unidade Funcional

A unidade funcional escolhida como base para estimar as emissões de GEE de um processo produtivo deve permitir uma correta interpretação dos resultados e uma comparação entre eles (dentro de cada categoria) (MORTIMER *et al*, 2003). As emissões de GEE de toda a cadeia podem ser estimadas para várias unidades funcionais no caso do biodiesel produzido a partir de plantas oleaginosas: por ano (kg CO₂e/ano), por hectare de terra agricultável (kg CO₂e/ha), por quantidade de energia contida no combustível (kg CO₂e/GJ de combustível), por quantidade de eletricidade produzida, no caso do combustível ser usado em um gerador elétrico (kg CO₂e/kWh), ou por distância percorrida (kg CO₂e/km percorrido), no caso dele ser usado em meios de transporte (CHERUBINI, 2010). Nos últimos dois casos, caso seja feita uma comparação entre combustíveis, o correto seria usar o mesmo motor para realizar as medidas, uma vez que a potência/desempenho pode ser diferente para diferentes motores (MORTIMER *et al*, 2003; GNANSOUNOU *et al*, 2009). As condições de tráfego também devem ser as mesmas, no caso do uso em veículos (MORTIMER *et al*, 2003).

A escolha da unidade depende do objetivo do estudo. Alguns pesquisadores consideram que a melhor unidade funcional é distância percorrida (kg CO₂e/km percorrido), principalmente quando o biocombustível vai ser comparado com o seu equivalente fóssil (MORTIMER *et al*, 2003). Para comparação entre biocombustíveis produzidos a partir de uma mesma categoria de matéria-prima (ex. plantas oleaginosas) muitos acreditam que a medida por área agricultável é mais importante, principalmente quando o foco do estudo é a eficiência do uso da terra, visto que a disponibilidade de terras agricultáveis é o maior gargalo da produção de biocombustíveis de primeira geração em vários países, inclusive por causa da competição com cultivos alimentares (CHERUBINI, 2010).

Para comparar entre si biocombustíveis provenientes de diferentes categorias de matéria-prima²³ ou entre biocombustíveis provenientes de diferentes biomassas residuais, as unidades funcionais mais indicadas são a distância percorrida ou a

²³ Por exemplo, comparar biodiesel produzido de óleo residual com biodiesel produzido a partir de óleo virgem.

quantidade de energia contida no combustível, de forma que independe do tipo de matéria-prima ou do processo de sua conversão em combustível (CHERUBINI, 2010).

Fronteiras do Sistema

Para a ACV, o ciclo de vida do produto analisado pode ser tratado como um sistema. Dessa forma, a delimitação das fronteiras deste sistema é uma das etapas mais importantes, pois indica o que vai ser considerado e o que vai ficar de fora na avaliação, por exemplo, quais entradas de materiais e energia e quais saídas de emissões e resíduos vão ser consideradas pelo sistema avaliado. De acordo com Vianna (2006), são fatores levados em conta nesta etapa os objetivos do estudo, as premissas estabelecidas, a disponibilidade de dados, entre outros.

O estudo de estimativa das emissões de GEE relacionadas ao ciclo de vida de um biocombustível pode ter uma fronteira mais restrita ou mais ampla dependendo do seu objetivo. Geralmente é utilizada a análise *Well-to-Wheel* (da origem à roda do veículo) quando o objetivo é compará-lo com o seu análogo fóssil para uso em veículos automotores ou ainda com combustíveis de outros tipos²⁴. Quando o objetivo for compará-lo com biocombustíveis do seu mesmo tipo de matéria-prima de origem, por exemplo, biodiesel de óleo de soja com biodiesel de óleo de palma, muitas vezes é feita apenas uma análise *Well-to-Tank* (da origem ao tanque do veículo), que não inclui a etapa de consumo do combustível (*Tank-to-Wheel*), pois o biodiesel costuma ter o mesmo desempenho na combustão, independente de sua matéria-prima de origem e da sua cadeia produtiva (GNANSOUNOU *et al*, 2009).

Geralmente, uma estimativa das emissões do ciclo de vida do biodiesel considera as entradas de matéria e energia e a saída de emissões de GEE para as seguintes etapas de fabricação: cultivo da oleaginosa, transporte da oleaginosa até a usina de extração do óleo vegetal, extração do óleo vegetal, transporte dele até a usina de produção do biodiesel²⁵, produção do biodiesel através da transesterificação, transporte do biodiesel

²⁴ Por exemplo, comparar biodiesel com etanol.

²⁵ Algumas usinas de biodiesel também realizam a extração do óleo vegetal, subtraindo dessa forma uma etapa de transporte.

até os distribuidores, consumo do combustível²⁶. Em cada uma dessas etapas, a definição do que vai ser contabilizado varia muito de estudo para estudo. De forma geral, são consideradas as emissões relacionadas às entradas diretas de energia externa para a realização de processos, como os combustíveis fósseis e eletricidade usados no cultivo da matéria-prima, na extração do óleo, na transesterificação e nos transportes de insumos e produtos, as emissões relacionadas às entradas indiretas de energia, como a energia associada à produção de insumos (fertilizantes, pesticidas, corretivos, alcoóis usados na transesterificação, catalisadores, entre outros), as emissões da aplicação de fertilizantes e corretivos, e as emissões dos solos.

Alguns estudos consideram também a energia e emissões relativas à fabricação dos equipamentos usados ao longo do ciclo, como máquinas agrícolas, prensas para extração de óleo, reatores, entre outro, e até mesmo, às vezes, as emissões relativas à fabricação de todo o material usado e a energia consumida para construção do espaço físico das usinas (YAN e CROOKES, 2009). Um assunto muito abordado ultimamente nos estudos do ciclo de vida do biodiesel é a inclusão das emissões de GEE relativas à mudança do uso do solo. Cada vez mais pesquisadores alertam sobre a importância de se considerar este fator uma vez que o cultivo de matérias-primas pode provocar destruição da vegetação natural, ainda que indiretamente, em muitos lugares onde é realizado. Por conta da complexidade em torno do assunto, ele foi discutido em um item específico desta seção do estudo.

Alocação

A alocação é a divisão dos impactos ambientais de um sistema pelos produtos resultantes desse sistema, aplicada quando é gerado mais de um produto (CHERUBINI, 2010). É a alocação da responsabilidade dos prejuízos ambientais de um sistema multifuncional por todos os produtos gerados por ele (GNANSOUNOU *et al*, 2009). Ela pode ser feita considerando só os coprodutos, ou em alguns casos considerando também os subprodutos. No entanto, Cavalett e Ortega (2010) consideram que a alocação só deve ser feita se os coprodutos e/ou subprodutos forem aceitos no mercado, pois se não o forem, devem ser considerados resíduos do processo. Quando a alocação

²⁶ Esta etapa não é considerada na abordagem *Well-to-Tank*.

não é feita, todos os impactos são atribuídos ao produto principal da análise. De acordo com Thamsiriroj e Murphy (2011), não fazer alocação é uma postura mais simples e conservadora, porém pode levar a resultados que se distanciam muito da realidade.

Existem vários métodos de alocação. São eles (YAN e CROOKES, 2009; HOEFNAGELS *et al*, 2010; CHERUBINI, 2010 ; THAMSIRIROJ E MURPHY, 2011):

- Alocação por conteúdo energético de cada coproduto;
- Alocação por massa ou volume de cada coproduto;
- Alocação por valor de mercado de cada coproduto;
- Alocação por expansão dos limites do sistema (substituição).

Os dois primeiros métodos listados são mais fáceis de aplicar e não sofrem influência de fatores econômicos, como variação de preços, subsídios e interferências de mercado (GNANSOUNOU *et al*, 2008a; HOEFNAGELS, 2010). Já a alocação por valor de mercado ou valor econômico tem a vantagem da demanda ser a principal força motriz de um sistema de produção (GNANSOUNOU *et al*, 2008a; HOEFNAGELS *et al*, 2010). Alguns pesquisadores afirmam que a alocação por massa, embora seja fácil de realizar e de interpretar, deve ser evitada por não ser uma boa medida das funções de um sistema energético (GNANSOUNOU *et al*, 2009). Entretanto, Gnansounou *et al* (2009) colocam que a alocação por conteúdo energético não é interessante se os coprodutos não forem usados para com finalidades energéticas.

A alocação por expansão dos limites do sistema, também chamada de substituição, leva em consideração que os coprodutos podem substituir outros produtos com demanda de mercado, e assim a maior produção de determinado coproduto pode reduzir a fabricação do produto a que ele possa vir a substituir. Desta forma, as emissões evitadas com a não produção do produto substituído devem ser levadas em conta. Caso os coprodutos não possam ser usados como substitutos, esse método não pode ser usado (MORTIMER *et al*, 2003). Esse método aumenta o escopo da análise e requer a escolha de novos limites, de forma a incluir as emissões do ciclo de vida dos produtos a serem substituídos, o que não é simples de fazer, pois muitos outros dados são necessários, além de novas escolhas arbitrárias (HOEFNAGELS *et al*, 2010).

A norma ISO 14041 recomenda a alocação por expansão dos limites do sistema, sempre que possível (GNANSOUNOU *et al*, 2008b). Já a Diretiva da União Europeia sobre energias renováveis²⁷ recomenda o uso da alocação com base no PCI de cada coproduto (GNANSOUNOU *et al*, 2009; HOEFNAGELS *et al*, 2010; THAMSIRIROJ E MURPHY, 2011).

No caso da cadeia produtiva do biodiesel, alguns coprodutos são gerados, dentre eles a torta produzida no processo de extração do óleo vegetal e a glicerina obtida na transesterificação. A torta pode ser usada como fertilizante, se aplicada ao solo, ou como ração animal (VIANNA, 2006). A glicerina tem várias aplicações em indústrias químicas, especialmente farmacêutica e de cosméticos (VIANNA, 2006). No entanto, ela é também um coproduto da produção de sabão, e alguns pesquisadores já a consideram um resíduo do processo produtivo do biodiesel, pois acreditam que haverá um excesso de glicerina no mercado com consequente queda brusca de preço por causa da produção do biocombustível (MORTIMER *et al*, 2003; LÉCHON *et al*, 2009). Portanto, existe muita discussão em torno da alocação na produção de biodiesel, se ela deve ser feita ou não, e qual o melhor método.

Thamsiriroj e Murphy (2011) exemplificaram que, para o caso do biodiesel produzido a partir da colza na União Européia, a torta produzida requer um processamento antes de ser considerada como fonte de energia, podendo ser convertida em biogás para uso em veículos ou geração de eletricidade, o que acaba não acontecendo na prática, sendo melhor não adotar a alocação por conteúdo energético. A alocação pelo método de substituição, nesse mesmo caso, pode ser complexa, uma vez que se pode considerar que a torta da colza substitui o farelo de soja, mas este também é coproduto da produção de óleo de soja (MORTIMER *et al*, 2003; ELSAYED *et al*, 2003; LÉCHON *et al*, 2009). A redução da produção de soja para produzir farelo ou diretamente da produção de farelo e redução da produção do óleo de soja poderia levar a um aumento do consumo de óleo de colza para fins alimentares e reduzir a disponibilidade para uso do óleo na produção de biodiesel, além de gerar menos óleo de soja para a produção de biodiesel.

²⁷ Diretiva 2009/28/CE do Parlamento Europeu e Conselho da União Européia (EUROPEAN UNION, 2009).

Estes casos mostram a complexidade de se optar por um método de alocação. O método escolhido tem grande influência no resultado final da análise e, portanto, é indicada uma análise de sensibilidade, comparando os resultados do uso de vários métodos de alocação diferentes (CHERUBINI, 2010). Os resultados dos impactos atribuídos à produção de combustíveis, tanto renováveis como fósseis, têm sido retratados como muito sensíveis ao tipo de alocação escolhido.

Sistema de Referência

Na maioria das vezes, estudos de balanço de emissões de GEE de certos produtos são feitos com objetivo de serem comparados a outros produtos análogos, de forma a analisar qual deles emite maior quantidade de GEE. No caso de um biocombustível, um dos objetivos pelo qual sua produção vem sendo incentivada é a utilização em substituição parcial ou total de combustíveis fósseis de forma a reduzir o uso de energia de origem fóssil e reduzir as emissões de GEE de atividades que necessitem de combustíveis. Assim, a comparação do biocombustível com o seu equivalente fóssil deve ser feita de forma a permitir a comprovação se esses objetivos são ou não atingidos. O combustível fóssil a ser substituído, nesse caso, é a linha de base da comparação e sua cadeia produtiva também deve ser estudada, formando então o sistema de referência. A definição, portanto, do sistema de referência e suas fronteiras é essencial para se realizar tal comparação.

Os resultados da comparação podem apresentar grandes variações dependendo da referência escolhida. Por exemplo, a eletricidade gerada a partir de combustíveis fósseis pode ser produzida por combustíveis líquidos derivados de petróleo, por gás natural, carvão, entre outras fontes, cada qual com fatores de emissão de GEE diferentes. Ao substituir esse tipo de eletricidade pela gerada por biomassa, por exemplo, a redução de emissões vai ser maior se comparada com a gerada por carvão do que com a gerada por gás natural (CHERUBINI, 2010).

Para o biodiesel produzido para uso automotivo, o sistema de referência é o diesel, um combustível derivado do petróleo. A cadeia produtiva para combustíveis derivados do petróleo tem como etapas principais a extração do óleo cru, o transporte deste até a refinaria, o refino, o transporte do derivado até as distribuidoras, e sua combustão no motor (YAN & CROOKES, 2009; CHERUBINI, 2010). Assim como para sistemas

bioenergéticos, emissões do processo de refino estão baseadas em princípios arbitrários de alocação entre os produtos resultantes deste processo. Além disso, existe uma ampla variação no desempenho relacionado às emissões de GEE e ao uso de energia de petróleos de diferentes origens, pois à medida que as reservas de petróleo mais acessíveis estão se esgotando, o processo de extração passa a requerer mais energia e emitir mais GEE (HOEFNAGELS *et al*, 2010).

Mudanças de Uso do Solo

Muito tem se discutido sobre a inclusão das emissões relativas à mudança de uso do solo na contabilização das emissões do ciclo de vida de biocombustíveis. Vários estudos já demonstraram que a destruição de vegetação natural, que armazena carbono, para dar lugar a um cultivo novo de plantas com finalidades energéticas, leva a um balanço de emissões negativo do biocombustível, ou seja, a suposta economia nas emissões de GEE em relação ao uso de combustível fóssil correspondente não compensa as emissões ocasionadas pela mudança de uso de solo de vegetação natural ou com algum grau de conservação, principalmente se essa vegetação for uma floresta tropical densa e se o cultivar a ser plantado for anual ao invés de perene (GNANSOUNOU *et al*, 2009; CHERUBINI, 2010).

Fargione *et al* (2008) fizeram um estudo mostrando que vários países, ao converterem florestas tropicais, turfeiras, savanas ou pradarias em área para produção de biocombustíveis de primeira geração, criam uma “dívida de carbono” ao liberar de 17 a 420 vezes mais CO₂ que a redução que esses combustíveis proporcionariam ao substituírem um de origem fóssil. Eles estimaram esta dívida para alguns biocombustíveis produzidos em diferentes locais considerando que houvesse mudança de uso do solo, através da contabilização da quantidade de CO₂ que é liberada pelo solo e pela queima ou decomposição da biomassa antes existente em cima e abaixo do solo, e descontando a parte que se transforma em carvão, recalcitrante à decomposição. Desta forma, o estudo mostrou quantos anos seriam necessários para compensar a perda de carbono da mudança do uso do solo com a economia do uso do biocombustível em relação ao combustível fóssil para cada caso, mesmo atribuindo uma parte da dívida de carbono a certos coprodutos para alguns dos biocombustíveis analisados. A Figura 11 mostra os resultados desse estudo.

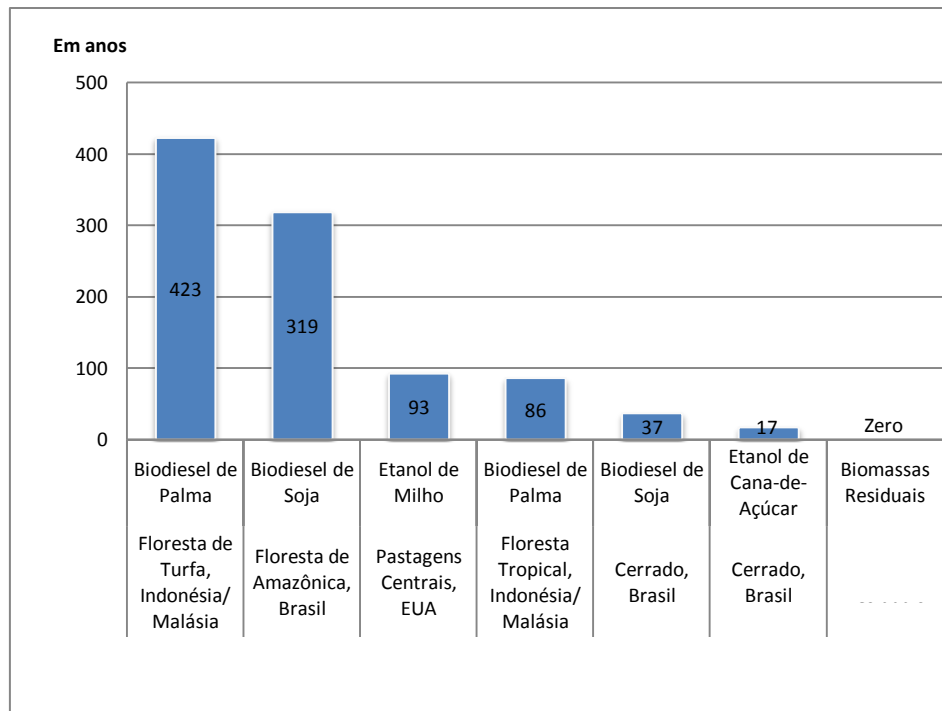


Figura 11 - Tempo (em anos) necessário para zerar as emissões de CO₂ liberadas na mudança de uso do solo com a redução de emissões do uso do biocombustível em substituição a um correspondente fóssil.

Fonte: Adaptado de Fargione *et al* (2008) e ITAIPU BINACIONAL & FAO (2009).

Para os autores do estudo, seria necessário 37 e 319 anos para compensar o plantio de soja para produção de biodiesel em área convertida do Cerrado e da Floresta Amazônica, respectivamente, ou mesmo 423 anos para a palma produzida em local de Floresta de Turfa na Malásia ou na Indonésia. Portanto, eles concluíram que, quando produzidos em áreas convertidas, os biocombustíveis são mais emissores que os combustíveis fósseis que eles substituem. No entanto, vários pesquisadores afirmam que a mudança de uso do solo também pode resultar em captura de carbono, caso a área a ser ocupada com plantio seja uma área degradada (HOEFNAGELS *et al*, 2010; CHERUBINI, 2010).

Apesar das mudanças nos estoques de carbono no solo e na biomassa serem específicas de cada local, devido às características de clima e solo, além de altamente dependentes das práticas agrônomicas adotadas anteriormente e atualmente, o IPCC (IPCC, 2006) fornece valores padrão que podem ser adotados para estimar o efeito anual da mudança de uso do solo. Outros valores padrão podem ser encontrados na literatura, além de algumas ferramentas de softwares capazes de modelar essas variações (HOEFNAGELS *et al*, 2010; CHERUBINI, 2010).

Embora esse tipo de mudança de uso de solo explicitada nos parágrafos acima, chamada de direta, esteja sendo incluída em vários estudos, outro tipo de mudança de uso do solo, a indireta²⁸, quase não é contabilizada por conta de dificuldades metodológicas, ainda que muitos reconheçam a sua importância.

A mudança de uso do solo indireta ocorre quando uma atividade, como criação de gado ou plantio de alimentos, é deslocada de um local onde a atividade já existia há algum tempo para uma área nova, por conta do plantio para a produção de biocombustíveis na sua área original (CHERUBINI, 2010). Assim como para a mudança direta, a destruição da vegetação natural por conta desse deslocamento libera CO₂ para a atmosfera, gerando uma dívida de carbono para os biocombustíveis. No entanto, esse tipo de mudança não é diretamente observável, é difícil de atribuir a somente uma única causa e para estimá-la é necessário um entendimento detalhado da dinâmica do uso da terra e do mercado agrícola (HOEFNAGELS *et al*, 2010; EDENHOFER *et al*, 2011).

De acordo com Hoefnagels *et al* (2010), alguns estudos já propuseram métodos de contabilização mas foram muito criticados, não havendo ainda um método de maior aceitação. Logo, mais estudos são necessários para estabelecer metodologias de cálculo que sejam aceitas pela comunidade científica de forma a incluir esse aspecto nos inventários de ciclo de vida (GNANSOUNOU *et al*, 2009).

3.2. Metodologia Utilizada para Estimar as Emissões de GEE da Cadeia Produtiva do Biodiesel no Brasil

O biodiesel de soja e o biodiesel de dendê foram os sistemas analisados nesse estudo. Cada um deles incluiu os seguintes subsistemas (EPE, 2009):

- Etapa agrícola das lavouras de soja ou dendê;
- Transporte entre a etapa de plantio e a de extração de óleo vegetal;
- Etapa industrial de extração de óleo vegetal e de produção de biodiesel;
- Etapa de consumo do biodiesel.

²⁸ Em inglês, fala-se em LUC, *Land Use Change*, e ILUC, *Indirect Land Use Change*.

Para atingir o objetivo final de comparação entre as oleaginosas, as emissões foram estimadas para cada t de biodiesel produzido a partir de cada matéria-prima. Em seguida, para permitir a comparação com o diesel mineral, as emissões foram recalculadas para uma quantidade de massa de biodiesel correspondente a 1 t de diesel devido ao maior conteúdo energético do equivalente fóssil. As emissões se restringiram apenas ao CO₂, CH₄ e N₂O dentre os GEE existentes, por serem considerados os mais relevantes emitidos ao longo de uma cadeia de produção de um biocombustível de primeira geração. As emissões de diferentes gases de efeito estufa devem ser transformadas em uma mesma unidade para que possam ser somadas, o CO₂ equivalente (CO₂e), uma vez que cada gás possui diferente capacidade de reter o calor na atmosfera. Essa transformação é feita multiplicando a quantidade estimada de cada gás pelo seu Potencial de Aquecimento Global (PAG)²⁹, cujos valores mostram o poder de retenção de calor de cada gás em comparação ao CO₂ em um mesmo horizonte de tempo. Os valores de PAG para o CO₂, o CH₄ e o N₂O adotados nesse estudo foram, respectivamente, 1, 25 e 298 para um horizonte de tempo de 100 anos (IPCC, 2007).

De modo a facilitar as estimativas, foi considerado, para cada oleaginosa, somente o biodiesel produzido com metanol. Além disso, é o método que predomina no Brasil, respondendo por 96,7% do biodiesel produzido no Brasil em 2010, de acordo com ANP (2011b).

A metodologia adotada para realizar essas estimativas foi estabelecida com base na metodologia para projetos de MDL com biodiesel ACM0017 da UNFCCC (UNFCCC, 2010), no Guia de Inventários de Emissões do IPCC (LASCO *et al*, 2006; KLEIN *et al*, 2006), nos estudos de Gnansounou *et al* (2008a), Gnansounou *et al* (2008b), EPE (2009), entre outros estudos consultados, e considerou a disponibilidade de dados como fator essencial para definir o que iria ser incluído dentro das fronteiras dos subsistemas.

Dessa forma, para a **etapa agrícola** foram consideradas as seguintes estimativas:

- Emissões de GEE da **produção** dos principais insumos usados na lavoura: cal, diesel, fertilizantes e agrotóxicos (equação A1);
- Emissões de GEE da combustão de diesel nas máquinas agrícolas (equação A2);

²⁹ Em inglês, *Global Warming Potential* (GWP).

- Emissões de CO₂ da aplicação da cal ao solo (equação A3);
- Emissões da aplicação de fertilizantes nitrogenados minerais e orgânicos ao solo (emissões de N₂O para os fertilizantes nitrogenados minerais e orgânicos de maneira geral, e também emissões de CO₂ se o fertilizante aplicado em questão for ureia) (equação A4);
- Emissões diretas de N₂O do manejo da lavoura (equação A5);
- Emissões indiretas de N₂O do manejo da lavoura (equação A6);

As emissões da produção e transporte de sementes utilizadas no plantio não foram consideradas por este estudo devido à dificuldade de se estabelecer fatores de emissão para essa atividade, bem como de identificar as empresas produtoras, que para algumas oleaginosas são várias. Os cultivos comerciais das oleaginosas estudadas, de forma geral, compram sementes dessas grandes empresas produtoras buscando um maior rendimento da cultura e uma menor incidência de pragas. Para cada cultura há uma série de cultivares diferentes, às vezes adaptados para diferentes condições climáticas, às vezes resistentes a determinadas pragas ou doenças, ou até para gerar mais óleo ou mais proteína do que o teor normal. Além disso, o mercado de sementes ainda dispõe de sementes híbridas e sementes geneticamente modificadas. Portanto, como essas empresas dispõem de tecnologia para produzir sementes de melhor qualidade do que o próprio produtor comercial da cultura, este prefere ter este gasto de aquisição a usar suas próprias sementes (CASTRO & LIMA, 2010b). No entanto, alguns agricultores familiares, principalmente no Nordeste, acabam obtendo rendimentos menores de suas produções por não poderem comprar sementes boas ou por usarem sementes próprias. Em alguns municípios, o governo compra e disponibiliza essas sementes para pequenos agricultores.

As emissões de N₂O e CH₄ da queima de biomassa devem ser estimadas quando essa prática for utilizada nas lavouras. No entanto, foi assumido que não há queima, uma vez que essa prática não é comum nos cultivos de soja e de dendê, a menos que haja ocupação de novas áreas. Também não foram levadas em consideração as emissões do transporte dos insumos agrícolas do local de fabricação destes insumos até o local do plantio, devido à dificuldade de obtenção dessas informações.

Em relação às emissões de carbono dos solos, como as emissões de CO₂ de origem biológica não são contabilizadas, a metodologia da UNFCCC (UNFCCC, 2010) e a do IPCC (LASCO *et al*, 2006) somente consideram que as emissões de CO₂ resultantes da mudança de estoques de carbono do solo devido à mudanças no uso do solo ou nas práticas de manejo devem ser contabilizadas quando ocorrerem (SCHMIDT, 2007). No entanto, elas foram desconsideradas nesse estudo, pois não há dados no Brasil para estimar o quanto de cada lavoura mudou suas práticas de manejo e quando isso ocorreu. Considera-se, então, que as práticas de manejo se mantiveram as mesmas ao longo dos anos. O mesmo foi feito em uma avaliação do ciclo de vida da produção de óleo de palma na Malásia por Schmidt (2007).

No caso das emissões referentes à mudança de uso do solo, diversos estudos já estimaram que somente as emissões de carbono da biomassa perdida com a mudança de uso de solo de florestas ou savanas para áreas de cultivo já são muito superiores às emissões do próprio cultivo, e que, de forma geral, todos os biocombustíveis de primeira geração possuem balanços de emissões negativos quando consideram essas emissões (FARGIONE *et al*, 2008; SEARCHINGER *et al*, 2008). Estudos apontam que o Brasil tem área degradada o suficiente para expandir as produções de oleaginosas sem causar desmatamento, principalmente para o dendê na Amazônia, porém a dificuldade de uma fiscalização contínua acaba resultando em novas expansões das lavouras para áreas de vegetação nativa. Ainda que isso aconteça, o objetivo do estudo é comparar as oleaginosas nas suas condições usuais de cultivo no Brasil considerando plantios já estabelecidos e, portanto, a mudança do uso do solo foi desconsiderada.

As emissões relacionadas à etapa agrícola foram primeiramente estimadas em t CO₂/ha e posteriormente recalculadas em t CO₂/ t de biodiesel.

Para as **etapas industriais** foram consideradas as seguintes estimativas:

- Emissões de GEE da produção dos insumos usados na extração de óleo: eletricidade da rede, solvente, combustível para geração de vapor e eletricidade *in situ* (equação I1);
- Emissões de GEE da queima de combustível em caldeiras para geração *in situ* de vapor e eletricidade para a extração de óleo (equação I2);

- Emissões da produção dos insumos usados na etapa de produção de biodiesel a partir do óleo vegetal: eletricidade da rede, metanol, catalisador, combustível para geração de vapor e eletricidade *in situ* (equação I3);
- Emissões de GEE da queima de combustível em caldeiras para geração *in situ* de vapor e eletricidade para a produção do biodiesel a partir do óleo vegetal (equação I4);

Como pontuado acima, atenta-se para o fato de que as emissões referentes à eletricidade consumida nas usinas de extração de óleo e nas usinas de produção de biodiesel, proveniente do Sistema Interligado Nacional, foram estimadas como emissões da produção dos insumos industriais.

Assim como na etapa agrícola, as emissões do transporte dos insumos do local de fabricação destes insumos até as usinas não foram levadas em consideração, devido à dificuldade de obtenção dessas informações.

Além da etapa agrícola e das etapas industriais, foram estimadas as emissões relativas ao transporte da matéria-prima principal (grãos de soja e cachos de frutos frescos de dendê) do local do plantio até a usina de extração de óleo, assumindo a existência de uma planta produtora de biodiesel integrada a ela (equação T1). Foi assumido que esse transporte é feito por meios rodoviários para as duas oleaginosas analisadas.

Para etapa de **consumo** do biodiesel, foram consideradas apenas as emissões de CO₂ da combustão do metanol presente no biodiesel, pois a emissão do restante do carbono queimado na forma de CO₂ no momento de uso do biocombustível é compensada pela absorção desse carbono pela planta durante o seu crescimento através da fotossíntese, conforme já mencionado.

Em nenhuma das etapas foram consideradas as emissões relacionadas à fabricação de máquinas e equipamentos, assim como não foram consideradas as emissões da construção das plantas industriais.

3.2.1. Emissões de GEE da produção dos principais insumos usados na lavoura

Para chegar a um valor estimado das emissões de GEE da **produção** dos principais insumos usados na lavoura, foi usado um fator de emissão da produção de cada insumo, em t CO₂e/t do insumo, e a quantidade, em t, de insumo usada por hectare, usando a equação A1. Os insumos considerados para cada lavoura foram cal, fertilizantes sintéticos nitrogenados, fertilizantes de fosfato e fertilizantes de potássio, diesel usado nas máquinas, herbicidas e inseticidas.

Equação A1: $E_{\text{prod-ins-agri}} = \sum(Q_{\text{Nsint},x} \times FE_{\text{pro-Nx}}) + \sum(Q_{\text{P2O5},y} \times FE_{\text{pro-P2O5},y}) + \sum(Q_{\text{K2O},z} \times FE_{\text{pro-K2O},z}) + Q_{\text{cal}} \times FE_{\text{prod-cal}} + Q_{\text{diesel-agri}} \times FE_{\text{prod-diesel}} + Q_{\text{herb}} \times FE_{\text{prod-herb}} + Q_{\text{ins}} \times FE_{\text{prod-ins}}$

Onde,

$E_{\text{prod-ins-agri}}$ = Emissões da produção dos principais insumos usados na lavoura, em t CO₂e/ha.

$Q_{\text{Nsint},x}$ = Quantidade de nitrogênio (N) aplicado na lavoura na forma de fertilizante sintético nitrogenado do tipo x , em t N/ha, onde x são os diferentes tipos aplicados de fertilizantes sintéticos nitrogenados.

$FE_{\text{pro-Nx}}$ = Fator de emissão da produção de N forma de fertilizante sintético nitrogenado do tipo x , em t CO₂e/t N, onde x são os diferentes tipos aplicados de fertilizantes sintéticos nitrogenados.

$Q_{\text{P2O5},y}$ = Quantidade de P₂O₅ aplicado na lavoura na forma de fertilizante sintético com fosfato do tipo y , em t P₂O₅/ha, onde y são os diferentes tipos aplicados de fertilizantes sintéticos com fosfato.

$FE_{\text{pro-P2O5},y}$ = Fator de emissão da produção de P₂O₅ na forma de fertilizante sintético com fosfato do tipo y , em t CO₂e/t P₂O₅, onde y são os diferentes tipos aplicados de fertilizantes sintéticos com fosfato.

$Q_{\text{K2O},z}$ = Quantidade de K₂O aplicado na lavoura na forma de fertilizante sintético com potássio do tipo z , em t K₂O/ha, onde z são os diferentes tipos aplicados de fertilizantes sintéticos com potássio.

$FE_{\text{pro-K}_2\text{O},z}$ = Fator de emissão da produção de K_2O na forma de fertilizante sintético com potássio do tipo z , em $t \text{ CO}_2e/t \text{ K}_2O$, onde z são os diferentes tipos aplicados de fertilizantes sintéticos com potássio.

Q_{cal} = Quantidade de cal aplicada na lavoura, em $t \text{ cal/ha}$.

$FE_{\text{prod-cal}}$ = Fator de emissão da produção de cal, em $t \text{ CO}_2e/t \text{ cal}$.

$Q_{\text{diesel-agri}}$ = Quantidade de diesel usada nas máquinas agrícolas, em $t \text{ diesel/ha}$.

$FE_{\text{prod-diesel}}$ = Fator de emissão da produção de diesel, em $t \text{ CO}_2e/t \text{ diesel}$.

Q_{herb} = Quantidade de herbicida aplicada na lavoura, em $t \text{ herbicida/ha}$.

$FE_{\text{prod-herb}}$ = Fator de emissão da produção de herbicida, em $t \text{ CO}_2e/t \text{ herbicida}$.

Q_{inse} = Quantidade de inseticida aplicada na lavoura, em $t \text{ inseticida/ha}$.

$FE_{\text{prod-inse}}$ = Fator de emissão da produção de inseticida, em $t \text{ CO}_2e/t \text{ inseticida}$.

3.2.2. Emissões de GEE da combustão de diesel mineral nas máquinas agrícolas

As emissões de GEE da combustão do diesel nas máquinas agrícolas foram estimadas através da equação A2. É importante observar que o diesel vendido atualmente no Brasil é um diesel B5, ou seja, 5% dele, na verdade, é biodiesel. Assumindo que as máquinas agrícolas também usam esse tipo de diesel, foi considerado que o fator de emissão de GEE da combustão do diesel só se aplica a 95% da quantidade total de diesel usada na etapa agrícola, enquanto que aos outros 5%, foi aplicado o fator de emissão de CO_2 da combustão do metanol, parcela não-renovável presente no biodiesel, considerando uma taxa de 11% de metanol na quantidade total de biodiesel (CASTRO *et al*, 2010b). Embora nem todo biodiesel produzido no Brasil seja metílico, a parcela feita com etanol é muito pequena e, portanto, foi considerado como se todo o biodiesel utilizado na mistura com o diesel fosse metílico.

Outra observação importante é que, embora a parcela do biodiesel presente no diesel esteja sendo considerada na contabilidade das emissões da combustão do diesel, ela não foi propositadamente considerada na contabilidade das emissões relacionadas com a produção do diesel, pois a avaliação das emissões da produção de biodiesel é justamente o objeto de estudo desse trabalho e o que se pretende obter como resultado final. Uma opção seria usar algum fator de emissão proposto por outro trabalho para o biodiesel de soja, já que 80% da produção brasileira de biodiesel utiliza essa matéria-prima. No entanto, como o valor é baixo, apenas 5% da quantidade total de diesel, essas emissões foram ignoradas e foi utilizado o fator de emissão da **produção** de diesel para 100% do diesel, como pode ser observado na seção anterior (3.2.1).

Equação A2: $E_{\text{comb-diesel-agri}} = (Q_{\text{diesel-agri}} \times 0,95 \times FE_{\text{comb-diesel-agri}}) + (Q_{\text{diesel}} \times 0,05 \times R_{\text{metanol}} \times FE_{\text{comb-metanol}})$

Onde,

$E_{\text{comb-diesel-agri}}$ = Emissões da combustão do diesel B0 nas máquinas agrícolas, em t CO₂e/ha.

$Q_{\text{diesel-agri}}$ = Quantidade de diesel usada nas máquinas agrícolas, em t diesel/ha.

$FE_{\text{comb-diesel-agri}}$ = Fator de emissão da combustão de diesel B0 nas máquinas agrícolas, em t CO₂e/t diesel.

R_{metanol} = Taxa de metanol presente no biodiesel, em t metanol/t biodiesel contido no diesel.

$FE_{\text{comb-metanol}}$ = Fator de emissão da combustão do metanol presente no biodiesel, em t CO₂e/t metanol.

3.2.3. Emissões de CO₂ da aplicação da cal ao solo

As emissões de CO₂ da aplicação de cal ao solo foram estimadas através da equação A3.

Equação A3: $E_{\text{calagem}} = Q_{\text{cal}} \times FE_{\text{calagem}}$

Onde,

E_{calagem} = Emissões da aplicação de cal ao solo, em t CO₂e/ha.

Q_{cal} = Quantidade de cal aplicada na lavoura, em t cal/ha.

FE_{calagem} = Fator de emissão da calagem, em t CO₂e/t cal.

3.2.4. Emissões da aplicação de fertilizantes nitrogenados sintéticos e orgânicos ao solo

As emissões da aplicação de fertilizantes nitrogenados sintéticos e orgânicos ao solo foram estimadas através da equação A4.

Equação A4: $E_{\text{fert-N}} = [(\sum Q_{\text{Nsint},x} + \sum Q_{\text{Norg},w}) \times FE_{\text{N}_2\text{O-N}} \times (44/28) \times 298] + (Q_{\text{uréia}} \times FE_{\text{CO}_2\text{aplic-uréia}})$

Onde,

$E_{\text{fert-N}}$ = Emissões da aplicação de fertilizantes nitrogenados, em t CO₂e/ha.

$Q_{\text{Nsint},x}$ = Quantidade de nitrogênio (N) aplicado na lavoura na forma de fertilizante sintético nitrogenado do tipo x , em t N/ha, onde x são os diferentes tipos aplicados de fertilizantes sintéticos nitrogenados.

$Q_{\text{Norg},w}$ = Quantidade de nitrogênio (N) aplicado na lavoura na forma de fertilizante orgânico do tipo w , em t N/ha, onde w são os diferentes tipos aplicados de fertilizantes orgânicos. O fertilizante orgânico utilizado pode estrume, esgoto ou partes de plantas. Neste item, a transformação da quantidade de fertilizante orgânico para a quantidade de N presente em cada tipo de fertilizante orgânico foi feita a partir da fração de N no peso de cada um.

$FE_{\text{N}_2\text{O-N}}$ = Fator de emissão de N₂O da aplicação de N na forma de fertilizante, em t N₂O-N/t N.

Q_{ureia} = Quantidade de ureia aplicada à lavoura, em t ureia/ha. Se a informação disponível estiver em quantidade de N na forma de ureia, converter para quantidade de ureia considerando que 46% da ureia é N. A ureia, se aplicada, também é contabilizada nas emissões de N_2O na primeira parte da equação.

$FE_{CO_2aplic-uréia}$ = Fator de emissão de CO_2 da aplicação de uréia, em t CO_2 / t de uréia.

A multiplicação por 44/28 e por 298 se referem à transformação das emissões de N em N_2O e à transformação das emissões de N_2O em CO_2 , respectivamente.

3.2.5. Emissões diretas de N_2O do manejo da lavoura

As emissões diretas de N_2O do manejo da lavoura são provenientes: do N contido em resíduos da lavoura (acima e abaixo do solo), da mineralização do N associada à perda de matéria orgânica resultante da mudança de uso do solo ou da mudança de práticas de manejo em plantios em solos minerais, e da drenagem ou manejo de solos orgânicos³⁰, se utilizados (UNFCCC, 2010). No entanto, esse estudo assume que as lavouras em questão não acontecem em solos orgânicos³¹ e que os sistemas agrícolas não modificaram suas formas de manejo, de forma que só a contribuição do N contido no resíduo da colheita foi incluída na estimativa, feita através da equação 5.

Equação A5: $E_{N_2Odir} = [(Q_{CR} + Q_{MOS}) \times FE_{N_2O-N}] \times (44/28) \times 298$

Onde,

E_{N_2Odir} = Emissões diretas de N_2O do manejo da lavoura, em t CO_2e /ha.

³⁰ Solos orgânicos são solos que se desenvolvem em áreas alagadas, sob condição de drenagem ruim, e possuem massa com, no mínimo, de 12 a 20% de matéria orgânica. Todos os outros solos são considerados minerais e contém geralmente pequena percentagem de matéria orgânica, ocorrendo sob condições de drenagem moderadas ou boas (IPCC, 2006).

³¹ De acordo com Alves (2010), a área de solos orgânicos no Brasil ainda é pouco caracterizada, havendo incertezas sobre a ocorrência desses solos no país. Eles concluem que é um solo pouco representativo para a área total do território brasileiro.

Q_{CR} = Quantidade de nitrogênio (N) nos resíduos da lavoura (acima e abaixo do solo) que retornam ao solo, incluindo lavouras que fixam N, em t N/ha.

Q_{MOS} = Quantidade de nitrogênio (N) que mineraliza em associação com a perda de carbono da matéria orgânica do solo, nos solos minerais, como resultado da mudança de uso do solo ou de práticas de manejo, em t N/ha. Como explicado acima, esse parâmetro foi considerado nulo.

FE_{N_2O-N} = Fator de emissão de N_2O da aplicação de N na forma de fertilizante, em t N_2O-N/t N.

O termo Q_{CR} foi obtido através da equação A5.1.

Equação A5.1: $Q_{CR} = Crop \times Frac_{renovada} \times [R_{AG} \times N_{AG} \times (1 - Frac_{removida}) + R_{BG} \times N_{BG}]$

Onde,

Q_{CR} = Quantidade de N nos resíduos da lavoura (acima e abaixo do solo) que retornam ao solo, em t N/ha.

Crop = Quantidade de matéria seca colhida, em t de matéria seca/ha.

$Frac_{renovada}$ = Fração da área de plantio que é renovada anualmente, adimensional.

R_{AG} = Razão entre matéria seca de resíduos acima do solo (AG_{DM}) e produção colhida, adimensional. Essa taxa é calculada dividindo a quantidade de resíduos de matéria seca acima do solo (AG_{DM}) por “Crop”, sendo AG_{DM} (t/ha) = Crop x slope + intercept (tabela 11.2 de KLEIN *et al*, 2006).

N_{AG} = Conteúdo de N nos resíduos acima do solo, em t de N/t de matéria seca.

$Frac_{removida}$ = Fração de resíduos removida, adimensional.

R_{BG} = Razão entre resíduos abaixo do solo e produção colhida, adimensional. Essa taxa pode ser calculada, caso não haja dado disponível sobre ela, pela equação $R_{BG} = R_{BG-bio} \times [AG_{DM} + Crop] / Crop$.

N_{BG} = Conteúdo de N nos resíduos abaixo do solo, em t de N/t de matéria seca.

3.2.6. Emissões indiretas de N₂O do manejo da lavoura

As emissões indiretas de N₂O do manejo da lavoura foram estimadas através da equação A6.

Equação A6: $E_{N_2O_{indir}} = (E_{N_2O_{volat}} + E_{N_2O_{lixiv}}) \times (44/28) \times 298$

Onde,

$E_{N_2O_{indir}}$ = Emissões indiretas de N₂O do manejo da lavoura, em t CO₂e/ha.

$E_{N_2O_{volat}}$ = Emissões indiretas de N₂O devido à deposição atmosférica de N volatilizado do solo, em t N₂O-N/ha.

$E_{N_2O_{lixiv}}$ = Emissões indiretas de N₂O devido à lixiviação resultante da aplicação de N ao solo, em t N₂O-N/ha.

A equação A6.1 calcula o termo $E_{N_2O_{volat}}$ e equação A6.2 calcula o termo $E_{N_2O_{lixiv}}$.

Equação A6.1: $E_{N_2O_{volat}} = (Q_{Nsint} \times Frac_{sint} + Q_{Norg} \times Frac_{org}) \times FE_{vol}$

Onde,

$E_{N_2O_{volat}}$ = Emissões indiretas de N₂O devido à deposição atmosférica de N volatilizado do solo, em t N₂O-N/ha.

Q_{Nsint} = Quantidade de N aplicado na lavoura na forma de fertilizante sintético nitrogenado, em t N aplicado/ha.

$Frac_{sint}$ = Fração de fertilizante sintético nitrogenado que volatiliza como NH₃ e NO_x, em t N volatilizado/t N aplicado.

Q_{Norg} = Quantidade de nitrogênio (N) aplicado na lavoura na forma de fertilizante orgânico, em t N/ha.

$Frac_{org}$ = Fração de N em fertilizante orgânico que volatiliza como NH₃ e NO_x, em t N volatilizado/t N aplicado.

FE_{vol} = Fator de emissão da deposição atmosférica de N em solos e corpos aquáticos, em $t\ N_2O-N/t\ N$ volatilizado.

Equação A6.2: $E_{N_2O_{lixiv}} = (Q_{Nsint} + Q_{Norg} + Q_{CR} + Q_{MOS}) \times Frac_{lixiv} \times FE_{lixiv}$

Onde,

$E_{N_2O_{lixiv}}$ = Emissões indiretas de N_2O devido à lixiviação resultante da aplicação de N ao solo, em $t\ N_2O-N/ha$.

Q_{Nsint} = Quantidade de N aplicado na lavoura na forma de fertilizante sintético nitrogenado, em $t\ N$ aplicado/ha.

Q_{Norg} = Quantidade de N aplicado na lavoura na forma de fertilizante orgânico, em $t\ N/ha$.

Q_{CR} = Quantidade de N nos resíduos da lavoura (acima e abaixo do solo) que retornam ao solo, incluindo lavouras que fixam N, em $t\ N/ha$.

Q_{MOS} = Quantidade de N que mineraliza em associação com a perda de carbono da matéria orgânica do solo, nos solos minerais, como resultado da mudança de uso do solo ou de práticas de manejo, em $t\ N/ha$.

$Frac_{lixiv}$ = Fração de todo N adicionado ao solo ou mineralizado no solo por causa do plantio que é perdido através da lixiviação, em $t\ N$ lixiviado/ $t\ N$ aplicado.

FE_{lixiv} = Fator de emissão da lixiviação de N, em $t\ N_2O-N/t\ N$ lixiviado.

3.2.7. Emissões do transporte entre as etapas agrícola e industrial

As emissões do transporte entre a etapa agrícola e a etapa industrial (extração de óleo e produção de biodiesel) são estimadas a partir da equação T1, considerando a quantidade de diesel consumida por caminhões para transportar, do local do plantio até a usina de extração de óleo e produção de biodiesel, a quantidade de matéria-prima (grãos de soja ou cachos de frutos frescos) necessária para se produzir uma tonelada de biodiesel,

incluindo a viagem de volta. Assim como com o diesel utilizado na etapa agrícola, o biodiesel presente no diesel só foi considerado na parte do cálculo das emissões da combustão do diesel e não na parte de emissões da produção desse combustível fóssil. A combustão do biodiesel está relacionada somente com a porcentagem de metanol presente nele, que é de 0,110 t de metanol/ t de biodiesel.

Equação T1: $E_{\text{transp-agri} \rightarrow \text{ind}} = (Q_{\text{diesel_transp}} \times FE_{\text{prod-diesel}}) + (Q_{\text{diesel_transp}} \times 0,095 \times FE_{\text{comb-diesel-transp}} + Q_{\text{diesel_transp}} \times 0,005 \times R_{\text{metanol}} \times FE_{\text{comb-metanol}})$

Onde,

$E_{\text{transp-agri} \rightarrow \text{ind}}$ = Emissões do transporte entre a etapa agrícola e a etapa industrial, em t CO₂e/t de biodiesel produzido.

$Q_{\text{diesel_transp}}$ = Quantidade de diesel consumida no transporte rodoviário da matéria-prima entre a etapa agrícola e a etapa industrial, incluindo a viagem de volta, em t de diesel/ t de biodiesel produzido.

$FE_{\text{prod-diesel}}$ = Fator de emissão da produção de diesel, em t CO₂e/t diesel.

$FE_{\text{comb-diesel-transp}}$ = Fator de emissão da combustão do diesel B0 em transportes rodoviários, em t CO₂e/t de diesel.

R_{metanol} = Taxa de metanol presente no biodiesel, em t metanol/t biodiesel contido no diesel.

$FE_{\text{comb-metanol}}$ = Fator de emissão da combustão do metanol presente no biodiesel, em t CO₂e/t metanol.

3.2.8. Emissões de GEE da etapa de extração do óleo vegetal

As emissões da etapa de extração de óleo vegetal foram calculadas através da soma das emissões estimadas através das equações I1 e I2.

Assim como feito para a etapa agrícola, para chegar a um valor estimado das emissões de GEE da produção dos principais insumos usados na etapa de extração de óleo ($E_{\text{prod-ins-oleo}}$) foi usado um fator de emissão da produção de cada insumo, em t CO₂e/t do insumo, e a quantidade, em t³², de insumo por tonelada de biodiesel a ser produzido, usando a equação 11. Os insumos considerados para essa etapa foram: diesel para geração *in situ* de eletricidade e vapor, solvente (hexano) e eletricidade da rede.

Equação 11: $E_{\text{prod-ins-oleo}} = (Q_{\text{diesel-óleo}} \times FE_{\text{pro-diesel}}) + (Q_{\text{hexano}} \times FE_{\text{pro-hexano}}) + (Q_{\text{eletric-grid-oleo}} \times FE_{\text{pro-eletric-grid}})$

Onde,

$E_{\text{prod-ins-oleo}}$ = Emissões da produção dos principais insumos usados na etapa de extração de óleo, em t CO₂e/t biodiesel produzido.

$Q_{\text{diesel-oleo}}$ = Quantidade de diesel queimado em boilers ou caldeiras para geração *in situ* de eletricidade e/ou vapor usados em processos na usina de extração de óleo vegetal, em t diesel/t biodiesel produzido.

$FE_{\text{pro-diesel}}$ = Fator de emissão da produção de diesel, em t CO₂e/t diesel.

Q_{hexano} = Quantidade de hexano utilizado como solvente no processo de extração de óleo vegetal, em t de hexano/t biodiesel produzido.

$FE_{\text{pro-hexano}}$ = Fator de emissão da produção de hexano, em t CO₂e/t de hexano.

$Q_{\text{eletric-grid-oleo}}$ = Quantidade de eletricidade da rede brasileira utilizada em processos na usina de extração de óleo vegetal, em kWh/t biodiesel produzido.

$FE_{\text{pro-eletric-grid}}$ = Fator de emissão da produção de eletricidade da rede brasileira, em t CO₂e/ kWh.

Assim como na etapa agrícola, as emissões da produção de diesel não diferenciaram a parcela relativa ao biodiesel, no entanto, a parcela de biodiesel no diesel foi considerada para estimar as emissões da combustão do diesel em caldeiras para geração *in situ* de

³² Ou kWh, no caso da eletricidade da rede.

vapor e eletricidade para os processos da etapa de extração de óleo ($E_{\text{comb-diesel-óleo}}$), como mostra a equação I2.

Equação I2: $E_{\text{comb-diesel-óleo}} = (Q_{\text{diesel-óleo}} \times 0,95 \times FE_{\text{comb-diesel-caldeira}}) + (Q_{\text{diesel-óleo}} \times 0,05 \times R_{\text{metanol}} \times FE_{\text{comb-metanol}})$

Onde,

$E_{\text{comb-diesel-óleo}}$ = Emissões da combustão de diesel em boilers ou caldeiras na etapa de extração de óleo, em t CO₂e/t biodiesel produzido.

$Q_{\text{diesel-óleo}}$ = Quantidade de diesel queimado em boilers ou caldeiras para geração *in situ* de eletricidade e/ou vapor usados em processos na usina de extração de óleo vegetal, em t diesel/t biodiesel produzido.

$FE_{\text{comb-diesel-caldeira}}$ = Fator de emissão da combustão de diesel B0 em caldeiras ou boilers, em t CO₂e/t diesel.

R_{metanol} = Taxa de metanol presente no biodiesel, em t metanol/t biodiesel contido no diesel.

$FE_{\text{comb-metanol}}$ = Fator de emissão da combustão do metanol presente no biodiesel, em t CO₂e/t metanol.

3.2.9. Emissões da etapa de produção de biodiesel

As emissões da etapa de produção de biodiesel a partir do óleo vegetal foram calculadas através da soma das emissões estimadas pelas equações I3 e I4.

Assim como feito para as etapas agrícola e de extração de óleo vegetal, para chegar a um valor estimado das emissões de GEE da produção dos principais insumos usados na etapa de produção de biodiesel, foi usado um fator de emissão da produção de cada insumo, em t CO₂e/t do insumo, e a quantidade, em t³³, de insumo usada por tonelada de

³³ Ou kWh, no caso da eletricidade da rede.

biodiesel a ser produzida, usando a equação I3. Os insumos considerados para essa etapa foram: combustível para geração de eletricidade e vapor, metanol, catalisador e eletricidade da rede.

Equação I3: $E_{\text{prod-ins-bio}} = (Q_{\text{diesel-bio}} \times FE_{\text{pro-diesel}}) + (Q_{\text{metanol}} \times FE_{\text{pro-metanol}}) + (Q_{\text{catalisador}} \times FE_{\text{catalisador}}) + (Q_{\text{eletric-grid-bio}} \times FE_{\text{pro-eletric-grid}})$

Onde,

$E_{\text{prod-ins-bio}}$ = Emissões da produção dos principais insumos usados na etapa de produção do biodiesel, em t CO₂e/t biodiesel produzido.

$Q_{\text{diesel-bio}}$ = Quantidade de diesel queimado em boilers ou caldeiras para geração de eletricidade e/ou vapor usados em processos na usina de produção do biodiesel, em t diesel/t biodiesel produzido.

$FE_{\text{pro-diesel}}$ = Fator de emissão da produção de diesel, em t CO₂e/t diesel.

Q_{metanol} = Quantidade de metanol utilizado no processo de transesterificação, em t de metanol/t biodiesel produzido.

$FE_{\text{pro-metanol}}$ = Fator de emissão da produção de metanol, em t CO₂e/t de metanol.

$Q_{\text{catalisador}}$ = Quantidade de catalisador utilizado no processo de transesterificação, em t de catalisador/t biodiesel produzido.

$FE_{\text{pro-catalisador}}$ = Fator de emissão da produção de catalisador, em t CO₂e/t de catalisador.

$Q_{\text{eletric-grid-bio}}$ = Quantidade de eletricidade da rede brasileira utilizada em processos na usina de produção do biodiesel, em kWh/t biodiesel produzido.

$FE_{\text{pro-eletric-grid}}$ = Fator de emissão da produção de eletricidade da rede brasileira, em t CO₂e/ kWh.

Assim como nas etapas agrícola e de extração de óleo vegetal, as emissões da produção de diesel não diferenciaram a parcela relativa ao biodiesel, no entanto, a parcela de

biodiesel no diesel foi considerada para estimar as emissões da combustão do diesel em caldeiras para geração *in situ* de vapor e eletricidade para os processos dessa etapa ($E_{\text{comb-diesel-bio}}$), como mostra a equação I4.

Equação I4: $E_{\text{comb-diesel-bio}} = (Q_{\text{diesel-bio}} \times 0,095 \times FE_{\text{comb-diesel-caldeira}}) + (Q_{\text{diesel-bio}} \times 0,005 \times R_{\text{metanol}} \times FE_{\text{comb-metanol}})$

Onde,

$E_{\text{comb-diesel-bio}}$ = Emissões da combustão de diesel em boilers ou caldeiras na etapa de produção de biodiesel, em t CO₂e/t biodiesel produzido.

$Q_{\text{diesel-óleo}}$ = Quantidade de diesel queimado em boilers ou caldeiras para geração *in situ* de eletricidade e/ou vapor usados em processos na usina de produção de biodiesel, em t diesel/t biodiesel produzido.

$FE_{\text{comb-diesel-caldeira}}$ = Fator de emissão da combustão de diesel B0 em caldeiras ou boilers, em t CO₂e/t diesel.

R_{metanol} = Taxa de metanol presente no biodiesel, em t metanol/t biodiesel contido no diesel.

$FE_{\text{comb-metanol}}$ = Fator de emissão da combustão do metanol presente no biodiesel, em t CO₂e/t metanol.

3.2.10. Emissões de GEE do consumo do biodiesel

As emissões de GEE do consumo de biodiesel são referentes à combustão do metanol contido no biocombustível durante sua queima em motores móveis ou estacionários. Elas são estimadas nesse estudo para uma tonelada de biodiesel, a partir da quantidade de metanol presente, em t metanol/t biodiesel, e do fator de emissão da combustão do metanol, em t CO₂e/t de metanol, como mostra a equação C.

Equação C: $E_{\text{biodiesel}} = R_{\text{metanol}} \times FE_{\text{comb-metanol}}$

Onde,

$E_{\text{biodiesel}}$ = Emissões da combustão de uma tonelada de biodiesel, em t CO₂e/t biodiesel consumido.

R_{metanol} = Taxa de metanol presente em uma tonelada de biodiesel, em t metanol/t biodiesel.

$FE_{\text{comb-metanol}}$ = Fator de emissão da combustão do metanol, em t CO₂e/t metanol.

4. BALANÇO DE EMISSÕES DO BIODIESEL PRODUZIDO A PARTIR DE SOJA E DENDÊ

4.1. Alguns Fatores de Emissão Utilizados

4.1.1. Fator de emissão da produção de diesel B0

Tanto Marzullo (2007) como Viana (2008) realizaram um inventário de ciclo de vida (ICV) para o diesel produzido no Brasil, incluindo, entre muitos outros parâmetros analisados, as saídas na forma de emissões atmosféricas referentes a todo processo de fabricação, desde a extração do petróleo até o refino para obtenção do diesel, e levando em consideração as perdas no processo e a importação de parte do petróleo refinado. Esses ICV foram realizados através de consulta a bases de dados de softwares como GABI 4 e SimaPro. Como ambos os estudos usaram como base o mesmo raciocínio apresentado em Vianna (2006) e as mesmas bases de dados, os resultados encontrados foram os mesmos, inclusive ambos utilizaram como critério de alocação entre os produtos do refino os valores energéticos de cada um, sendo de 39,06% o fator de alocação calculado para o diesel. Embora seja de conhecimento da autora que esses inventários necessitam de atualização visto que os dados utilizados datam do período entre 2004 e 2006, foge do escopo desse trabalho realizar tal atualização e, portanto, esses valores serão utilizados para o cálculo de um único fator, em CO₂ equivalente. Esses ICV apresentaram muitos tipos de emissões atmosféricas, no entanto, apenas as emissões de N₂O, CH₄ e CO₂ estão sendo consideradas neste trabalho, como mostra a Tabela 15.

Tabela 15 - Emissões de gases de efeito estufa do processo de produção do diesel no Brasil.

GEE	Emissões (kg do GEE/t diesel)	PAG do GEE	Emissões (kg CO ₂ e/t diesel)
CO ₂	251,0000	1	251,000
CH ₄	2,7500	25	68,750
N ₂ O	0,0013	298	0,387
TOTAL	-	-	320,137

Fonte: Elaboração própria a partir de Marzullo (2007) e Viana (2008).

Considerando o poder calorífico inferior (PCI) do diesel puro igual a 10.100 kcal/kg de diesel³⁴ (EPE, 2011a), o fator de emissão encontrado na Tabela 15 pode ser calculado em kgCO₂e/GJ de diesel para efeito de comparação. O resultado encontrado, 7,44 kgCO₂e/GJ, é bastante inferior a outros valores apresentados ou utilizados na literatura internacional. A Tabela 16 apresenta alguns desses valores. No entanto, não foi possível acessar o detalhamento dos cálculos dos valores apresentados por Thansiroj e Murphy (2009). No caso do valor apresentado por CONCAWE/ EUCAR/ JRC (2011), ele engloba a etapa de distribuição, enquanto o calculado partir de Marzullo (2007) e Viana (2008) não inclui distribuição. Além disso, ele foi calculado para a Europa, onde a maior parte do petróleo é importada e os fatores de emissão da eletricidade são superiores ao do Brasil.

Tabela 16 - Fatores de emissão de GEE da produção de diesel utilizados na literatura, em kg CO₂e/GJ diesel.

Fonte Bibliográfica	Emissões (kg CO ₂ e/GJ diesel)
CONCAWE/ EUCAR/ JRC (2011)	15,9
Thansiroj e Murphy (2009)	10,2

Fonte: Elaboração própria com base nas referências bibliográficas citadas.

A metodologia ACM0017 da UNFCCC (UNFCCC, 2010) apresenta como fatores *default* mundiais para extração de petróleo e para o refino valores de 73 e 233 kgCO₂e/t diesel, respectivamente, cuja soma – 306 kgCO₂e/t diesel - se aproxima do valor de 320,137 kgCO₂e/t diesel calculado acima. Isto faz o último parecer razoável, pois também inclui o transporte de petróleo importado³⁵ e o transporte da etapa de extração e processamento até a etapa de refino. Em CONCAWE/ EUCAR/ JRC (2011), somente as etapas de extração, processamento e refino representaram juntas mais de 87% das emissões de GEE em CO₂e.

Optou-se pela utilização do valor 0,320 t CO₂e/t diesel como fator de emissão referente ao processo de produção do diesel mineral.

³⁴ Corresponde a 42,3 GJ/t de diesel.

³⁵ 22,28% do petróleo refinado no Brasil em 2005, ano-base para os cálculos apresentados por Marzullo (2007) e Viana (2008), foram importados.

4.1.2. Fator de Emissão da Combustão de Diesel B0 em Máquinas Agrícolas Móveis

A Tabela 17 mostra valores apresentados em duas referências bibliográficas analisadas, em kg do GEE emitido para cada GJ de diesel. A Tabela 18 mostra valores baseados nas mesmas referências da tabela anterior convertidos em kg do GEE emitido para cada tonelada de diesel, usando o PCI.

Tabela 17 - Emissões de GEE do uso de diesel em máquinas agrícolas móveis, em kg do GEE/GJ de diesel.

Fonte Bibliográfica	Emissões (kg do GEE/GJ diesel)			Emissões (kg CO ₂ e/GJ diesel)
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	
Waldron <i>et al</i> (2006)	74,10	0,00415	0,0286	82,726
Sheehan <i>et al</i> (1998)	75,50	0,00420	0,0019	76,171

Fonte: Elaboração própria a partir das referências bibliográficas citadas.

Tabela 18 - Emissões de gases de efeito estufa do uso de diesel em máquinas agrícolas móveis, em kg do GEE/t de diesel.

Fonte Bibliográfica	Emissões (kg do GEE/t diesel)			Emissões (kg CO ₂ e/t diesel)
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	
Waldron <i>et al</i> (2006)	3.133,443	0,175	1,209	3.498,100
Sheehan <i>et al</i> (1998)	3.192,644	0,178	0,080	3.220,934

Fonte: Elaboração própria a partir das referências bibliográficas citadas.

A primeira referência, Waldron *et al* (2006), faz parte do guia do IPCC para elaboração de inventários de emissões. Embora esses pesquisadores considerem que, no fator de 74,10 kg de CO₂/GJ de diesel, todo carbono contido no combustível vira CO₂, e, portanto, se considera uma queima completa, o que não acontece, essa referência vai ser usada nesse estudo por ser mais recente e por considerar uma maior emissão de N₂O, além de ser o fator *default* para uso em inventários na falta de fatores específicos para o país. Portanto, o fator de emissão da combustão de diesel em máquinas agrícolas móveis usado foi 3,498 t CO₂e/t diesel.

4.1.3. Fator de Emissão da Combustão de Diesel B0 em Meios de Transporte Rodoviários

A Tabela 19 mostra valores apresentados nas bibliografias analisadas, em kg do GEE emitido para cada GJ de diesel. A Tabela 20 mostra valores baseados nas mesmas referências da tabela anterior, só que transformados em kg do GEE emitido para cada t de diesel usando o PCI, e acrescenta valores apresentados por outros estudos.

Tabela 19- Emissões (kg do GEE/GJ de diesel) do uso de diesel em meios de transporte rodoviários.

Fonte Bibliográfica		Emissões (kg do GEE/GJ diesel)			Emissões (kg CO ₂ e/GJ diesel)
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O	
Waldron <i>et al</i> (2006)		74,1000	0,0039	0,0039	75,360
CONCAWE/ EUCAR/ JRC (2011)		73,2500	n.a.	n.a.	-
Mendonça (2007)		-	-	-	74,397
Ferreira <i>et al</i> (2010a)*	automóveis	74,1000	0,0082	0,0006	74,484
	caminhões	74,1000	0,0064	0,0006	74,439
	ônibus	74,1000	0,0061	0,0006	74,431

* Referente ao ano de 2005.

Fonte: Elaboração própria a partir das referências bibliográficas citadas.

Tabela 20 – Emissões (kg do GEE/t de diesel) do uso de diesel em meios de transporte rodoviários.

Fonte Bibliográfica		Emissões (kg do GEE/t diesel)			Emissões (kg CO ₂ e/t diesel)
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O	
Waldron <i>et al</i> (2006)		3.133,443	0,1650	0,1650	3.186,738
CONCAWE/ EUCAR/ JRC (2011)		3.097,499	n.a.	n.a.	-
Mendonça (2007)		-	-	-	3.146,000
Ferreira <i>et al</i> (2010a)*	automóveis	3.133,443	0,3468	0,0254	3.149,682
	caminhões	3.133,443	0,2706	0,0254	3.147,777
	ônibus	3.133,443	0,2579	0,0254	3.147,460
MMA (2011)**		3.179,800	-	-	-
Viana (2008)**		3.128,100	0,107	0,743	3.352,189
Vianna (2006)**		3.235,000	2,190	0,083	3.314,484

* Referente ao ano de 2005.

**Calculado pela autora com dados dessa referência.

Fonte: Elaboração própria a partir das referências bibliográficas citadas.

O relatório de referência do Segundo Inventário de Emissões Antrópicas de GEE do Brasil (FERREIRA *et al*, 2010a) utiliza o mesmo fator de emissão de CO₂ do IPCC (WALDRON *et al*, 2006), porém apresenta fatores diferentes para outros gases e para cada tipo de veículo rodoviário movido à diesel, separação esta não feita pelos outros estudos. No entanto, os próprios autores alegam que foram empregados dados médios por falta de dados detalhados, mas que variáveis como diferenciação de tecnologia de consumo do combustível e condições de manutenção dos equipamentos deveriam ser levadas em consideração. Já o estudo publicado pelo MMA (2011) não mostra o fator de emissão usado para o CH₄ e N₂O, somente para outros gases poluentes e para o CO₂, que foi de 2,671 kg CO₂ por litro de diesel. Transformando em kg CO₂/t de diesel (Tabela 20) e usando os fatores do IPCC (WALDRON *et al*, 2006) para o CH₄ e N₂O, se obtém um fator de 3.233,057 kgCO₂e/t de diesel, enquanto que, se for usado os fatores do Inventário Brasileiro (FERREIRA *et al*, 2010a) para o CH₄ e N₂O para o caminhão, se obtém um fator de 3.194,096 kg CO₂e/t de diesel, ambos superiores a todos os outros apresentados. Optou-se pelo uso deste último valor (3,194 t CO₂e/t de diesel) no presente trabalho como fator de emissão do transporte de cargas por caminhões.

4.1.4. Fator de Emissão da Combustão de Diesel B0 em Máquinas Térmicas Estacionárias

A Tabela 21 mostra valores apresentados na bibliografia analisada, em kg do GEE emitido para cada GJ de diesel. A Tabela 22 mostra valores baseados nas mesmas referências da tabela anterior, só que transformados em kg do GEE emitido para cada t de diesel usando o PCI, e acrescenta valor apresentado por outro estudo.

Tabela 21 - Emissões (kg do GEE/t de diesel) do uso de diesel em máquinas térmicas estacionárias.

Fonte Bibliográfica		Emissões (kg do GEE/GJ diesel)			Emissões (kg CO ₂ e/GJ diesel)
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O	
Gómez <i>et al</i> (2006)		74,100	0,003000	0,00060	74,354
Sheehan <i>et al</i> (1998) – boiler industrial		76,200	0,000083	0,00037	76,312
Ferreira <i>et al</i> (2010b)*	caldeiras	74,100	0,000900	0,00040	74,242
	fornos	74,100	0,001000	0,00060	74,304

*Referente ao ano de 2005.

Fonte: Elaboração própria a partir das referências bibliográficas citadas.

Tabela 22 - Emissões (kg do GEE/t de diesel) do uso de diesel em máquinas térmicas estacionárias.

Fonte Bibliográfica		Emissões (kg do GEE/t diesel)			Emissões (kg CO ₂ e/t diesel)
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O	
Gómez <i>et al</i> (2006)		3.133,443	0,12700	0,02500	3.144,068
Sheehan <i>et al</i> (1998) – boiler industrial		3.222,245	0,00351	0,01566	3.226,999
Ferreira <i>et al</i> (2010b)*	caldeiras	3.133,443	0,03806	0,01691	3.139,334
	fornos	3.133,443	0,04229	0,02540	3.142,069
Vianna (2006)**		3.389,640	0,00000	6,49800	5.326,044

* Referente ao ano de 2005.

**Calculado pela autora com dados dessa referência

Fonte: Elaboração própria a partir das referências bibliográficas citadas.

Com exceção do valor de Vianna (2006), todos os outros são bastante similares e, portanto, optou-se pelo uso do fator default do IPCC (GÓMEZ *et al*, 2006), de 3,144 t de CO₂e/t de diesel para a queima de diesel em máquinas térmicas estacionárias.

4.1.5. Fatores de Emissão da Produção e da Aplicação de Cal nas Lavouras

A calagem é feita para reduzir a acidez do solo de forma a permitir uma maior produtividade da lavoura em questão, mas é uma fonte direta de emissão de CO₂, pois a cal transfere carbono da crosta terrestre para a atmosfera ao remover carbonatos de cálcio da rocha calcária e depósitos de dolomita e aplicá-los aos solos, onde se transformam em CO₂. São duas as formas de calagem: a adição de carbonato de cálcio (CaCO₃) ou de dolomita (CaMg(CO₃)₂). A quantidade a ser aplicada dessas substâncias

está relacionada a características específicas de cada solo e ao que vai ser plantado nele. Na falta de dados sobre o quanto é usado de cada tipo de cal em cada cultura, e para facilitar a comparação, é assumido que toda a cal aplicada se origina da dolomita. O fator de emissão referente à produção de cal usada para correção da acidez do solo adotado neste estudo é o mesmo utilizado por Macedo *et al* (2008), de 0,01 t CO₂e por tonelada de cal. O fator de emissão referente à aplicação de cal para correção da acidez do solo adotado neste estudo é o fator *default* do IPCC (KLEIN *et al*, 2006) para cal dolomítica, de 0,4767 t CO₂e/t de cal dolomítica.

4.1.6. Fatores de Emissão da Produção de Pesticidas

São inúmeros os tipos de pesticidas existentes na forma de herbicidas, inseticidas e fungicidas. Alguns são específicos para certos tipos de pragas e outros são mais generalistas. Mesmo para um mesmo tipo de cultura, a marca de pesticida usada varia muito de produtor para produtor. Portanto, embora existam alguns trabalhos que apresentam fatores de emissões para tipos específicos de pesticidas, esse estudo utilizou um fator único de 25 t CO₂e para cada tonelada de qualquer herbicida, e 29 t CO₂e para cada tonelada de qualquer inseticida, retirados de Macedo *et al* (2008). Os fungicidas, por serem aplicados em quantidades ainda menores, foram desconsiderados.

4.1.7. Fatores de Emissão da Produção de Fertilizantes Nitrogenados

Existem vários tipos de fertilizantes cujo composto principal a ser adicionado ao solo é o nitrogênio. Os principais são a ureia, a amônia, o nitrato de amônia, o sulfato de amônia, o nitrato de cálcio, o mono-amônio-fosfato (MAP) e o di-amônio-fosfato (DAP), que também contêm fosfato, outro macronutriente necessário para as plantas. A maior parte dos estudos apresenta o fator de emissão em relação à tonelada de N produzida, mesmo alguns que especificam o tipo de fertilizante nitrogenado usado. A Tabela 23 apresenta alguns dos fatores encontrados na literatura.

Tabela 23 - Emissões de GEE da produção de fertilizantes nitrogenados, em kg do GEE/t de N.

Fonte Bibliográfica	Tipo de fertilizante	Emissões (kg CO ₂ e/t N)
UNFCCC (2010)	Ureia	1.700,0
	Nitrato de Amônia	7.100,0
	Fosfato de Amônia (MAP ou DAP)	2.700,0
	Sulfato de Amônia	2.000,0
	Nitrato de Cálcio	11.700,0
SNYDER <i>et al</i> (2009)	Nitrato de Amônia	9.700,0
	Amônia	2.600,0
	Uréia	3.200,0
Macedo <i>et al</i> (2008)	Não especificado	3.970,0
Souza <i>et al</i> (2010)	Não especificado	3.260,0
Marzullo (2007) e Viana (2008)*	Uréia	2.271,0

*Calculado pela autora com dados dessa referência.

Fonte: Elaboração própria a partir das referências bibliográficas citadas.

Este estudo utilizou o valor de 3,97 t CO₂e/t N, adotado por Macedo *et al* (2008) como fator de emissão da produção de fertilizante nitrogenado, uma vez que a maior parte dos dados de quantidade adicionada de N não especifica o tipo. A ureia, além de às vezes fazer parte da composição de fórmulas NPK, é comumente utilizada como adubação de cobertura em diversos cultivos, inclusive do dendê, e por isso também foi utilizada nas estimativas. O fator de emissão para a ureia adotado foi de 2,271 t CO₂e/t N, o mesmo adotado por Marzullo (2007) e Viana (2008), com base em Silva, Ribeiro e Kulay (2006 *apud* MARZULLO 2007 e *apud* VIANA, 2008).

4.1.8. Fatores de Emissão da Produção de Fertilizantes com Fósforo

Existem vários tipos de fertilizantes cujo composto principal a ser adicionado ao solo é o fósforo. Os principais são o superfosfato simples, o superfosfato triplo, o mono-amônio-fosfato (MAP) e o di-amônio-fosfato (DAP). A maior parte dos estudos apresenta o fator de emissão em relação à tonelada de P₂O₅ (fosfato) produzida, mesmo alguns que especificam o tipo de fertilizante de fosfato usado. A Tabela 24 apresenta alguns dos fatores encontrados na literatura.

Tabela 24 - Emissões de GEE da produção de fertilizantes de fosfato, em kg do GEE/t de P₂O₅.

Fonte Bibliográfica	Tipo de fertilizante	Emissões (kg CO ₂ e/t P ₂ O ₅)
UNFCCC (2010)	Superfosfato simples	200,0
	Superfosfato triplo	500,0
	Fosfato de Amônia (MAP ou DAP)	300,0
SNYDER <i>et al</i> (2009)	Não especificado	1.000,0
Macedo <i>et al</i> (2008)	Não especificado	1.300,0
Marzullo (2007) e Viana (2008)*	Superfosfato simples	210,0

*Calculado pela autora com dados dessa referência.

Fonte: Elaboração própria a partir das referências bibliográficas citadas.

Os valores apresentados pela literatura consultada são bastante diferentes entre si. Marzullo (2007) e Viana (2008), com base em Silva, Ribeiro e Kulay (2006 *apud* MARZULLO 2007 e *apud* VIANA, 2008), adotaram o fator de 0,21 t CO₂e/t P₂O₅ para o superfosfato simples. Esse valor se aproxima do valor *default* da UNFCCC, e é bastante inferior aos valores adotados por Macedo *et al* (2008) e Snyder *et al* (2009). Como a maioria dos dados encontrados não especifica o tipo de fertilizante utilizado para a adição de P₂O₅, optou-se pela utilização de uma média entre os três valores *default* da UNFCCC (2010), o que resulta em 0,333 t CO₂e/t P₂O₅.

4.1.9. Fatores de Emissão da Produção de Fertilizantes com Potássio

Existem vários tipos de fertilizantes cujo composto principal a ser adicionado ao solo é o potássio. Os principais são o cloreto de potássio (KCl) e o sulfato de potássio (K₂SO₄). A maior parte dos estudos apresenta o fator de emissão em relação à tonelada de K₂O (óxido de potássio) produzida, mesmo alguns que especificam o tipo de fertilizante potássico usado. A Tabela 25 apresenta alguns dos fatores encontrados na literatura.

Tabela 25 - Emissões de gases de efeito estufa da produção de fertilizantes de potássio, em kg do GEE/t de K₂O.

Fonte Bibliográfica	Tipo de fertilizante	Emissões (kg CO ₂ e/t K ₂ O)
UNFCCC (2010)	KCl	400,0
	K ₂ SO ₄	300,0
Macedo <i>et al</i> (2008) e SNYDER <i>et al</i> (2009)	Não especificado	710,0
Marzullo (2007) e a Viana (2008)*	KCl	947,0

*Calculado pela autora com dados dessa referência.

Fonte: Elaboração própria a partir das referências bibliográficas citadas.

Foi assumido que todo o K₂O utilizado em todas as culturas seja de fertilizantes do tipo KCl, pois foi o mais citado na literatura analisada. Optou-se pelo uso do fator de emissão da produção de KCl de 0,4 t CO₂e/t K₂O, que é o fator *default* da UNFCCC (2010).

4.1.10. Fatores de Emissão da Geração de Eletricidade da Rede no Brasil

Embora a maior parte da energia elétrica produzida no Brasil seja gerada a partir de fontes renováveis, uma parcela é produzida por termelétricas a partir de combustíveis fósseis e por usinas nucleares. Essa parcela varia de mês a mês, ano a ano, dependendo das condições climáticas que influenciam as fontes renováveis, principalmente a hidroeletricidade, e torna necessário maior ou menor geração a partir de combustíveis fósseis. Considerando todas as fontes, o Ministério da Ciência e Tecnologia divulga fatores médios de emissão de GEE da eletricidade gerada no Sistema Interligado Nacional a cada mês, e uma média anual, para uso em inventários de emissões. Esses fatores estão apresentados na Tabela 26 para os últimos anos, em t de CO₂/MWh.

Tabela 26 - Emissões de CO₂ da geração de eletricidade no Brasil, em t CO₂/MWh.

Fator de Emissão da Produção de Eletricidade	
Fator Médio Anual (tCO ₂ /MWh)	
2006	0,0323
2007	0,0293
2008	0,0484
2009	0,0246
2010	0,0512
2011	0,0292
Média	0,0358

Fonte: Elaboração própria a partir de MCT (2012).

O fator de emissão adotado por este estudo para a geração de eletricidade foi a média dos valores dos últimos anos. Visto que, na maior parte da bibliografia consultada, a unidade utilizada para a quantidade de eletricidade da rede é o kWh, portanto, utilizou-se o fator de 0,0358 kg de CO₂/kWh.

4.1.11. Fator de Emissão da Produção de Hexano

O hexano é o solvente comumente utilizado para extração de óleo vegetal no Brasil, nos casos em que se usa solvente, como na produção do óleo de soja. Já para o óleo de dendê, a extração é feita apenas por prensagem, não necessitando do uso de solvente. O hexano é uma fração leve resultante do refino do petróleo.

Marzullo (2007) apresentou um inventário da produção de hexano publicado por Bousted (1996 *apud* MARZULLO, 2007), contendo as emissões de CO₂, N₂O e CH₄ do processo, entre outras. Aplicando o potencial de aquecimento global (PAG), obteve-se o valor de 1,059 t de CO₂e/t de hexano.

4.1.12. Fatores de Emissão da Produção e da Combustão de Metanol

O fator de emissão relativo à produção do metanol usado no processo de transesterificação do óleo vegetal para a produção de biodiesel adotado neste estudo é o

fator *default* da UNFCCC (2010), de 1,95 t de CO₂e/t de metanol. Não foram encontrados na literatura analisada fatores específicos para a produção de metanol no Brasil.

A UNFCCC (2010) apresenta fórmula para o cálculo das emissões relativas à combustão do metanol presente no biodiesel, baseando-se no conteúdo de carbono da molécula desse composto através do peso molecular. A partir dessa fórmula, pode ser obtido o fator de emissão de 1,375 t de CO₂/t de metanol queimado, fator este utilizado no presente estudo.

4.1.13. Fator de Emissão da Produção de Catalisador

Como a quantidade de catalisador utilizada é pequena se comparada a outros insumos do processo de transesterificação, muitos estudos não incluem esse parâmetro no sistema. Portanto, o único valor encontrado dentre a bibliografia analisada foi de 1,2 t CO₂e/t de NaOH produzida (SOUZA *et al*, 2010). Esse valor foi utilizado e estendido ao KOH, também bastante utilizado para esse fim no Brasil.

4.2. Considerações Gerais

Este estudo não se baseou em dados primários, e sim em dados secundários, obtidos na bibliografia.

Informações em relação à quantidade de óleo vegetal e de metanol necessárias para produção de uma tonelada de biodiesel metílico não são homogêneas. Entre a literatura analisada, esses valores variaram de 993 a 1.028 kg para o óleo vegetal, e de 97 a 110 kg para o metanol. A produção de glicerol após o processo de transesterificação também variou entre 89 e 122 kg para uma tonelada de biodiesel produzida, no entanto, muitas referências não especificaram se tratava-se de glicerol bruto ou purificado. Este estudo assumiu a relação estabelecida por Castro *et al* (2010b), de que são necessários 993,3 kg de óleo vegetal, 110 kg de metanol e 5,5 kg de catalisador para produzir uma tonelada de biodiesel e 117 kg de glicerina bruta. Esses valores foram utilizados para o óleo

vegetal de soja e o de dendê, embora seja reconhecido que são óleos com características diferentes e que essas quantidades podem variar.

Considerando os valores de produtividade média de 2,756 t de grãos de soja/ha e 15,812 t de cachos de frutos frescos de dendê/ha, estabelecidos a partir de uma média das produtividades médias ponderadas, explicada no item 2.1.2, e o teor de óleo de 19% para o grão de soja e 20% para o fruto do dendê, calcula-se que um hectare de plantio produza 0,524 t de óleo de soja e 3,162 t de óleo de palma. Além disso, é possível produzir 0,237 t de óleo de palmiste/ha, assumindo que 1,5% da massa total dos cachos de frutos frescos seja relativa a esse óleo, extraído da amêndoa retirada do fruto antes da extração do óleo de palma. No entanto, o óleo de palmiste não foi considerado para a produção de biodiesel, e sim como coproduto do processo de extração do óleo de palma.

Dessa forma, este estudo assume que um hectare de soja produz 0,527 t de biodiesel, enquanto um hectare de palma produz 3,185 t de biodiesel. É preciso, então, cerca de 5,2 t de grãos de soja ou 1,9 hectares de plantio de soja para produzir uma tonelada de biodiesel, enquanto é preciso cerca de 5 t de cff ou 0,314 hectares de plantio de palma para produzir uma tonelada de biodiesel.

4.3. Principais insumos usados na cadeia produtiva do biodiesel

4.3.1. Soja

Etapa Agrícola

Embora seja indicado que se faça uma análise do solo antes de aplicar cal e fertilizantes para saber a real necessidade do solo, esta acaba não sendo uma prática comum no Brasil. Para a soja, foi grande a variação dos dados encontrados sobre a quantidade de cal aplicada ao solo antes da semeadura. Essa variação foi desde 0,375 t de cal/ha (CAVALETT & ORTEGA, 2010) até 2,0 t de cal/ha (GAZZONI *et al*, 2005). De acordo com Soares *et al* (2008), não havendo análise do solo, a quantidade média recomendada é de 1,0 t de cal/ha. Marzullo (2007) utilizou o valor de 0,278 t de cal por tonelada de grãos de soja a serem produzidos, retirado do Anuário da Agricultura

Brasileira de 2006. Utilizando a produtividade média estabelecida acima, de 2,756 t de grãos de soja/ha, a quantidade de cal a ser aplicada usando o valor retirado do Anuário seria de 0,766 t de cal/ha. A quantidade adotada neste estudo foi a de 1,0 t de cal/ha, visto que é um valor intermediário e recomendado, embora muitas vezes os produtores não sigam as recomendações (CASTRO & LIMA, 2010b).

A aplicação de nitrogênio no solo na forma de fertilizante nitrogenado para o plantio de soja é muito pequena, pois a soja é uma planta leguminosa, que na presença de bactérias do gênero *Bradyrhizobium* em suas raízes, consegue fixar nitrogênio da atmosfera (SILVA *et al*, 2010b). No entanto, essas bactérias não são naturais dos solos brasileiros e por isso é bastante comum a aplicação de inóculos delas às sementes de soja antes do plantio. As produções desses inoculantes bem como a de sementes comerciais não estão sendo levadas em consideração para as estimativas do presente estudo.

Dessa forma, a fertilização do solo com nitrogênio não se faz necessária. Ainda sim, muitos produtores a realizam, por acreditarem que tem algum efeito ou porque já compram misturas NPK prontas, que contém alguma quantidade de nitrogênio. Na maior parte da bibliografia analisada, tanto brasileira como estrangeira, a média de adição de N pelos produtores de soja varia entre zero e 9 kg por hectare (FAO, 2004; PIMENTEL & PATZEK, 2005; HILL *et al*, 2006; MARZULLO, 2007; CVALETT & ORTEGA, 2010; O'CONNOR, 2011). A FAO publicou um estudo em 2004 sobre o uso de fertilizantes no Brasil (FAO, 2004), que expõe a média de uso de cada fertilizante por cultura e por região do país. A média brasileira de adição de N publicada nele é de 8 kg/ha, valor que foi adotado neste estudo.

Os valores médios brasileiros publicados pela FAO (2004) de adição de P_2O_5 e K_2O para o cultivo de soja e utilizados neste estudo foram, respectivamente, de 66 kg/ha e 62 kg/ha. A análise bibliográfica gerou um intervalo de 12 a 80 kg/ha de P_2O_5 e de 15 a 80 kg/ha de K_2O , mas analisando só os estudos brasileiros ou para o Brasil, esses intervalos foram de 33,9 a 80 kg/ha para P_2O_5 e de 33 a 80 kg/ha de K_2O (FAO, 2004; MARZULLO, 2007; CVALETT & ORTEGA, 2010).

Em relação aos principais agrotóxicos usados, a análise bibliográfica gerou um intervalo de quantidade de herbicida aplicada ao cultivo de soja de 1,6 a 4,8 kg/ha, e de inseticida

de 0,8 a 3,2 kg/ha. Os valores utilizados neste estudo foram os valores máximos, ambos utilizados no estudo de Cavalett & Ortega (2010).

Em relação à quantidade de diesel usada nas operações agrícolas mecanizadas, o valor adotado foi o mesmo utilizado por Marzullo (2007), de 41,5 kg de diesel/ha. Valores entre 29,4 e 55,5 kg de diesel/ha foram encontrados em outros estudos.

Etapas Industriais

Na etapa de extração de óleo, foram considerados os usos de:

- 1,4 kg de hexano por tonelada de grãos de soja processada (MARZULLO, 2007);
- 29,9 kWh de energia elétrica por tonelada de grãos de soja processada (CAVALETT & ORTEGA, 2010);
- 17,9 kg de diesel por tonelada de grãos de soja processada (CAVALETT & ORTEGA, 2010).

Esses valores foram recalculados de forma a encontrar as quantidades utilizadas para que, no final de todo o processo industrial, pudesse ser obtida uma tonelada de biodiesel, resultando em um uso de 7,3 kg de hexano/t de biodiesel produzida, 156,3 kWh/t de biodiesel produzida e 93,6 kg de diesel/t de biodiesel produzida.

A etapa de extração de óleo, além de produzir óleo de soja, produz farelo de soja, na quantidade de 3,764 t de farelo para cada 0,993 t de óleo de soja produzido para transformar em 1 t de biodiesel.

Já na etapa de produção de biodiesel de soja, foram considerados os usos de:

- 110 kg de metanol por tonelada de biodiesel produzida (CASTRO *et al*, 2010b);
- 5,5 kg de catalisador por tonelada de biodiesel produzida (CASTRO *et al*, 2010b);
- 0,882 kWh de energia elétrica por tonelada de óleo utilizada (CAVALETT & ORTEGA, 2010);
- 53,7 kg de diesel por tonelada de óleo utilizada (CAVALETT & ORTEGA, 2010).

Os valores de energia elétrica e de diesel foram recalculados para obter as quantidades necessárias para se produzir uma tonelada de biodiesel, resultando em um uso de 0,876 kWh/t de biodiesel produzido e 53,3 kg de diesel/t de biodiesel produzido.

4.3.2. Dendê

Etapas Agrícolas

A palma, diferentemente da soja, é uma cultura perene e, portanto, necessita de um raciocínio diferenciado das culturas anuais. Os frutos, de onde se extrai o óleo, começam a ser produzidos pela palmeira só a partir do 3º ano após o plantio. A produtividade vai aumentando nos anos seguintes e é máxima entre o 7º e o 20º ano da plantação, quando pode atingir a produção de 25 a 30 toneladas de cachos de frutos frescos (cff) por hectare por ano (MACEDO *et al*, 2010). A produtividade vai decrescendo nos anos posteriores, e a partir de um momento passa a não ser viável economicamente a colheita dos frutos devido à altura que as palmeiras atingem, o que ocorre entre o 25º e 30º ano do plantio. Dessa forma, a produtividade média brasileira, calculada a partir de valores ponderados, considera como se a produção de cff fosse 15,812 toneladas todos os anos em todas as plantações no Brasil, enquanto sabe-se que houve locais com maiores produtividades que outros e áreas plantadas com diferentes idades.

Portanto, algumas operações só são realizadas uma vez, no momento do plantio, enquanto outras, conhecidas como processos de manutenção, são realizadas algumas vezes por ano. Assim, para estabelecer valores anuais dos *inputs* e prosseguir com a mesma metodologia utilizada para a soja, é necessário considerar os *inputs* do momento do plantio e os *inputs* realizados periodicamente e dividir pelo número de anos do plantio, incluindo os anos em que ainda não há produção até o ano de desativação.

Como os dados utilizados foram adquiridos da literatura, em alguns casos os valores obtidos já foram trabalhados e são médias anuais, em outros casos foram obtidos dados de diferentes fases e médias anuais foram calculadas considerando que os plantios produzirão até os 25 anos de idade.

A maior parte dos estudos consultados não menciona sobre a quantidade de cal utilizada na lavoura de palma, talvez porque este insumo só seja usado no momento do plantio. Buzzatti (2011) utilizou o valor de 1,3 t de cal/ha aplicada no momento do plantio, o que resulta em uma média de 0,052 t/ha/ano. No entanto, este valor foi obtido para um sistema agroflorestal experimental com dendê e não para um monocultivo. De qualquer forma, este foi o valor utilizado.

Para todos os tipos de fertilizantes sintéticos, os valores aplicados variaram bastante na bibliografia consultada. As variações foram de 0,041 a 0,242 t de N/ha/ano, de 0,035 a 0,242 t de P_2O_5 /ha/ano, e 0,131 a 0,294 t de K_2O /ha/ano. (MARZULLO, 2007; SCHMIDT, 2007; SOUZA *et al*, 2010; BUZZATTI, 2011). Optou-se pelo uso dos valores calculados a partir de Marzullo (2007), com base na publicação AGRIANUAL 2006, de 0,131 t/ha/ano para cada nutriente. No caso dos fertilizantes nitrogenados, a maioria dos trabalhos considera a ureia como o fertilizante aplicado, portanto, o valor de 0,131 t N/ha/ano foi assumido como originários da ureia. Para os agrotóxicos, também foram usados valores calculados a partir de Marzullo (2007), de 0,0037 t de herbicida/ha/ano e 0,0012 t de inseticida/ha/ano. Os valores variaram entre 0,0025 e 0,0058 t de herbicida/ha/ano e zero e 0,0023 t de inseticida/ha/ano.

Também foi considerada a fertilização orgânica da cultura de palma através da devolução ao solo dos cachos vazios após a retirada dos frutos, pratica comum na agroindústria brasileira do dendê (SOUZA *et al*, 2010). Assumindo que 22% do peso úmido dos cff correspondam aos cachos vazios (MACEDO *et al*, 2010), são devolvidos ao solo cerca de 3,48 t de cachos vazios/ha. De acordo com Schmidt (2007), uma tonelada de cachos vazios possui 3,2 kg de N. Desta forma, assumiu-se uma adição de 0,011 t N/ha na forma de cachos vazios.

A quantidade anual de diesel utilizada no plantio é baixa, pois praticamente todas as operações agrícolas realizadas não podem ser mecanizadas. A colheita é manual, porém, segundo Macedo *et al* (2010), o transporte realizado dentro da área de plantio costuma ser feito por tratores adaptados, no caso de grandes e médios produtores brasileiros, e por tração animal, no caso de pequenos produtores. O valor aqui utilizado foi de 0,0174 t de diesel/ha/ano, calculado a partir de Marzullo (2007), que obteve a informação da

Agropalma, maior empresa produtora de cachos de frutos frescos e óleo de dendê do país.

Etapas Industriais

Na etapa de extração de óleo, foi considerado que não há uso de eletricidade da rede e nem produção de vapor queimando combustível fóssil, pois ambos podem ser produzidos através da queima das fibras e cascas de amêndoas resultantes do esmagamento do dendê, e esta é uma prática comumente utilizada no Brasil e em outros países (VIANNA, 2006; SCHMIDT, 2007; MARZULLO, 2007; MACEDO *et al*, 2010). De acordo com Macedo *et al* (2010), 12% da massa total dos cff equivalem às fibras e 5% às cascas. Isso é suficiente para produzir toda a energia necessária em uma planta de esmagamento de dendê, e ainda pode sobrar um excedente de eletricidade que poderia ser vendido ou utilizado no processo de transesterificação (VIANNA, 2006; SCHMIDT, 2007; MARZULLO, 2007). No entanto, para dar início ao processo de combustão desses subprodutos na unidade de geração de energia da usina, é necessário um pouco de combustível fóssil, sendo utilizado o diesel na quantidade de 3 kg por tonelada de óleo a ser extraída, como proposto por Schmidt (2007), o que resulta em 2,98 kg por tonelada de biodiesel produzida. Não há uso de solvente no processo, pois a extração de óleo de palma e de palmiste são feitas somente por prensagem mecânica.

A etapa de extração de óleo de dendê também gera coprodutos com valor comercial, como o óleo de palmiste e a torta de palmiste, nas quantidades de 74,5 kg e 173,8 kg³⁶, respectivamente, para cada 993,3 kg de óleo de dendê produzidos para geração de 1 t de biodiesel. O óleo de palmiste é considerado nobre no mercado alimentício, e a torta de palmiste costuma ser usada na composição de ração animal.

Já para a etapa de produção de biodiesel metílico a partir do óleo de palma, foi considerada a utilização dos mesmos insumos nas mesmas quantidades descritas na produção do biodiesel metílico de soja.

³⁶ Foi considerado que 1,5% e 3,5% da massa total de cff corresponde, respectivamente, à produção de óleo de palmiste e torta de palmiste (MACEDO *et al*, 2010).

4.4. Balanço de Emissões do Biodiesel

4.4.1. Emissões de GEE da produção dos principais insumos usados na lavoura

As emissões deste item ($E_{\text{prod-ins-agri}}$) foram calculadas através da equação A1, mostrada no capítulo anterior. A Tabela 27 resume as quantidades dos principais insumos utilizados para as duas oleaginosas e os fatores de emissão relacionados às suas produções, já apresentados na seção 4.1. deste capítulo.

Tabela 27 - Quantidades (Q), em t/ha, e fatores de emissão da produção (FE_{prod}), em t CO₂e/t, dos principais insumos utilizados nas lavouras de soja e dendê.

Insumo	Q (t/ha)		FE_{prod} (t CO ₂ e/ t do insumo)
	Soja	Dendê	
Cal	1,0000	0,0520	0,010
N (n.e.)	0,0080	0,0000	3,970
N (uréia)	0,0000	0,1310	2,771
P ₂ O ₅ (n.e.)	0,0660	0,1310	0,333
K ₂ O (KCl)	0,0620	0,1310	0,400
Herbicida	0,0048	0,0037	25,000
Inseticida	0,0032	0,0012	29,000
Diesel	0,0415	0,0174	0,320

n.e. Os tipos de fertilizantes desses macronutrientes não foram especificados, portanto os fatores de emissão adotados são os gerais apresentados nas seções 4.1.7 e 4.1.8.

Fonte: Elaboração Própria.

Assim, aplicando esses valores na **equação A1** da metodologia, encontrou-se

Soja: $E_{\text{prod-ins-agri}} = 0,315 \text{ t CO}_2\text{e/ha}$

Dendê: $E_{\text{prod-ins-agri}} = 0,592 \text{ t CO}_2\text{e/ha}$

4.4.2. Emissões de GEE da combustão de diesel nas máquinas agrícolas

Os parâmetros para o cálculo das emissões da combustão de diesel nas máquinas agrícolas ($E_{\text{comb-diesel-agri}}$) para cada lavoura estão resumidos na Tabela 28. Observa-se

que a taxa de metanol existente em uma tonelada de biodiesel presente no diesel (R_{metanol}) utilizada foi de 0,110 t metanol/t biodiesel, conforme discutido no item 4.2.

Tabela 28 - Quantidade de diesel (Q_{diesel}) utilizado nas lavouras de soja e dendê, em t/ha, e outros parâmetros usados na equação A2.

Q_{diesel} (t diesel/ha)		$FE_{\text{comb-diesel-agri}}$ (em t $\text{CO}_2\text{e/t}$ de diesel)	R_{metanol} (t metanol/t biodiesel)	$FE_{\text{comb-metanol}}$ (t $\text{CO}_2\text{e/t}$ metanol)
Soja	Dendê			
0,0415	0,0174	3,498	0,110	1,375

Fonte: Elaboração Própria.

Assim, aplicando esses valores na **equação A2** da metodologia, encontrou-se

Soja: $E_{\text{comb-diesel-agri}} = 0,138 \text{ t CO}_2\text{e/ha}$

Dendê: $E_{\text{comb-diesel-agri}} = 0,058 \text{ t CO}_2\text{e/ha}$

4.4.3. Emissões de CO_2 da aplicação da cal ao solo

Os parâmetros para o cálculo das emissões da aplicação de cal ao solo (E_{calagem}) para a lavouras de soja e dendê estão resumidos na Tabela 29.

Tabela 29 - Quantidade de cal (Q_{cal}) utilizada nas lavouras de soja e dendê, em t/ha, e fator de emissão da aplicação de cal ao solo (FE_{calagem}), em t $\text{CO}_2\text{e/t}$ de cal.

Q_{cal} (t cal/ha.ano)		FE_{calagem} (em t $\text{CO}_2\text{e/t}$ de cal)
Soja	Dendê	
1,000	0,052	0,477

Fonte: Elaboração Própria.

Assim, aplicando esses valores na **equação A3** da metodologia, encontrou-se

Soja: $E_{\text{calagem}} = 0,477 \text{ t CO}_2\text{e/ha}$

Dendê: $E_{\text{calagem}} = 0,025 \text{ t CO}_2\text{e/ha}$

4.4.4. Emissões da aplicação de fertilizantes nitrogenados ao solo

O uso de fertilizantes orgânicos no plantio de soja no Brasil não é usual, assim a quantidade de N originada de fertilizante orgânico (Q_{Norg}) aplicado à lavoura de soja foi considerada nula. Já a quantidade de N sintético (Q_{Nsin}) aplicado foi de 0,008 t N/ha, como explicitado na seção 4.3.1. Como não houve especificação do fertilizante nitrogenado utilizado, para não subestimar as emissões de carbono, foi considerado que metade do N aplicado na lavoura de soja veio da ureia, ou seja, 0,004 t N/ha. Sabendo-se que a ureia possui 46% de N, a quantidade de ureia utilizada foi 0,0087 t/ha (Q_{ureia}).

Para o dendê, foram utilizados os valores médios anuais de 0,131 t de N/ha de fertilizante nitrogenado sintético (Q_{Nsin}) na forma de 0,285 t de ureia/ha, e 0,011 t de N/ha de fertilizante orgânico (Q_{Norg}), como apresentado na seção 4.3.2.

Os parâmetros para o cálculo das emissões da aplicação de fertilizantes nitrogenados ao solo (E_{fert-N}) para a lavouras de soja e dendê estão resumidos na Tabela 30.

Tabela 30 - Quantidades de N sintético (Q_{Nsin}), N orgânico (Q_{Norg}) e de ureia (Q_{ureia}) utilizadas nas lavouras de soja e dendê, fator de emissão de N_2O da aplicação de N e fator de emissão de CO_2 da aplicação de ureia.

Q_{Nsin} (t N/ha.ano)		Q_{Norg} (t N/ha.ano)		Q_{ureia} (t ureia/ha/ano)		FE_{N_2O-N} (t N_2O-N /t N)	$FE_{CO_2aplic-ureia}$ (t CO_2e /t uréia)
Soja	Dendê	Soja	Dendê	Soja	Dendê		
0,0080	0,1310	0	0,0111	0,0087	0,2848	0,010	0,733

Fonte: Elaboração Própria.

Assim, aplicando esses valores na **equação A4** da metodologia, encontrou-se

Soja: $E_{fert-N} = 0,044 \text{ t } CO_2e/ha$

Dendê: $E_{fert-N} = 0,874 \text{ t } CO_2e/ha$

4.4.5. Emissões diretas de N_2O do manejo da lavoura

Para o cálculo das emissões diretas de N_2O (E_{N_2Odir}), foi preciso antes estimar a quantidade de N nos resíduos da lavoura que retornam ao solo (Q_{CR}), em t N/ha. Para a

soja, este parâmetro foi obtido através da equação 7.1, onde foi utilizada a porcentagem de 89,8% de biomassa seca na biomassa fresca colhida de soja (LIMA *et al*, 2006) e a produtividade, para calcular a quantidade de massa seca por hectare de plantio de soja (Crop). A razão entre matéria seca de resíduos acima do solo e a produção colhida, parâmetro “R_{AG}” da equação 7.1, foi calculada da seguinte forma:

$$R_{AG} = (\text{Crop} \times \text{inclinação} + \text{intercepto}) / \text{Crop},$$

sendo os valores *default* do IPCC de inclinação e intercepto para o plantio de soja, respectivamente, iguais a 0,93 e 1,35 (KLEIN *et al*, 2006). Desta forma, R_{AG} foi igual a 1,475. A razão entre matéria seca de resíduos abaixo do solo e a produção colhida, parâmetro “R_{BG}” da equação 7.1, foi calculada da seguinte forma:

$$R_{BG} = [R_{BG\text{-}bio} \times (AG_{DM} + \text{Crop})] / \text{Crop},$$

sendo o valor default para R_{BG-bio} igual a 0,19. Desta forma, R_{BG} foi igual a 0,470. Os conteúdos de N nos resíduos acima e abaixo do solo (N_{AG} e N_{BG}) foram de 0,008 t de N/ t de matéria seca, fator *default* do IPCC para a soja (KLEIN *et al*, 2006). A fração de remoção foi nula e a de renovação foi igual a 1 para qualquer cultivo anual (KLEIN *et al*, 2006).

Os parâmetros necessários para estimar a quantidade de N nos resíduos da lavoura de soja que retornam ao solo (Q_{CR}), através da equação 7.1, estão resumidos na Tabela 31.

Tabela 31 - Parâmetros para calcular a quantidade de N nos resíduos da lavoura de soja que retornam ao solo (Q_{CR}).

Parâmetro	Valor
Crop (t matéria seca/ha)	2,475
R _{AG} (adimensional)	1,475
R _{BG} (adimensional)	0,470
N _{AG} (t de N/ t matéria seca)	0,008
N _{BG} (t de N/ t matéria seca)	0,008
Frac _{renovada} (adimensional)	1,000
Frac _{removida} (adimensional)	0,000

Fonte: Elaboração própria.

Para o dendê, a quantidade de N nos resíduos da lavoura que retornam ao solo (Q_{CR}) foi retirada de Buzzatti (2011), embora alguns autores coloquem que esse parâmetro não necessita ser levado em consideração para lavouras que não façam fixação biológica do nitrogênio (THE GOLD STANDARD, 2011).

Os valores de Q_{CR} calculados para as oleaginosas estudadas e aplicado na equação A5 foram **0,0385 t N/ha** para a **soja** e **0,0138 t N/ha** para o **dendê**.

A quantidade de N que se mineraliza, em associação com a perda de carbono da matéria orgânica do solo, como resultado da mudança de uso do solo ou de práticas de manejo (Q_{MOS}) foi nula, pois a perda de carbono do solo não foi considerada, como explicado na seção 3.2, já que foi assumido que não houve mudanças nas práticas de manejo.

O fator de emissão de N_2O é o mesmo utilizado no item anterior, 0,01 t N_2O -N/t N.

Assim, aplicando esses valores na **equação A5** da metodologia, encontrou-se

Soja: $E_{N_2O_{dir}} = 0,180 \text{ t CO}_2\text{e/ha}$

Dendê: $E_{N_2O_{dir}} = 0,064 \text{ t CO}_2\text{e/ha}$

4.4.6. Emissões indiretas de N_2O do manejo da lavoura

As emissões indiretas de N_2O são uma soma das emissões da deposição do N volatilizado e as do N lixiviado.

Para o cálculo das emissões da deposição do N volatilizado ($E_{N_2O_{volat}}$) foram necessários os dados de quantidade total de N fertilizantes nitrogenados sintéticos e de N proveniente de fertilizantes orgânicos aplicados para cada cultura (Q_{Nsint} e Q_{Norg}), os mesmos utilizados na seção 4.4.4. Para o cálculo das emissões do N lixiviado ($E_{N_2O_{lixiv}}$), além dos Q_{Nsint} e Q_{Norg} , ainda foram necessários os dados de N nos resíduos que retornam ao solo (Q_{CR}), também iguais aos usados anteriormente, e o do N que se mineraliza com o carbono devido à mudança de práticas de manejo (Q_{MOS}), que foram considerados nulos.

Para as frações de N que se volatiliza como NH_3 e NO_x e a fração do N perdido por lixiviação são usados fatores *default* do IPCC (KLEIN *et al*, 2006), iguais para ambas as culturas, bem como os fatores de emissão da deposição de N volatilizado e da lixiviação. Esses valores se encontram resumidos na Tabela 32.

Tabela 32 - Frações e fatores para as equações A6.1 e A6.2

Parâmetro	Valor
Frac _{sint} (t N volatilizado/t N aplicado)	0,1000
Frac _{org} (t N volatilizado/t N aplicado)	0,2000
Frac _{lixiv} (t N lixiviado/t N aplicado)	0,3000
FE _{vol} (t N_2O -N/t N volatilizado)	0,0100
FE _{lixiv} (t N_2O -N/t N lixiviado)	0,0075

Fonte: Elaboração própria.

Assim, aplicando esses valores nas **equações A6.1 e A6.2**, e em sequência aplicando na **equação A6**, encontrou-se

Soja: $E_{\text{N}_2\text{Oindir}} = 0,053 \text{ t CO}_2\text{e/ha}$

Dendê: $E_{\text{N}_2\text{Oindir}} = 0,179 \text{ t CO}_2\text{e/ha}$

4.4.7. Emissões totais da etapa agrícola

A Tabela 33 faz um resumo das emissões consideradas para a etapa agrícola para as duas oleaginosas, soja e palma. Foi estimada uma emissão de 1,207 t $\text{CO}_2\text{e/ha}$ para a soja e 1,792 $\text{CO}_2\text{e/ha}$ para a palma. Considerando a produção de biodiesel por hectare, discutida no item 4.2, foi calculou-se 2,289 t $\text{CO}_2\text{e/t}$ biodiesel para a soja e 0,563 t $\text{CO}_2\text{e/t}$ biodiesel para a palma.

Tabela 33 - Emissões da etapa agrícola por diferentes processos e total, para a soja e a palma, em t CO₂e/ha.

	Soja	Palma
Emissões de GEE da produção dos principais insumos usados na lavoura (t CO ₂ e/ha)	0,315	0,592
Emissões de GEE da combustão de diesel mineral nas máquinas agrícolas (t CO ₂ e/ha)	0,138	0,058
Emissões de CO ₂ da aplicação da cal ao solo (t CO ₂ e/ha)	0,477	0,025
Emissões da aplicação de fertilizantes nitrogenados ao solo (t CO ₂ e/ha)	0,044	0,874
Emissões diretas de N ₂ O do manejo da lavoura (t CO ₂ e/ha)	0,180	0,064
Emissões indiretas de N ₂ O do manejo da lavoura (t CO ₂ e/ha)	0,053	0,179
Emissões totais da etapa agrícola por hectare (t CO₂e/ha)	1,207	1,792
Produtividade média de biodiesel (t/ha)	0,527	3,185
Emissões totais da etapa agrícola por t de biodiesel produzida (t CO₂e/t biodiesel)	2,289	0,563

Fonte: Elaboração própria.

4.4.8. Emissões do transporte entre etapa agrícola e a industrial

A existência de muitos municípios produtores de soja espalhados por todo o país, bem como diversas indústrias esmagadoras ou usinas esmagadoras e produtoras de biodiesel, somada ao fato de que parte da produção de grãos se direciona diretamente para a exportação e parte abastece o mercado interno e à falta de informações sobre os locais de onde essas indústrias adquirem suas matérias-primas dificultam a estimativa de uma distância de transporte dos grãos de soja da lavoura até a unidade industrial. Alguns estudos fizeram essas estimativas e trabalharam com valores diferentes. Marzullo (2007) encontrou uma distância média de 489 km entre os maiores municípios produtores de soja do Mato Grosso e também do Brasil e unidades de extração de óleo do mesmo estado, no entanto utilizou o valor de 498 km, distância entre o município de Sorriso e uma determinada indústria esmagadora que também viria a produzir biodiesel. Roza & Freitas (2010) encontraram uma distância média entre os locais de maior produção de grãos e as usinas de extração de óleo e produção de biodiesel de soja de 398 km. Já Cavalett & Ortega (2010) consideraram uma distância média de 150 km, enquanto Mourad (2008) calculou uma distância média de 280 km entre as fazendas produtoras de grãos e usinas de produção de óleo de soja e biodiesel.

Este estudo optou por utilizar a distância média de Roza & Freitas (2010)³⁷ de 398 km entre a etapa agrícola e a de extração de óleo, assumindo um transporte de 27 t de grãos de soja por viagem de caminhão com um consumo médio de 1,9 km/l de diesel e um consumo de diesel de 2,6 km/l para o caminhão vazio. Dessa forma, seria necessário 209,5 l de diesel para a viagem de ida (com o caminhão cheio) e 153,1 l de diesel para a viagem de volta (com o caminhão vazio) para transportar as 27 t de grãos. Sendo necessárias 5,228 t de grãos de soja para a produção de 1 t de biodiesel, a quantidade de diesel utilizada no transporte de grãos para gerar 1 t de biodiesel de soja seria de 70,2 l, o que equivale a aproximadamente 59 kg de diesel.

Para o dendê, foram utilizados os mesmos valores apresentados por Marzullo (2007), obtidos em comunicação pessoal com funcionário da Agropalma. Embora existam algumas outras empresas produtoras de óleo de palma no Brasil, essa empresa foi responsável por cerca de 75% da produção anual de óleo de dendê entre os anos de 2001 e 2008 (MACEDO et al, 2010). Além disso, as indústrias esmagadoras costumam ser construídas próximo a locais de plantio, pois os cachos precisam ser processados rapidamente para não comprometer a qualidade do óleo. Marzullo (2007) considerou uma distância de 30 km entre o plantio e a indústria de extração de óleo de palma com um gasto de 0,609 kg de diesel para transportar 1 t de cff por essa distância. Embora a autora não estime o gasto de diesel da viagem de volta, espera-se que o caminhão não volte vazio e sim trazendo os restos dos cachos sem frutos que são aplicados ao solo como adubo orgânico. Mesmo sabendo que o caminhão ainda assim voltaria mais leve, foi considerado o mesmo gasto de diesel para a viagem de volta. Dessa forma, seria necessário 1,218 kg de diesel para transportar uma t de cff, e, portanto, 6,05 kg de diesel para o transporte de cff suficientes para produzir uma tonelada de biodiesel de palma.

As emissões dessa etapa foram calculadas a partir da equação T1. Os parâmetros utilizados nela estão resumidos na Tabela 34. Os resultados encontrados foram

Soja: $E_{\text{trans-agri} \rightarrow \text{ind}} = 0,198 \text{ t CO}_2\text{e/t biodiesel}$

Dendê: $E_{\text{trans-agri} \rightarrow \text{ind}} = 0,018 \text{ t CO}_2\text{e/t biodiesel}$

³⁷ Dentre os estudos analisados, o de Roza & Freitas (2010) pareceu realizar uma estimativa mais completa.

Tabela 34 - Valores utilizados para os parâmetros da equação T1.

Parâmetro	Soja	Dendê
$Q_{\text{diesel_transp}}$ (t diesel/t biodiesel produzida)	0,059	0,006
$FE_{\text{prod-diesel}}$ (t CO ₂ e/ t diesel)	0,320	
$FE_{\text{comb-diesel-transp}}$ (t CO ₂ e/ t diesel)	3,144	
R_{metanol} (t metanol/t biodiesel)	0,110	
$FE_{\text{comb-metanol}}$ (t CO ₂ e/t metanol)	1,375	

Fonte: Elaboração Própria.

4.4.9. Emissões de GEE da etapa de extração do óleo vegetal

A extração de óleo de soja é feita sem prensagem mecânica, somente através do uso de solvente, enquanto a extração de óleo de palma é feita por prensagem mecânica. Os diversos processos envolvidos na etapa de extração do óleo vegetal necessitam de eletricidade, que pode ser produzida pela própria usina ou vir da rede interligada, e também de vapor, produzido pela queima de algum combustível fóssil ou restos orgânicos da lavoura. No entanto, a indústria esmagadora de palma é praticamente auto-suficiente em energia, pois utiliza os restos culturais de fibras e cascas de amêndoas como combustível para geração *in situ* de eletricidade e de vapor, necessitando somente de um pouco de diesel para iniciar a combustão.

As emissões deste item foram calculadas através das equações I1 e I2. A Tabela 35 resume as quantidades dos principais insumos utilizados para as duas oleaginosas, e os fatores de emissão relacionados às suas produções, já apresentados, respectivamente, nas seções 4.3 e 4.1 deste capítulo.

Tabela 35 - Quantidades (Q), em t de insumo/t de biodiesel produzido, e fatores de emissão da produção (FE_{prod}) dos principais insumos utilizados para extração de óleo de soja e dendê, em t CO₂e/t de insumo.

Insumo	Q (t insumo*/t biodiesel)		FE_{prod} (t CO ₂ e/t insumo*)
	Soja	Dendê	
Hexano	0,0073	0,0000	1,0595000
Eletricidade da rede	156,3141	0,0000	0,0000358
Diesel	0,0936	0,0030	0,3201370

*Para eletricidade, foi usado kWh no lugar de t do insumo.

Fonte: Elaboração Própria.

Os outros parâmetros utilizados na equação I2 estão na Tabela 36.

Tabela 36 - Valores utilizados para os demais parâmetros das equações I1 e I2.

Parâmetro	Valor
FE _{comb-diesel-caldeira} (t CO ₂ e/ t diesel)	3,114
R _{metanol} (t metanol/t biodiesel)	0,110
FE _{comb-metanol} (t CO ₂ e/t metanol)	1,375

Fonte: Elaboração Própria.

Assim, aplicando esses valores nas **equações I1 e I2** da metodologia, encontrou-se

Soja: $E_{\text{prod-ins-oleo}} + E_{\text{comb-diesel-oleo}} = 0,323 \text{ t CO}_2\text{e/t biodiesel}$

Dendê: $E_{\text{prod-ins-oleo}} + E_{\text{comb-diesel-oleo}} = 0,010 \text{ t CO}_2\text{e/t biodiesel}$

4.4.10. Emissões de GEE da etapa de produção do biodiesel

Embora os óleos de soja e dendê apresentem características e propriedades diferentes que podem influenciar no processo de transesterificação, este estudo assumiu que as entradas de energia e as quantidades de insumos usados foram os mesmos para a produção do biodiesel metílico de soja e de biodiesel metílico de dendê. Essas quantidades foram apresentadas na seção 4.3.1.2 e estão expostas na Tabela 37, juntamente com os fatores de emissão da produção desses insumos. Os valores dos outros parâmetros das equações I3 e I4 são os mesmos da Tabela 36.

Tabela 37 - Quantidades (Q), em t de insumo/t de biodiesel produzido, e fatores de emissão da produção (FE_{prod}) dos principais insumos utilizados para produção de biodiesel metílico de soja e dendê, em t CO₂e/t de insumo.

Insumo	Q (t insumo*/t biodiesel)		FE _{prod} (t CO ₂ e/t insumo*)
	Soja	Dendê	
Metanol	0,1100	0,1100	1,9500000
Catalisador	0,0055	0,0055	1,2000000
Eleticidade da rede	0,8761	0,8761	0,0000358
Diesel	0,0533	0,0533	0,3201370

*Para eletricidade, foi usado kWh no lugar de t do insumo.

Fonte: Elaboração Própria.

Aplicando esses valores nas **equações I3 e I4** da metodologia, encontrou-se

Soja: $E_{\text{prod-ins-oleo}} + E_{\text{comb-diesel-óleo}} = 0,398 \text{ t CO}_2\text{e/t biodiesel}$

Dendê: $E_{\text{prod-ins-oleo}} + E_{\text{comb-diesel-óleo}} = 0,398 \text{ t CO}_2\text{e/t biodiesel}$

4.4.11. Emissões totais de GEE da produção do biodiesel

As emissões totais de GEE da produção de biodiesel metílico de soja e de biodiesel metílico de palma foram calculadas através da soma das emissões totais de GEE da etapa agrícola, do transporte entre a etapa agrícola e a etapa industrial, da etapa de extração de óleo e da etapa de produção de biodiesel a partir do óleo. Elas estão resumidas na Tabela 38.

Tabela 38 - Emissões das etapas de produção e emissões totais da produção de biodiesel metílico de soja e de palma, em t CO₂e/t biodiesel produzida.

	Soja	Palma
Emissões da etapa agrícola (t CO ₂ e/t biodiesel)	2,289	0,563
Emissões do transporte entre as etapas agrícola e industrial (t CO ₂ e/t biodiesel)	0,198	0,018
Emissões da etapa de extração de óleo vegetal	0,323	0,010
Emissões da etapa de produção de biodiesel a partir do óleo vegetal	0,398	0,398
Emissões Totais da Produção	3,208	0,989

Fonte: Elaboração própria.

4.4.12. Emissões do consumo do biodiesel

Aplicando o fator de emissão da combustão do metanol ($FE_{\text{comb-metanol}}$), igual a 1,375 t CO₂e/t metanol, sobre a taxa de metanol presente em uma tonelada de biodiesel (R_{metanol}), igual a 0,110 t de metanol/t de biodiesel, encontrou-se, através da equação C, que as emissões do consumo de biodiesel, tanto de soja como de palma, são iguais a **0,151 t CO₂e/t biodiesel**.

4.4.13. Emissões Totais do Biodiesel

As emissões totais de GEE do biodiesel metílico de soja e do biodiesel metílico de palma estimadas neste estudo, somando as etapas da produção e a combustão, foram, respectivamente, de **3,360 t CO₂e/t biodiesel** e **1,140 t CO₂e/t biodiesel**, quando nenhum tipo de alocação é considerado. Nesse caso, as emissões estimadas para o biodiesel de soja corresponderam a quase o triplo das emissões estimadas para o biodiesel de palma.

4.4.14. Alocação entre os coprodutos

As emissões estimadas foram recalculadas considerando a alocação entre os coprodutos do processo. Para o biodiesel de soja, os coprodutos considerados foram o óleo de soja e o farelo de soja, coprodutos do processo de extração do óleo de soja, e o biodiesel de soja e a glicerina bruta, coproduto do processo de transesterificação. Para o dendê, os coprodutos considerados foram os óleos de palma e de palmiste e a torta de palmiste, na etapa de extração de óleo de dendê, e o biodiesel de dendê e a glicerina bruta³⁸, na etapa de transesterificação. O método de alocação adotado foi o de valor econômico, por ser o mais utilizado na literatura analisada. O método de substituição foi evitado devido a sua complexidade, como discutido anteriormente na seção 3.1, enquanto o método de alocação por conteúdo energético também foi evitado, pois alguns coprodutos não costumam ser vendidos ou utilizados no Brasil com finalidade energética, como o óleo de palmiste e a torta de palmiste. Por fim, alocação por massa também foi realizada para permitir uma comparação e verificar como a escolha do método de alocação pode influenciar no resultado final.

³⁸ A glicerina bruta só deve ser considerada coproduto se houver mercado para ela. A tendência é que, com o aumento da produção de biodiesel, ela se torne um resíduo do processo e não participe da alocação das emissões.

A Tabela 39 apresenta os valores de mercado desses produtos³⁹. Outros coprodutos não foram incluídos na alocação por serem consumidos no processo de produção do biodiesel, como os cachos de frutos vazios, as fibras e as cascas de amêndoas do dendê.

Tabela 39 – Preços de mercado dos produtos da cadeia de produção do biodiesel, em R\$/t.

Produto	Preço (R\$/t)	Fonte
Óleo de soja*	2.408,04	ABIOVE (2012)
Farelo de soja*	567,35	ABIOVE (2012)
Óleo de dendê**	1.710,41	INDEX MUNDI (2012)
Óleo de palmiste**	2.227,96	INDEX MUNDI (2012)
Torta de palmiste	200,00	Comunicação por telefone com Aboissa Óleos Vegetais
Biodiesel***	2.609,95	ANP (2011a)
Glicerina bruta	200,00	DUARTE (2010)

*Valor médio de 2011 para São Paulo, com ICMS.

**Valor médio do 2º semestre de 2011.

*** Preço médio do 20º leilão; independente da matéria-prima de origem.

Fonte: Elaboração própria.

A alocação por valor econômico foi realizada através dos seguintes passos:

- 1- Primeiro foi calculado um fator de alocação somente para os produtos da etapa da extração de óleo, através de porcentagens do somatório das multiplicações dos preços de mercado dos produtos pelas quantidades obtidas quando se produz óleo suficiente para gerar uma tonelada de biodiesel;
- 2- Em seguida, esses fatores de alocação foram aplicados para a soma das emissões estimada das etapas agrícola, de transporte e de extração de óleo de cada oleaginosa, resultando em uma divisão das emissões entre esses produtos (óleo de soja e farelo de soja, para a soja; óleo de dendê, óleo de palmiste e torta de palmiste para o dendê);
- 3- Separadamente, outros fatores de alocação foram calculados para o biodiesel e a glicerina bruta, através de porcentagens do somatório das multiplicações

³⁹ O preço do óleo de soja foi obtido a partir de referência diferente do preço do óleo de dendê, e, portanto, não devem ser comparados. O importante na questão de alocação é a diferença entre os valores dos coprodutos de uma mesma matéria-prima.

dos preços de mercado desses produtos por 1 t de biodiesel e 0,117 t de glicerina bruta;

- 4- Esses outros fatores de alocação foram aplicados para as emissões estimadas da etapa de produção de biodiesel, que foram as mesmas para a soja e o dendê, resultando em uma divisão das emissões entre esses produtos;
- 5- As emissões alocadas ao biodiesel de soja e de dendê foram a soma das emissões alocada ao óleo de soja ou de dendê no passo 2 com as alocadas ao biodiesel no passo 4 e com as da combustão do biodiesel.

A alocação por massa foi calculada de forma mais simples, pois atribuiu-se a cada coproduto uma proporção das emissões equivalente a proporção da massa desse coproduto em relação ao total da etapa, sendo também realizada para duas etapas: ao final da extração de óleo vegetal e ao final do processo de transesterificação, como explicado para o processo de alocação por valor econômico.

A Tabela 40 apresenta os resultados das alocações das emissões totais entre os produtos da cadeia de produção do biodiesel de soja e de dendê.

Tabela 40 – Alocação por valor econômico e por massa das emissões totais entre os produtos da cadeia produtiva do biodiesel de soja e de palma, em t CO₂e/t de biodiesel.

Produto	Emissões Alocadas por Valor Econômico (t CO ₂ e/t biodiesel)	Emissões Alocadas por Massa (t CO ₂ e/t biodiesel)
SOJA		
Biodiesel de soja	2,003	1,094
Farelo de soja	1,326	2,224
Glicerina bruta	0,031	0,042
TOTAL	3,360	3,360
DENDÊ		
Biodiesel de dendê	1,047	0,980
Óleo de palmiste	0,052	0,035
Torta de palmiste	0,011	0,083
Glicerina bruta	0,031	0,042
TOTAL	1,140	1,140

Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 41 apresenta as emissões estimadas para cada etapa principal do ciclo de vida do biodiesel de soja e de dendê, calculando a porcentagem relativa das emissões totais

para cada uma dessas etapas, para a situação onde a alocação não é considerada e para a situação que a alocação por valor econômico é considerada.

Tabela 41 – Percentual de emissões (%) relativo a cada etapa do ciclo de vida do biodiesel de soja e dendê, para os casos sem alocação e com alocação por valor econômico.

Emissões (t CO ₂ e/t biodiesel)	Sem alocação				Com alocação V.E.			
	Soja		Dendê		Soja		Dendê	
		%		%		%		%
Etapa agrícola	2,289	68,1	0,563	49,4	1,209	60,4	0,503	48,0
Transporte	0,198	5,9	0,018	1,6	0,105	5,2	0,016	1,6
Etapa de extração de óleo	0,324	9,6	0,010	0,9	0,171	8,5	0,009	0,8
Etapa produção de biodiesel	0,398	11,9	0,398	34,9	0,367	18,3	0,367	35,0
Combustão do biodiesel	0,151	4,5	0,151	13,3	0,151	7,6	0,151	14,5
Total	3,360	100,0	1,140	100,0	2,003	100,0	1,047	100,0

Fonte: Elaboração própria.

4.4.15. Comparação com o diesel mineral

Este estudo não fez uma estimativa das emissões da produção nem do consumo do diesel mineral B0, porém utilizou valores encontrados na literatura. Esses valores foram discutidos na seção 4.1, e estão apresentados na Tabela 42. Os valores relativos à combustão do diesel usados neste item são os da combustão em meios de transporte rodoviários. As **emissões totais de GEE do diesel foram 3,514 t CO₂e/t diesel**. Assim como para as emissões da produção do biodiesel, as emissões da produção do diesel não incluíram a etapa de distribuição do combustível, após o refino.

Tabela 42 - Emissões totais do diesel mineral, incluindo a produção e o consumo, em t CO₂e/t diesel.

Emissões da produção de diesel (t CO ₂ e/t diesel)	0,320
Emissões da combustão de diesel em transportes rodoviários (t CO ₂ e/t diesel)	3,194
Emissões Totais do Diesel (t CO₂e/t diesel)	3,514

Fonte: Elaboração própria com base em Marzullo (2007), Viana (2008), Waldron *et al* (2006) e Ferreira *et al* (2010).

Por conta da diferença de conteúdo energético entre o biodiesel e o diesel, comentada na seção 1.1 do primeiro capítulo, calculou-se ser necessário 1,122 t de biodiesel⁴⁰ para substituir 1 t de diesel. Dessa forma, **sem** considerar nenhum tipo de **alocação** das emissões entre os coprodutos do sistema, as **emissões totais para 1,122 t de biodiesel de soja** foram **3,770 t CO₂e**, enquanto que as **emissões totais para 1,122 t de biodiesel de palma** foram **1,280 t CO₂e**. Nota-se que, ao invés de reduzir as emissões, a substituição de 1 t de diesel por 1,122 t de biodiesel de soja, de acordo com as estimativas desse estudo e sem considerar alocação, provocaria um aumento de 0,256 t CO₂e, enquanto que substituindo 1 t de diesel por 1,122 t de biodiesel de palma se tem uma redução de 2,234 t CO₂e. Quando a **alocação** das emissões por **valor econômico** foi considerada, as **emissões totais para 1,122 t de biodiesel de soja** foram **2,247 t CO₂e**, enquanto que as **emissões totais para 1,122 t de biodiesel de palma** foram **1,174 t CO₂e**. Já considerando a **alocação** por **massa**, as emissões totais para essa mesma quantidade de biodiesel foram **1,228 t CO₂e** para o de **soja** e **1,100 t CO₂e** para o de **palma**.

Transformando para a unidade **litro**, ao se considerar a densidade do diesel igual a 0,84 kg/l e a do biodiesel, 0,88 kg/l⁴¹ (EPE, 2011a), as emissões do **diesel** foram de **2,952 kg CO₂e/l**, enquanto as do **biodiesel** foram de **2,957 kg CO₂e/l** e **1,004 kg CO₂e/l**, para o de **soja** e o de **palma** respectivamente, sem considerar alocação. No entanto, cabe a mesma discussão do parágrafo anterior em relação ao conteúdo energético, e, portanto, calculou-se ser necessário 1,071 l de biodiesel para substituir 1 l de diesel. Dessa forma, **sem** considerar nenhum tipo de **alocação**, as **emissões totais para 1,071 l de biodiesel** foram **3,167 kg CO₂e** para o de **soja**, e **1,075 kg CO₂e** para o de **palma**. Considerando

⁴⁰ 9.000 kcal/kg foi o PCI do biodiesel considerado nesse estudo, tanto para o biodiesel de soja como para o de palma, enquanto o PCI do diesel foi 10.100 kcal/kg (EPE, 2011a). Como o Balanço Energético Nacional (EPE, 2011a) não diferencia os tipos de biodiesel, divulgando apenas um único valor de PCI, este estudo também assumiu essa postura.

⁴¹ Para a realização dos cálculos, a densidade do biodiesel de soja foi assumida como igual à densidade do biodiesel de palma embora o biodiesel de palma possa ser um pouco mais denso que o de soja, pois o óleo de palma é mais denso que o óleo de soja. Como o Balanço Energético Nacional (EPE, 2011a) não diferencia os tipos de biodiesel, divulgando apenas um único valor de densidade, este estudo também assumiu essa postura.

alocação das emissões por **valor econômico**, as emissões totais do **biodiesel de soja** foram **1,762 kg CO₂e/l** e **1,888 kg CO₂e/1,071 l**, enquanto as do **biodiesel de palma** foram **0,921 kg CO₂e/l** e **0,986 kg CO₂e/1,071 l**. Com a **alocação por massa**, os valores seriam **0,963 kg CO₂e/l** e **1,032 kg CO₂e/1,071 l** para o **biodiesel de soja**, e **0,863 kg CO₂e/l** e **0,924 kg CO₂e/1,071 l** para o biodiesel de palma.

Por fim, em termos das emissões por unidade de energia, calculou-se para o **biodiesel de soja** totais de **89,2 kg CO₂e/GJ sem alocação**, e **53,1 kg CO₂e/GJ** e **29,0 kg CO₂e/GJ com alocação por valor econômico e por massa**, respectivamente; enquanto para o **biodiesel de palma** foram calculados totais de **30,3 kg CO₂e/GJ sem alocação**, e **27,8 kg CO₂e/GJ** e **26,0 kg CO₂e/GJ**, com **alocação por valor econômico e por massa**, respectivamente. Para o **diesel** foi calculado um total de **83,1 kg CO₂e/GJ**.

A Tabela 43 resume alguns dos resultados apresentados acima.

Tabela 43 – Emissões Totais do Biodiesel, em t CO₂e, para 1,122 t de biodiesel, e em kg CO₂e para 1,071 l de biodiesel e para 1 GJ de biodiesel, e redução de emissões em relação ao diesel, em % e em kg CO₂e/l.

Tipo de Biodiesel	Emissões Totais do Biodiesel (t CO ₂ e/1,122 t biodiesel)	Emissões Totais do Biodiesel (kg CO ₂ e/1,071 l biodiesel)	Emissões Totais do Biodiesel (kg CO ₂ e/GJ biodiesel)	Redução de emissões em relação ao diesel (%)	Redução de emissões em relação ao diesel* (kg CO ₂ e/l)
Sem alocação					
Soja	3,770	3,167	89,161	-7,3	-0,215
Dendê	1,280	1,075	30,264	63,6	1,877
Com alocação por valor econômico					
Soja	2,247	1,888	53,147	36,0	1,064
Dendê	1,174	0,986	27,774	66,6	1,965
Com alocação por massa					
Soja	1,228	1,032	29,041	65,0	1,920
Dendê	1,100	0,924	26,021	68,7	2,028

* Inclui a diferença de conteúdo energético entre diesel e biodiesel.

Observação: O sinal de “-” representa nessa tabela uma redução negativa, ou seja, um aumento nas emissões.

Fonte: Elaboração própria.

5. DISCUSSÃO

5.1. Considerações acerca dos resultados encontrados

Algumas considerações devem ser feitas em torno dos resultados encontrados, tanto em relação às emissões do biodiesel de soja e de dendê *per se* como em relação à comparação desses biocombustíveis com o diesel.

De acordo com Robbins *et al* (2011), as diferentes estimativas de emissões encontradas na literatura para biocombustíveis de um mesmo tipo produzido a partir de uma mesma matéria-prima em um mesmo país são um indicativo que a ciência de contabilização das emissões de GEE de biocombustíveis não está madura. Um dos motivos são as escolhas arbitrárias feitas por cada autor em relação ao que vai ser incluído nas fronteiras do sistema, visto que não existe uma metodologia universalmente aceita e usada para isso.

Além disso, as emissões do biodiesel de soja e de dendê foram estimadas com base em fatores de emissões não específicos para o Brasil e em dados de entradas de materiais que pareceram mais adequados de acordo com o que foi levantado na literatura nacional e internacional, embora fosse ideal utilizar dados primários obtidos em estudo de caso.

As incertezas em torno de vários dos fatores considerados é um obstáculo à confiabilidade dos resultados. Existe, por exemplo, uma grande discussão em torno dos fatores de emissões diretas e indiretas de N₂O dos solos. As incertezas para esses fatores *default* do IPCC (KLEIN *et al*, 2006) são grandes, como o próprio Painel apresenta em seu guia⁴². Além disso, estudos bastante conhecidos na área como o de Crutzen *et al* (2008) apontam para uma subestimativa das emissões quando se usa esses fatores do IPCC e apresentam fatores de emissões maiores. A maioria dos estudos que pretendem estimar as emissões para biocombustíveis, no entanto, esbarram nessas limitações. De acordo com Osborne *et al* (2010), melhorias na habilidade de quantificar as emissões de GEE poderiam ser alcançadas com a diminuição das incertezas em torno dos fatores de emissões de GEE dos solos. Para isso seriam necessárias mais pesquisas de base nas

⁴² No caso do Tier 1, o fator de emissão de N₂O dos solos de 0,01 t de N₂O/ t de N possui um intervalo de incerteza de 0,003 a 0,03 t de N₂O/ t de N (KLEIN *et al*, 2006).

áreas de ecologia e ciências agronômicas e uma maior integração entre elas e as pesquisas da área energética, como expuseram Davis *et al* (2009). Segundo Gnansounou *et al* (2008b), as incertezas podem ser administradas através do uso de análise de sensibilidade e de cenários, e os resultados podem ser apresentados na forma de um intervalo de valores no lugar de um valor preciso.

Em relação à comparação com o diesel fóssil, esta dissertação considerou tanto as emissões da etapa de produção como as da combustão do diesel. A etapa de produção estabelecida foi “do poço ao portão de saída da refinaria” para o diesel e “do campo ao portão de saída de usina de biodiesel” para o biodiesel, e foi somada à etapa de consumo do combustível. Em alguns estudos, somente a etapa de combustão é levada em consideração. Assim como para o biodiesel, a estimativa das emissões da produção do diesel depende de algumas escolhas arbitrárias dos autores que a realizam. Não foram obtidos detalhes de certos aspectos sobre o que foi considerado nos inventários de produção de diesel realizados por Marzullo (2007) e Viana (2008), tomados como base para obtenção do fator de produção do diesel nesta dissertação.

5.2. Análise dos resultados

Os resultados encontrados no capítulo anterior mostram que quando a alocação não é considerada, há um aumento de 7,3% das emissões ao substituir o diesel por uma quantidade de biodiesel de soja energeticamente equivalente, enquanto que se o biodiesel for de dendê, há uma redução de 63,6% (Figura 12). Ao considerar a alocação das emissões entre os coprodutos através do método de alocação por valor econômico, o biodiesel apresenta redução em relação ao diesel para as duas oleaginosas: 36,0% para a soja e 66,6% para o dendê (Figura 12).

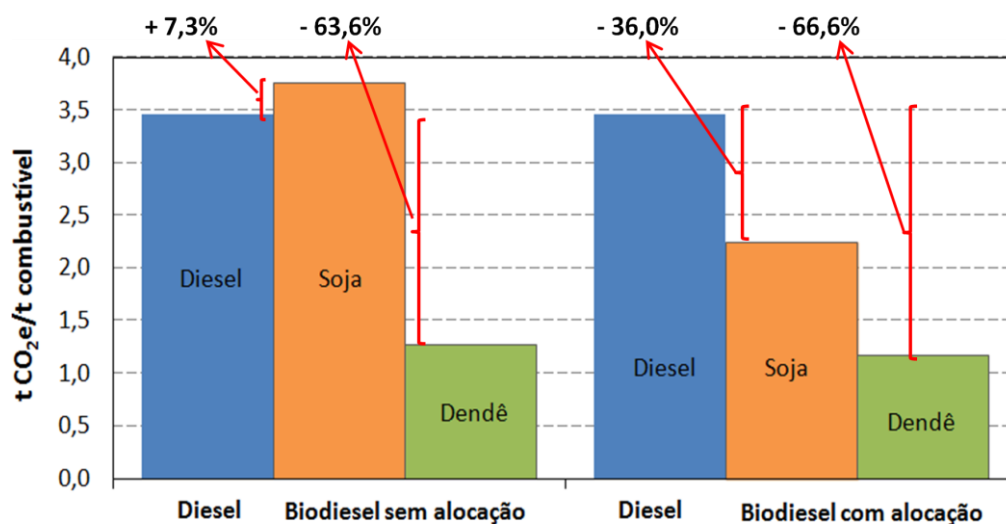


Figura 12 – Variação das emissões (em %) da substituição de 1 t diesel por 1 t de biodiesel.

Fonte: Elaboração própria.

Quase toda literatura analisada para elaboração desta dissertação considera algum método de alocação no momento de analisar os resultados. Dessa forma, a análise aqui feita considerou apenas os resultados encontrados através da alocação por valor econômico. No entanto, ao realizar a alocação por massa ao invés da alocação por valor de mercado, foi verificado que o método de alocação escolhido exerce grande influencia nos resultados, pois, com a alocação por massa, a redução das emissões do biodiesel de soja, igual a 65,0%, é bastante superior à redução obtida quando a alocação por valor econômico é considerada. Através do método de alocação por massa, atribuídas ao biodiesel de soja são pouco superiores às atribuídas ao de dendê.

Assim, assumindo o resultado encontrado utilizando-se a alocação por valor econômico, um litro de diesel puro substituído por 1,071 litros de biodiesel de soja evitaria a emissão de 1,064 kg de CO₂e, enquanto se substituído por 1,071 litros de biodiesel de dendê as emissões evitadas seriam de 1,965 kg de CO₂e.

Desde 2010, o diesel vendido nos postos distribuidores no país possui 5% do seu volume de biodiesel. Caso o biodiesel usado nessa mistura fosse de soja, seria evitado 2,01% das emissões de CO₂e a cada litro de B5, enquanto que se fosse de dendê, esse valor seria de 3,44%. No entanto, a substituição parcial de 5% do diesel por biodiesel não leva em conta a diferença de conteúdo energético dos dois. Portanto, deve ser

lembrado que teoricamente um litro de diesel B5 rende menos que um litro de diesel puro em um motor.

Em 2011, o Brasil produziu cerca de 2,6 milhões de m³ de biodiesel. Se todo esse volume fosse biodiesel de soja ou biodiesel de dendê, as emissões evitadas teriam sido cerca de 3,0 milhões de toneladas de CO₂e e mais de 5,0 milhões de toneladas de CO₂e, respectivamente. No entanto, conforme mostrado na Figura 6 no capítulo 1, cerca de 80% do total de biodiesel no Brasil tem sido produzido a partir de óleo de soja. A produção de biodiesel de dendê tem ocorrido somente em poucos meses, em quantidade muito baixa em relação ao total, como mostra a Tabela 45 no anexo I para o ano de 2010. Se 80% do total de biodiesel de 2011 tivesse sido produzido a partir de dendê ao invés de soja poderiam ser evitadas as emissões de 1,75 milhões de toneladas de CO₂e a mais.

As menores emissões da cadeia do biodiesel do dendê já eram esperadas por conta da maior capacidade de produção de óleo por hectare dessa oleaginosa em relação à soja, cerca de seis vezes mais. Além disso, não foi estimado o quanto de energia excedente poderia ser gerada na etapa de extração de óleo e ser usada na etapa de transesterificação, o que diminuiria as emissões desta última etapa. A Tabela 41 no capítulo 4 mostrou que as emissões da etapa de fabricação de biodiesel e da etapa de consumo do biodiesel tiveram um peso muito maior para o biodiesel de dendê do que para o de soja, embora essas etapas possuam os mesmos valores no ciclo de vida das duas oleaginosas.

As emissões de extração de óleo foram muito maiores para a soja que para o dendê, pois a usina esmagadora de dendê é praticamente autossuficiente em energia por conta do aproveitamento de fibras e cascas de amêndoas na unidade produtora de energia da usina, enquanto a da soja utiliza combustível fóssil e eletricidade da rede. A consideração do diesel como combustível fóssil utilizado nesta etapa e também na etapa de transesterificação foi feita por uma questão de facilidade da estimativa e por ser o combustível mais utilizado. No entanto, outros combustíveis fósseis menos emissores que também são utilizados, como o gás natural, favoreceriam o balanço de emissões do biodiesel de soja, visto que muitas usinas extratoras de óleo e produtoras de biodiesel se encontram em locais de fácil acesso a esse combustível.

As emissões estimadas foram mais altas para um hectare de cultivo de dendê do que para um hectare do cultivo de soja por conta da maior entrada de fertilizantes para essa cultura perene, o que resultou em maiores emissões da produção dos fertilizantes e também da aplicação do N ao solo, além das emissões indiretas de N_2O , que também são influenciadas pela existência do N no solo. A soja teve maior emissão por hectare que o dendê nessa etapa agrícola somente em relação à produção e consumo do diesel nas máquinas e em relação às emissões de N dos resíduos que retornam ao solo, por ela fixar N e assim possuir maior teor de N em seus resíduos. No entanto, é preciso lembrar que, para a produção de uma tonelada de biodiesel de soja este estudo estimou serem necessários 1,9 hectares enquanto que para o biodiesel de dendê bastaria 0,3 hectare.

Através da Tabela 40, notou-se que, quando a alocação por valor econômico é realizada, o biodiesel de soja é responsável por somente cerca de 60% das emissões totais que são atribuídas a ele quando a alocação não é feita. Já para o biodiesel de dendê, a diferença entre fazer ou não a alocação é pequena, pois quando a alocação é feita, 92% das emissões totais são atribuídas a ele. Nota-se que isso é um reflexo do fato do cultivo de dendê ser dedicado à fabricação de óleo enquanto que o cultivo de soja tem como produto principal o farelo.

Dessa forma, a produção de biodiesel a partir de óleo de dendê deve ser incentivada em detrimento da utilização do óleo de soja, especialmente no caso de uma ampliação da produção brasileira para atender a um percentual mandatório mais alto que o B5. Para isso, é necessário que se aumente a área plantada com a palmácea de forma a aumentar a quantidade produzida, permitindo que se atenda tanto o mercado tradicional do óleo como o mercado de biodiesel. Somente para atender uma produção de 2,08 milhões de m^3 de biodiesel de dendê em um ano (80% do total de biodiesel produzido em 2011), seriam necessários cerca de 115.760 hectares plantados com dendê com uma média de 15,8 t de cff produzidos por hectare. Esse número é maior do que a área plantada existente no Brasil em 2010, estimada em 108,9 mil hectares, como mostra a Tabela 46 no anexo II. Além disso, a expansão da área plantada deve ser feita somente em áreas degradadas, de modo a não criar um balanço negativo de emissões. Em 2010, somente na Amazônia estimava-se existir cerca de 16 milhões de hectares de áreas de pastagens degradadas (ONU, 2010), quantidade mais do que suficiente para expandir a produção

de palma para atender uma grande parcela do mercado de biodiesel e o mercado tradicional de óleo de dendê.

5.3.Comparação dos resultados com alguns resultados da literatura

Como comentado no capítulo 3, vários são os motivos que explicam os diferentes resultados encontrados na literatura para um biodiesel produzido a partir da mesma matéria-prima. Não há uma padronização do que deve ser incluído nas fronteiras dos sistemas analisados. Segundo Davis *et al* (2009), existem algumas tentativas de se padronizar os métodos de estimar as emissões de GEE para biocombustíveis, mas até a época havia pouca consistência nos métodos usados.

Esta seção compara os resultados do presente estudo com alguns resultados encontrados na literatura. Ela está dividida em duas partes, uma para a soja e outra para o dendê, e em cada parte os estudos usados para comparação estão em destaque. Sempre que possível, os dados foram adequados de forma a permitir melhor comparação. Em alguns casos, a comparação foi dificultada pela falta de detalhes nos trabalhos ou por acesso apenas a uma versão resumida.

5.3.1. Soja

Diretiva Europeia sobre Energias Renováveis (EUROPEAN UNION, 2009) - Europa

A Diretiva da União Europeia divulgou valores *default* de emissões de vários biocombustíveis para as etapas de cultivo, processamento industrial e transporte e distribuição. Os valores para a soja foram, respectivamente, 19 g CO₂e/MJ, 26 g CO₂e/MJ e 13 g CO₂e/MJ para as três etapas, sem considerar mudança de uso do solo (EUROPEAN UNION, 2009). A redução *default* de uso de biodiesel em substituição ao diesel fóssil considerada pela diretiva é de 31%. Não fica claro se esse valor considera alocação, porém, caso considere, a alocação deve ser por conteúdo energético dos produtos, visto que é a indicada pela metodologia de estimativa de emissões proposta também na Diretiva. No presente trabalho, a redução foi de - 2,5% sem alocação (o biodiesel de soja emitiu mais do que o diesel fóssil) e de 40,9% com alocação por valor

econômico, se desconsideradas as emissões do consumo do biocombustível. Para efeito de comparação, as emissões da etapa agrícola e da etapa industrial encontradas nesta dissertação foram 60,6 g CO₂e/MJ e 19,1 g CO₂e/MJ, respectivamente, sendo a primeira quase o triplo do valor *default* da Diretiva e a segunda, um pouco menor que o valor da Diretiva.

Além de divulgar valores *default*, essa Diretiva propõe uma metodologia de cálculo para ser aplicada de forma a verificar se o biocombustível atinge o mínimo necessário de emissões evitadas para cumprir com as metas europeias⁴³. Segundo esta metodologia, devem ser contabilizadas as emissões do cultivo da matéria-prima, da mudança de uso do solo provocada por ele, do processamento industrial, do transporte e distribuição, e descontadas as emissões evitadas devido à acumulação de carbono, e caso haja uma gestão agrícola melhorada, as emissões evitadas por captura e armazenamento geológico de carbono e as emissões evitadas pela geração de eletricidade excedente por cogeração. As emissões do cultivo devem incluir as emissões relativas à fabricação dos produtos utilizados no cultivo, porém não são dados mais detalhes. Nada é mencionado sobre as emissões de N₂O dos solos. Ainda segundo essa metodologia, as emissões do consumo devem ser consideradas nulas para os biocombustíveis líquidos.

O'Connor (2011) - Canadá

O'Connor (2011) estimou as emissões para o biodiesel de soja produzido no Canadá através do software GHGenius, e a variação dessas emissões ao longo do tempo, inclusive estabelecendo uma previsão para 2015. O autor retratou uma pequena redução na entrada de energia e materiais no sistema e um aumento significativo na produtividade do cultivo de soja, e, portanto, as emissões foram menores para 2005 do que para 1995 e ainda menores na previsão para 2015. O total de emissões, incluindo a etapa de consumo do biodiesel e alocação por expansão do sistema foi de 42,4 g

⁴³ De acordo com a Diretiva (EUROPEAN UNION, 2009), a redução das emissões de GEE ocasionada pela substituição de um combustível fóssil por um biocombustível atualmente deve ser, no mínimo, de 35%, enquanto futuramente esse valor mínimo aumentará para 50% a partir de 2017, sendo 60% a partir de 2018 para as usinas novas, instaladas a partir de 2017.

CO₂e/MJ, 33,0 g CO₂e/MJ e 26,2 g CO₂e/MJ para os anos de 1995, 2005 e 2015, com uma redução em relação ao diesel de 51,9%, 62,6% e 70,3%, respectivamente para esses três anos. No entanto, o MJ considerado foi do Poder Calorífico Superior (PCS) enquanto a maioria dos estudos usa o PCI.

Segundo o autor, o modelo GHGenius usa dados específicos para o Canadá, com a exceção do fator de emissão para o N aplicado ao solo e a fração de N lixiviada ou volatilizada, que são os valores *default* do IPCC.

Esse mesmo estudo faz uma comparação das emissões estimadas utilizando outros softwares com o resultado encontrado pelo GHGenius. Nesse caso, usa a energia obtida pelo PCI. O valor do GHGenius foi de 28,0 g CO₂e/MJ (alocação por expansão do sistema), enquanto para outros modelos como UK RFA, SenterNov, BioGrace (todos com alocação por conteúdo energético) esses valores foram 58,0 g CO₂e/MJ, 25,5 g CO₂e/MJ e 57,2 g CO₂e/MJ. Neste estudo, o valor encontrado para o biodiesel de soja incluindo o consumo e considerando a alocação por valor econômico foi de 53,1 g CO₂e/MJ, cerca do dobro do encontrado por O'Connor (2009).

Hu et al (2008) - China

Hu et al (2008) estimaram em 29,7 g CO₂/MJ as emissões do ciclo de vida para o biodiesel de soja produzido na China, com alocação por massa. Foram incluídas nesse valor as emissões relativas à produção e transporte de produtos químicos, ao cultivo, à colheita e ao transporte dos grãos de soja até a unidade de extração de óleo, à extração do óleo e o transporte até a unidade de transesterificação, à produção de biodiesel, e ao seu armazenamento e distribuição. As emissões do consumo do biodiesel foram consideradas nulas.

No entanto, esse valor incluiu somente as emissões de CO₂, pois outros gases foram estimados separadamente. As emissões de NO_x foram estimadas em todos esses processos, porém mais de 80% estão relacionadas à etapa de consumo do biodiesel. Não foram dados detalhes sobre a realização da estimativa de emissão de N₂O dos solos. As diferenças entre as fronteiras do estudo de Hu et al (2008) e as dessa dissertação dificultam comparações. Excluindo as emissões do consumo do biodiesel e realizando alocação por massa, as emissões do presente estudo foram de 25,0 g CO₂e/MJ. Esse

menor valor em comparação ao estudo dos autores supracitados pode ser explicado porque esta dissertação não inclui as emissões do transporte de produtos químicos e nem as de armazenamento e distribuição do biodiesel, embora inclua as emissões diretas e indiretas de N₂O dos solos. Para eles, a redução de emissões em relação ao diesel foi de 67%, enquanto para esta dissertação, assumidas as premissas explicadas neste trecho, foi de 70%.

Hoefnagels *et al* (2010) – Brasil e Estados Unidos/ Europa

Hoefnagels *et al* (2010) estimaram as emissões de biodiesel de soja, dendê, colza, pinhão-mansão e de outros biocombustíveis através da compilação de dados de alguns estudos e referências, e expressaram os resultados realizando os quatro tipos de alocação mencionados nesta dissertação. No caso do biodiesel de soja, as estimativas foram feitas para quatro casos. Em todos, o biodiesel de soja seria produzido na Europa a partir de óleo de soja importado, sendo, em três casos, do Brasil, e no outro, dos Estados Unidos. Os dois primeiros casos usaram dados *default* da Diretiva da União Europeia, sendo que a diferença entre os dois seria a glicerina usada como combustível em um. Os dois últimos tiveram como referência principal para os dados um estudo de Smeets *et al* (2009).

Entre esses casos, os resultados das emissões do biodiesel variaram de 119,8 a 174,4 g CO₂e/MJ sem consideração de alocação, enquanto com alocação, variaram entre 31,3 e 34,7 g CO₂e/MJ com alocação por massa, 52,4 e 59,2 g CO₂e/MJ com alocação por valor econômico, 46,1 e 51,8 g CO₂e/MJ com alocação por conteúdo energético, e 81,6 e 101,8 g CO₂e/MJ com alocação por substituição. Todos eles não levaram em consideração as emissões do consumo. Esta dissertação encontrou valor bem menor relacionado somente à produção quando não considerou nenhum tipo de alocação (85,1 g CO₂e/MJ), e valores mais próximos porém ainda menores quando foram consideradas as alocações por massa e por valor econômico, respectivamente: 25,0 e 49,1 g CO₂e/MJ. Essas diferenças podem ser em parte explicadas por conta do transporte do óleo até a Europa considerado por Hoefnagels *et al* (2010). Não se sabe o que foi considerado na etapa de cultivo, pois os estudos de referência não foram acessados, somente sabe-se que os autores também consideraram as emissões de N₂O dos solos.

EPE (2009) - Brasil

Esse estudo da EPE (2009) estimou em 0,57 kg CO₂e/kg de biodiesel as emissões do biodiesel metílico de soja, com a alocação por valor econômico feita somente entre produtos da fase de extração de óleo, e dessa forma as emissões foram divididas entre o óleo de soja e o farelo de soja, não incluindo a glicerina produzida na etapa de transesterificação. A distância considerada de deslocamento dos caminhões com grãos do campo até as unidades de extração de óleo foram maiores que nesta dissertação. Ainda sim, a quantidade de emissões estimadas por quantidade de biodiesel produzida foi muito inferior à do presente estudo, estimadas em 1,85 kg CO₂e/kg sem considerar as emissões do consumo. Essa diferença pode estar relacionada ao fato do estudo da EPE não incluir as emissões diretas e indiretas de N₂O dos solos, consideradas na presente dissertação, além das diferenças nas quantidades dos insumos utilizados, principalmente na etapa de cultivo.

Cherubini *et al* (2009)

Cherubini *et al* (2009) apenas analisaram o biodiesel de soja, colza e girassol em conjunto, pois seu estudo analisou e comparou as emissões de vários tipos de energia, fósseis e renováveis. Dessa forma, estimaram que o biodiesel de forma geral emitiria de 80 a 140 g CO₂e por km percorrido, enquanto o diesel emitiria de 185 a 220 g CO₂e/km, somando produção e consumo. De acordo com os autores, o biodiesel emite de 40 a 65% das emissões do diesel fóssil. No presente estudo, 1,122 t de biodiesel de soja com alocação por valor econômico emitem 64% das emissões de 1 t de diesel fóssil, resultado que se encontra dentro do intervalo proposto por Cherubini *et al* (2009).

5.3.2. Dendê

Souza *et al* (2010) - Brasil

Souza *et al* (2010) realizaram um balanço energético e analisaram as emissões do ciclo de vida para o biodiesel de dendê com base em dados de análises prévias feitas no Brasil e compararam seus resultados com os de outros estudos. As emissões foram medidas em t CO₂e/ha, inclusive as da etapa industrial e de transporte. O total de emissões de

GEE foi 1,901 tCO₂e/ha sem alocação e 1,436 t CO₂e/ha com alocação por massa. As emissões dos outros estudos que esses autores usaram de comparação – Wood & Corley (1991), Yusoff & Hansen (2007), Plenjai & Gheewala (2009) e Yee et al (2009) – também foram ajustadas para essa unidade funcional, e variaram entre 2,496 e 4,238 t CO₂e/ha sem alocação e 1,258 e 3,623 t CO₂e/ha com alocação por massa. Ajustando os valores da presente dissertação para t CO₂e/ha, as emissões foram de 3,150 t CO₂e/ha sem alocação e 3,122 t CO₂e/ha com alocação por massa, já descontando as emissões da combustão do biodiesel, que não foram estimadas por Souza *et al* (2010). Os autores estimaram que o uso de biodiesel de dendê evitaria emitir 80 kg CO₂e/GJ, considerando alocação por massa, enquanto a presente dissertação estimaram em 61,1 kg CO₂e/GJ as emissões evitadas, assumindo as mesmas premissas (alocação por massa e somente produção).

As diferenças entre o estudo de Souza *et al* (2010) e o presente estudo podem ser explicadas por diferenças no valor da produtividade média de óleo de dendê e diferenças no que foi ou não incluído nas fronteiras do sistema analisado, no caso, biodiesel de dendê. A produtividade média foi de 4,0 t biodiesel/ha, enquanto esta dissertação considerou uma produtividade de 3,2 t biodiesel/ha. Eles também consideraram o uso das fibras e cascas das amêndoas como combustível para geração de vapor e eletricidade, e incluíram a energia gerada pela queima do biogás do tratamento do efluente líquido⁴⁴ gerado na etapa industrial, o que não foi incluído neste estudo. Assumiram também que a energia gerada na própria usina seria suficiente para alimentar inclusive a unidade de transesterificação, somente necessitando do diesel para iniciar a queima dos restos orgânicos nas turbinas, além de que a energia produzida excedente seria vendida para a rede e as emissões evitadas seriam descontadas. Além disso, consideraram uma distância menor de transporte entre o cultivo e a indústria, uma menor quantidade de nitrogênio aplicada ao solo e usaram fatores de emissões menores para os agrotóxicos e metanol e maiores para o diesel e para a eletricidade da rede.

⁴⁴ A geração de biogás inclui emissões de CH₄ para atmosfera; no entanto a queima desse biogás pode gerar energia além de evitar as emissões de CH₄.

Diretiva Europeia sobre Energias Renováveis (2009) - Europa

Os valores *default* da Diretiva da União Europeia para as emissões do biodiesel de dendê são 14 g CO₂e/MJ para a etapa do cultivo e 18 ou 49 para a etapa industrial, dependendo se há ou não captura de metano do tratamento dos efluentes, além de 5 g CO₂e/MJ para a etapa de transporte e distribuição (EUROPEAN UNION, 2009). A redução *default* de uso de biodiesel em substituição ao diesel fóssil considerada pela diretiva é de 19% ou 56%, dependendo novamente da captura de metano. Os resultados encontrados no presente estudo foram adequados em g CO₂e/MJ para permitir a comparação. Assim como explicado na seção 5.2.1, não ficou claro se estes resultados seguem a metodologia proposta pela Diretiva e nem se consideram ou não a alocação por conteúdo energético entre os coprodutos. Já nesta dissertação, a redução foi de 68,4% sem alocação e de 71,4% com alocação por valor econômico, se desconsideradas as emissões do consumo do biocombustível. Para efeito de comparação, as emissões totais da etapa agrícola e da etapa industrial encontradas nesta dissertação foram 14,9 g CO₂e/MJ e 10,8 g CO₂e/MJ, respectivamente. As emissões da etapa agrícola foram bem semelhantes em entre este estudo e os valores *default* da Diretiva, e as da etapa industrial, bastante diferentes. Essa diferença talvez seja explicada por este trabalho não ter considerado as emissões relativas ao tratamento ou disposição do efluente líquido gerado na etapa industrial.

O'Connor (2011)

Diferente da análise para o biodiesel de soja, para o biodiesel de dendê o autor apenas fez a comparação do resultado encontrado no GHGenius, 36,8 g CO₂e/MJ (alocação por expansão do sistema), com os encontrados usando outros modelos, de 46,8 g CO₂e/MJ para o UK RFA, 45,4 g CO₂e/MJ para o SenterNov, e 68,7 g CO₂e/MJ para o BioGrace, todos com alocação por conteúdo energético. Esta dissertação obteve como resultado valores bastante inferiores, de 23,7 e 22,0 g CO₂e/MJ usando alocação por valor econômico e por massa, respectivamente.

Hoefnagels *et al* (2010) – Sudeste da Ásia/Europa

Para o biodiesel de dendê, assim como feito para o de soja, as estimativas foram realizadas para o biocombustível feito na Europa a partir de óleo de palma importado do

Sudeste da Ásia, para três casos diferentes. Sem considerar alocação, os resultados encontrados variaram entre 56,7 e 61,4 g CO₂e/MJ, enquanto com alocação, variaram entre 47,7 e 53,7 g CO₂e/MJ com alocação por massa, 52,5 e 58,2 g CO₂e/MJ com alocação por valor econômico, 52,4 e 56,5 g CO₂e/MJ com alocação por conteúdo energético, e 49,2 e 56,8 g CO₂e/MJ com alocação por substituição. Sem considerar as emissões do consumo, esta dissertação estimou em 26,2 g CO₂e/MJ as emissões do biodiesel de dendê sem alocação, enquanto com alocação por valor econômico e por massa as emissões foram estimadas, respectivamente, em 23,7 e 21,9 g CO₂e/MJ. Todos os valores equivalem a cerca de metade dos valores encontrados por Hoefnagels *et al* (2010).

EPE (2009) - Brasil

O estudo da EPE (2009) estimou em 0,30 kg CO₂e/kg de biodiesel as emissões do biodiesel metílico de dendê, com a alocação por valor econômico feita somente entre produtos da fase de extração de óleo, e dessa forma as emissões foram divididas entre o óleo de dendê e óleo de palmiste, não incluindo a torta de palmiste e nem a glicerina da etapa de transesterificação. A produtividade média anual considerada, 12,3 t de cff/ha foi menor que a do presente estudo. Ainda sim, as emissões estimadas por quantidade de biodiesel produzida foram cerca de um terço menores que as do presente estudo, estimadas em 0,98 kg CO₂e/kg, sem considerar a etapa do consumo. Essa diferença, assim como para a soja, provavelmente está relacionada ao fato do estudo da EPE (2009) não incluir as emissões diretas e indiretas de N₂O dos solos, consideradas na presente dissertação. Além disso, existem diferenças entre a quantidade de materiais considerados, principalmente na etapa de cultivo.

IEA (2011)

A Agência Internacional de Energia (IEA, 2011) apresentou, em uma de suas publicações, um intervalo de redução de emissões do uso do biodiesel de dendê comparado ao diesel fóssil de 20 a 80%. Os resultados de redução de 63,6% e 66,6%, respectivamente sem e com alocação por valor econômico, encontrados nesta dissertação, ficaram dentro desse intervalo.

5.4. Outros aspectos ambientais da produção e uso de biodiesel

O balanço energético e o balanço de emissões não são os únicos aspectos importantes para se avaliar o desempenho ambiental de um biocombustível, embora sejam os mais comentados e analisados. A Global Bioenergy Partnership (GBEP) publicou uma série de indicadores ambientais, sociais e econômicos, e suas respectivas metodologias, para avaliar os biocombustíveis, de forma a contribuir para que os políticos e tomadores de decisão possam desenvolver políticas e programas monitorando seus impactos (GBEP, 2011). Os indicadores ambientais propostos são: emissões de GEE do ciclo de vida, qualidade do solo, níveis de colheita de recursos madeireiros, emissões de poluentes não GEE, uso da água e sua eficiência, qualidade da água, diversidade biológica na paisagem, uso do solo e mudança do uso do solo relacionada com a produção de matéria-prima para o biocombustível.

A análise desses outros aspectos ambientais que não as emissões de GEE foge do objetivo deste estudo. No entanto, os parágrafos seguintes resumem resultados interessantes encontrados por Vries *et al* (2010).

Vries *et al* (2010) avaliaram nove biocombustíveis de primeira geração, entre eles biodiesel de soja nos Estados Unidos e de dendê da Malásia, através de alguns indicadores de sustentabilidade focados na etapa agrícola: rendimento energético, emissões de GEE e impactos sobre o agroecossistema, analisando aspectos como erosão do solo, matéria orgânica do solo (MOS), risco de doenças do solo, potencial de eutrofização de corpos aquáticos, uso de pesticidas e uso de água. Esses indicadores de impactos sobre o agroecossistema foram analisados das seguintes maneiras:

- Erosão do solo: avaliado através da Equação Universal de Perda de Solo (USLE), combinada com dados de erosão pluvial e de cobertura do solo para cada lavoura;
- MOS: avaliado através da quantidade de MOS que ainda está presente no solo após um ano de aplicação dos resíduos;
- Vulnerabilidade de doenças do solo: avaliado em função de restrições de rotação e redução nos rendimentos;

- Potencial de eutrofização: avaliado através do parâmetro “uso eficiente de nitrogênio”, medido pela relação entre o rendimento energético líquido por hectare da cultura e a quantidade de N aplicada;
- Uso de pesticida: avaliado através do parâmetro “uso eficiente de pesticida”, medido pela relação entre o rendimento energético líquido por hectare da cultura e a quantidade de pesticida aplicada;
- Uso da água: avaliado através do parâmetro “water productivity”, definida pelos autores como a quantidade de energia líquida contida no biocombustível que é produzida com 1 m³ de perda de água por evapotranspiração (sem considerar a água usada no processo industrial).

Os resultados encontrados por esses autores foram que, para quase todos os indicadores analisados, o dendê apresentou menores impactos que a soja. O único indicador no qual a soja apresentou menor impacto que o dendê foi o potencial de eutrofização, já que a soja já que consegue fixar N através de rizóbios e assim necessita de menor entrada de fertilizante nitrogenado.

Em relação ao uso do biodiesel, assim como o diesel, sua combustão emite também gases poluentes que contribuem para a redução da qualidade do ar nas cidades. Visto que o biodiesel de soja e o biodiesel de dendê foram tratados como iguais na etapa de consumo nessa dissertação, não há nenhuma diferença nas emissões de poluentes entre os dois. A Tabela 44 apresenta as reduções nas emissões de poluentes ocasionadas pelo uso do biodiesel puro ou misturado nas proporções de 5 e 20% ao diesel em relação ao diesel fóssil puro. Essas reduções já foram comentadas e seus impactos no ambiente e na saúde humana já foram discutidos no capítulo 1.

Tabela 44 – Reduções em emissões de poluentes da combustão de biodiesel B100 e das misturas B20 e B5 em relação ao diesel puro (Os sinais negativos representam um aumento na emissão do gás).

EMISSIONES (%)			
	B100	B20	B5
CO	48	15	7
HC	67	20	5
MP	47	15	8
SOx	100	20	5
NOx	- 10 a 20	- 2 a 4	< - 1

Fonte: FETRANSPOR (2011)

6. CONCLUSÃO

Existem vantagens e desvantagens de caráter técnico, econômico, social e ambiental da substituição parcial do diesel por biodiesel nos motores de meios de transporte rodoviário. No Brasil, algumas dessas vantagens serviram de apoio ao início de um programa de incentivo à produção do biodiesel, o PNPB. Através dele, o país vem assumindo um papel de destaque no cenário mundial de produção desse biocombustível, antes ocupado apenas por países europeus e os Estados Unidos. No entanto, desde o seu surgimento, o Programa vêm esbarrando em várias dificuldades, principalmente em relação à aquisição de matérias-primas. As metas iniciais de participação da agricultura familiar e de diversificação das matérias-primas usadas como base foram reduzidas e atualmente o Programa se encontra totalmente dependente das grandes empresas produtoras de soja.

A soja, reconhecidamente a oleaginosa mais produzida no Brasil, tem conseguido alimentar a maior parte da indústria de biodiesel por possuir uma cadeia produtiva bem estruturada e antiga, e se beneficia do fato do óleo não ser o principal produto pretendido com o seu processamento. De acordo com Lima & Castro (2010b), o litro do óleo de soja seria significativamente mais caro se o cultivo de soja fosse dedicado a esse produto, como acontece com o cultivo de dendê. Este, por outro lado, praticamente não é usado na produção de biodiesel, embora esta tenha sido, juntamente com a mamona, a oleaginosa que mais recebeu incentivo governamental no PNPB.

Atualmente, enquanto a área plantada com soja no Brasil equivale a mais de duzentas vezes a área plantada com palma, a quantidade produzida de grãos de soja equivale a cerca de cinquenta vezes a quantidade produzida de cachos de frutos frescos de dendê. Isso acontece porque o dendê é uma cultura perene, que produz frutos ao longo do ano todo, em um ciclo que dura cerca de 25 anos, enquanto a soja é uma cultura anual e só é feita uma colheita a cada plantio. Ainda que o teor de óleo no dendê não seja muito superior ao da soja, a produção de óleo por hectare é muito maior para o dendê. Dessa forma, este estudo calculou serem necessários 1,9 hectares plantados com soja para a produção de uma tonelada de biodiesel, enquanto 0,3 hectares de dendê são suficientes para produzir a mesma quantidade em um ano.

O balanço de emissões é um dos aspectos que mais vêm sendo utilizados para comparar biocombustíveis entre si e com combustíveis fósseis. O maior rendimento na lavoura do dendê e a utilização de restos da cultura no suprimento de energia aos processos de extração do óleo de dendê tiveram grande contribuição para um balanço de emissões mais favorável do biodiesel de dendê em relação ao de soja. A realização de alocação exerceu grande influência no resultado para o biodiesel de soja e pouca influência para o de dendê. Foi verificado também que a escolha de um método de alocação em detrimento de outro pode resultar em uma grande variação nos resultados.

Dessa forma, conclui-se que o biodiesel de dendê pode contribuir ainda mais para a redução das emissões de GEE do que o biodiesel que é utilizado atualmente misturado ao diesel. No entanto, seria necessário ao menos dobrar a área plantada de forma que o aumento da produção consiga suprir a demanda interna tradicional de óleo de dendê e ainda alimentar parte da indústria do biocombustível. Essa expansão deve acontecer somente em áreas degradadas que existem no país, principalmente na Amazônia, local mais propício para o cultivo da palmácea. De forma geral, a conversão de florestas ou outros tipos de vegetação nativa no cultivo de biocombustíveis provoca uma dívida de carbono e um balanço negativo para vários tipos de biodiesel, inclusive o de soja e o de dendê, conforme mostrado em vários estudos.

De forma geral, o dendê também se mostrou favorável à soja em relação a outros aspectos ambientais, relacionados aos impactos ocasionados pela etapa agrícola, por causa do seu caráter perene.

Os resultados deste estudo não foram muito distantes de outros encontrados na literatura para ambas as oleaginosas, ainda que tenham sido menores em comparação com alguns estudos e maiores em comparação com outros. Uma análise de sensibilidade se faz necessária para aumentar a confiabilidade dos resultados. Mesmo buscando assumir premissas que estão de acordo com princípios da ACV e com a literatura analisada, a arbitrariedade nas escolhas do que é incluído nas fronteiras dos sistemas analisados teve influência sobre os resultados aqui encontrados, assim como em grande parte da literatura analisada, pois nenhuma metodologia específica é seguida. Além disso, existem muitas incertezas em relação a algumas estimativas, principalmente na etapa agrícola, como as emissões de óxido nitroso dos solos. Portanto, se faz necessária uma

maior maturidade da ciência tanto na parte de emissões dos solos como na parte metodológica, de forma que as escolhas adotadas pelos autores dos estudos causem menores variações nos resultados finais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIOVE (Associação Brasileira de Indústrias de Óleos Vegetais). **Complexo Soja - Evolução das Cotações Médias – 2011**, ABIOVE, 2012. Disponível em: http://www.abiove.com.br/cotacoes_br_11.html, acesso em março de 2012.

ALVES, B.J.R. “Emissões de óxido nitroso de solos agrícolas e de manejo de dejetos – Relatório de Referência”. In: Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT). **Segundo Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa**, Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia e Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMPRABA – Meio Ambiente), Brasil, 2010.

ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis). **Folder Biocombustíveis**, 2010. Disponível em: www.anp.gov.br/?id=470, acesso em dezembro de 2011.

ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis). **Leilões de Biodiesel**, 2011a. Disponível em: www.anp.gov.br/?pg=57890, acesso em dezembro de 2011.

ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis). **O Anuário Estatístico Brasileiro de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2011**, 2011b. Disponível em: www.anp.gov.br/?pg=57890, acesso em outubro de 2011.

ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis). **Dados Estatísticos Mensais – Produção de Biodiesel**, 2012a. Disponível em: www.anp.gov.br, acesso em fevereiro de 2012.

ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis). **Boletim Mensal do Biodiesel**, 2012b. Disponível em: www.anp.gov.br/biocombustiveis/biodiesel, último acesso em fevereiro de 2012.

ARREDONDO, H.I.V. *Avaliação Exergética e Exergo-Ambiental da Produção de Biocombustíveis*. Dissertação de M.Sc., Escola Politécnica, USP, São Paulo, SP, Brasil, 2009.

AVZARADEL, A.C. *A Contribuição da Política Estadual para Viabilizar a Participação da Agricultura Familiar no Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel: O Caso Da Bahia*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.

BERGHOUT, N.A. *Technological Learning in the German Biodiesel Industry: an Experience Curve Approach to Quantify Reductions in Production Costs, Energy Use and Greenhouse Gas Emissions*. Master thesis, Utrecht University, Copernicus Institute, The Netherlands, 2008.

BIODIESELBR. “Biodiesel cria borra e bactérias nos motores, dizem distribuidoras”, retirado de Agência Estado, 14 mai. 2010. Disponível em: <http://www.biodieselbr.com/noticias/em-foco/biodiesel-cria-borra-bacterias-motores-distribuidoras-140510.htm>, acesso em dezembro de 2011.

BIODIESELBR. **História e Biodiesel**, 2011a. Disponível em: www.biodieselbr.com/biodiesel/historia/biodiesel-historia.htm, acesso em dezembro de 2011.

BIODIESELBR. **Biodiesel no Mundo**, 2011b. Disponível em: www.biodieselbr.com/biodiesel/mundo/biodiesel-no-mundo.htm, acesso em dezembro de 2011.

BIODIESELBR. **Craqueamento**, 2011c. Disponível em: www.biodieselbr.com/biodiesel/processo-producao/craqueamento.htm, acesso em dezembro de 2011.

BLOGS PETROBRÁS – FATOS E DADOS. Boas perspectivas em todas as áreas para 2012, 1 jan de 2012. Disponível em: fatosedados.blogspetrobras.com.br, acesso em março de 2012.

BRASIL. Lei nº 11.097, de 13 de janeiro de 2005, Casa Civil da Presidência da República, Brasil, 2005.

BUZZATTI, M. *Elementos para uma Ação de Mitigação Nacionalmente Adequada (Nama) a Partir da Produção de Biodiesel de Óleo de Dendê pela Agricultura Familiar no Brasil*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2011.

CAMARA ARGENTINA DE ENERGIAS RENOVABLES, **Biodiesel**, 2011.
Disponível em: www.biodiesel.com.ar, acesso em dezembro de 2011.

CARRARETTO, C., MACOR, A., MIRANDOLA, A., *et al.* “Biodiesel as alternative fuel: Experimental analysis and energetic evaluations”, **Energy** v. 29, pp. 2195–2211, 2004.

CARVALHO, C. O. *Comparação entre Métodos de Extração do Óleo de Mauritia Flexuosa L.f. (Arecaceae - Buriti) para o Uso Sustentável na Reserva de Desenvolvimento Tupé: Rendimento e Atividade Antimicrobiana*. Dissertação de M.Sc., Escola Superior de Ciências da Saúde, UEA (Universidade do Estado do Amazonas), Manaus, AM, 2011.

CASTRO, C.N. “Comercialização varejista e atacadista de biodiesel no Brasil”. In: CASTRO, A.M.G., LIMA, S.M.V., SILVA, J.F.V. (eds), **Complexo Agroindustrial de Biodiesel no Brasil: Competitividade das Cadeias Produtivas de Matérias-Primas**, 1 ed., capítulo 4, Embrapa Agroenergia, Brasília, DF, 2010.

CASTRO, A.M.G. & LIMA, S.M.V. “Estratégias para a competitividade do biodiesel”. In: CASTRO, A.M.G, LIMA, S.M.V., SILVA, J.F.V. (eds), **Complexo Agroindustrial de Biodiesel no Brasil: Competitividade das Cadeias Produtivas de Matérias-Primas**, 1 ed., capítulo 14, Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2010a.

CASTRO, A.M.G & LIMA, S.M.V. “Fatores críticos de competitividade das cadeias produtivas de biodiesel”. In: CASTRO, A.M.G., LIMA, S.M.V., SILVA, J.F.V. (eds), **Complexo Agroindustrial de Biodiesel no Brasil: Competitividade das Cadeias Produtivas de Matérias-Primas**, 1 ed., capítulo 13, Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2010b.

CASTRO, C.N.; AGUIAR, J.; ROCHA, M.G.; *et al.* “Ambientes institucional e organizacional do CAI do biodiesel”. In: CASTRO, A.M.G., LIMA, S.M.V., SILVA, J.F.V. (eds), **Complexo Agroindustrial de Biodiesel no Brasil: Competitividade das**

Cadeias Produtivas de Matérias-Primas, 1 ed., capítulo 12, Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2010a.

CASTRO, A.M.G; LIMA, S.M.V.; PINHEIRO, N.P. “A indústria de produção de biodiesel no Brasil”. In: CASTRO, A.M.G., LIMA, S.M.V., SILVA, J.F.V. (eds), **Complexo Agroindustrial de Biodiesel no Brasil: Competitividade das Cadeias Produtivas de Matérias-Primas**, 1 ed., capítulo 5, Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2010b.

CAVALETT, O. & ORTEGA, E. “Integrated environmental assessment of biodiesel production from soybean in Brazil”, **Journal of Cleaner Production** v. 18, pp. 55–70, 2010.

CENBIO (Centro Nacional de Referência em Biomassa). **Conceituando Biomassa**, 2012. Disponível em: cenbio.iee.usp.br/saibamais/conceituando, acesso em março de 2012.

CHERUBINI, F., BIRD, N.D., COWIE, A., *et al.* “Energy- and greenhouse gas-based LCA of biofuel and bioenergy systems: Key issues, ranges and recommendations”, **Resources, Conservation and Recycling** v. 53, pp. 434-447, 2009.

CHERUBINI, F. “GHG balances of bioenergy systems – Overview of key steps in the production chain and methodological concerns”, **Renewable Energy** v. 35, pp. 1565–1573, 2010.

COINFRA (Conselho Permanente de Infraestrutura). **O Mercado de Biodiesel no Brasil - Relatório**, COINFRA, CNI, 2007.

CONAB (Companhia de Abastecimento Nacional). **Séries Históricas**, 2012. Disponível em: www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&t=, acesso em fevereiro de 2012.

CONCAWE/EUCAR/JRC. **Well-to-wheels study in version 3**, CONCAWE (European association for environment, health and safety in oil refining and distribution), EUCAR (European Council for Automotive R&D) & JRC/IES (Institute for Environment and Sustainability of the EU Commission’s Joint Research Centre), 2008.

CRUTZEN, P.J., MOSIER, A.R., SMITH, K.A., *et al.* “N₂O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels”, **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 8, pp.389-395, 2008.

CRUZ, L. “Produtores de biodiesel terão abatimento de 50% do crédito de PIS/Cofins”, Agência Brasil, Brasília, 15 dez. 2011. Disponível em: <http://agenciabrasil.ebc.com.br/noticia/2011-12-15/produtores-de-biodiesel-terao-abatimento-de-50-do-credito-de-pis-cofins-na-compra-de-insumos>, acesso em dezembro de 2011.

DAVIS, S.C., ANDERSON-TEIXEIRA, C.J., DELUCIA, E.H. “Life-cycle analysis and the ecology of biofuels”, **Trends in Plant Science**, v.14, n.3, pp. 140-146, 2009.

DIEESE (Departamento Intersindical de Estatística e Estudos Socioeconômicos). **Estatísticas do meio rural 2010-2011**, 4.ed., Departamento Intersindical de Estatística e Estudos Socioeconômicos; Núcleo de Estudos Agrários e Desenvolvimento Rural; Ministério do Desenvolvimento Agrário, São Paulo, 2011.

DUARTE, A. “Purificação de glicerina não tem espaço nas usinas de biodiesel”, Portal BiodieselBR, 23 jun. 2010. Disponível em: www.biodieselbr.com, acesso em março de 2012.

EDENHOFER, O., PICHS-MADRUGA, R., SOKONA, Y., *et al.* Summary for Policy Makers. In: Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., *et al* (eds), **IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation**, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2011.

EMERGING MARKETS ONLINE. **World Biodiesel Production and Capacity**, 2011. Disponível em: www.emerging-markets.com, acesso em janeiro de 2012.

EPE (Empresa de Pesquisa Energética). **Estudos EPE: Potencial de Redução de Emissões de CO₂ em Projetos de Produção e Uso de Biocombustíveis**. Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro, RJ, 2009. Disponível em: www.epe.gov.br/Petroleo/Paginas/EstudodoEmpregodeCr%C3%A9ditosdeCarbonoemProjetosdeProdu%C3%A7%C3%A3oeUsodeBiocombust%C3%AdivisnoBrasilcomBa

[senoProtocolodeQuioto%E2%80%933Relat%C3%B3rios.aspx](#), acesso em janeiro de 2012.

EPE (Empresa de Pesquisa Energética). **Balanço Energético Nacional**. Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro, RJ, 2011a.

EPE (Empresa de Pesquisa Energética). **Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis: Janeiro 2010 – Dezembro 2010**. Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro, RJ 2011b.

EUROPEAN UNION. **Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council**, 2009.

FAO (Food and Agriculture Organization of United Nations), **The State of Food and Agriculture - Biofuels: prospects, risks and opportunities**, FAO, Roma, 2008.

FAO (Food and Agriculture Organization of United Nations), **Bioenergy and Food Security: The BEFS Analytical Framework**, Environment and Natural Resources Management Series, n. 16, FAO, Roma, 2010.

FAO (Food and Agriculture Organization of United Nations), **Fertilizer use by crop in Brazil**, v. 1, Roma, 2004. Disponível em: <ftp.fao.org/agl/agll/docs/fertusebrazil.pdf>, acesso em janeiro de 2012.

FARGIONE, J., HILL, J., TILMAN, D., *et al.* “Land Clearing and the Biofuel Carbon Debt”, **Science**, v. 319, pp. 1235-1238, 2008.

FERREIRA, O.C., SILVA, C.A.F.A., GUIDICINI, O.Y.M., *et al.*, “Emissões de gases de efeito estufa no transporte rodoviário – Relatório de Referência”. In: Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT). **Segundo Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa**, Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia e Organização da Sociedade Civil de Interesse Público Economia e Energia (OSCIPE&E), Brasil, 2010a.

FERREIRA, O.C., SILVA, C.A.F.A., GUIDICINI, O.Y.M., *et al.*, “Emissões de dióxido de carbono por queima de combustíveis: abordagem bottom-up – Relatório de

referência”. In: Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT). **Segundo Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa**, Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia e Organização da Sociedade Civil de Interesse Público Economia e Energia (OSCIP E&E), Brasil, 2010b.

FETRANSPOR (Federação das Empresas de Transportes de Passageiros do Estado do Rio de Janeiro). **Biodiesel B20 – O Rio de Janeiro anda na frente**. Rio de Janeiro, RJ, 2011.

GARCIA, J.R. *O Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel Brasileiro e a Agricultura Familiar no Nordeste*. Dissertação de M.Sc., Instituto de Economia, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil, 2007.

GAZZONI, D.L., FELICI, P.H.N., CORONATO, R.N.S., *et al.* “Balanço Energético das Culturas de Girassol e Soja para Produção de Biodiesel”, **Biomassa & Energia**, v. 2, n. 4, p. 259-265, 2005.

GBEP (GLOBAL BIOENERGY PARTNERSHIP). **The Global Bioenergy Partnership Sustainability Indicators for Bioenergy**, FAO, Rome, Italy, 2011.

GERIS, R., SANTOS, N.A.C, AMARAL, B.A., *et al.* “Biodiesel de soja: reação de transesterificação para aulas práticas de química orgânica”, **Quím. Nova**, v. 30, n. 5, 2007. Disponível em: www.scielo.br, acesso em março de 2012.

GERMAN, L., SCHONEVELD, G., SKUTCH, M., *et al.* “The local social and environmental impacts of biofuel feedstock expansion: A synthesis of case studies from Asia, Africa and Latin America”, **CIFOR Infobriefs**, n. 34, December 2010.

GNANSOUNOU, E., DAURIAT, A., PANICHELLI, L., *et al.* “Energy and greenhouse gas balances of biofuels: biases induced by LCA modeling choices”, **Journal of Scientific & Industrial Research**, v.67, pp. 885–897, 2008a.

GNANSOUNOU, E., DAURIAT, A., PANICHELLI, L., *et al.* **Estimating Energy and Greenhouse gas balances of biofuels: Concepts and methodologies**, Working Paper Ref. 437.100, Ecôle Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, France, 2008b.

GNANSOUNOU, E., DAURIAT, A., VILLEGAS, J., *et al.* “Life cycle assessment of biofuels: Energy and greenhouse gas balances”, **Bioresource Technology**, v.100, pp. 4919–4930, 2009.

GÓMEZ, D.R., WATTERSON, J.D., AMERICANO, B.B., *et al.*, “Stationary combustion”. In: Eggleston, S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K. (eds.), **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories – Volume 2**, Capítulo 2, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, IGES, Japão, 2006.

HILL, J., NELSON, E., TILMAN, D., *et al.* “Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels”, **PNAS**, v. 13, n. 30, pp.11206-11210.

HOEFNAGELS, R., SMEETS, E., FAAIJ, A. “Greenhouse gas footprints of different biofuel production systems”, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, pp. 1661–1694, 2010.

HU, Z., TAN, P., YAN, X., *et al.* "Life cycle energy, environment and economic assessment of soybean-based biodiesel as an alternative automotive fuel in China", **Energy**, v. 33, pp.1654–1658, 2008.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). SIDRA (Sistema IBGE de Recuperação Automática), Produção Agrícola Municipal. IBGE, 2012. Disponível em: www.sidra.ibge.gov.br, acesso em janeiro de 2012.

IBP (INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO, GÁS E BIOCOMBUSTÍVEIS) & COPPEAD/UFRJ. **Planejamento Estratégico Tecnológico e Logístico para o Programa Nacional de Biodiesel**. Rio de Janeiro, 2007. Disponível em www.ibp.org.br/main.asp?View={C2A7D82F-1D0E-4574-A464-032C08DE8BDA}, acesso em janeiro de 2012.

IEA (International Energy Agency). **Technology Roadmap Biofuels for Transport**, IEA, Paris, France, 2011.

INDEX MUNDI. **Preços de Mercado**. INDEX MUNDI, 2012. Disponível em: www.indexmundi.com/pt/pre%C3%A7os-de-mercado, acesso em março de 2012.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, IGES, Japão, 2006.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). “Summary for Policymakers”. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L. (eds). **Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, , 2007.

IPEA (Instituto Econômico de Pesquisa Aplicada). **Biocombustíveis no Brasil: Etanol e Biodiesel**, Comunicados do IPEA nº53, In: Série Eixos do Desenvolvimento Brasileiro, 2010.

ITAIPU BINACIONAL & FAO. **Agroenergia da biomassa residual: perspectivas energéticas, socioeconômicas e ambientais**, 2 ed. rev., Foz do Iguaçu, PR/Brasília, DF, Technopolitik Editora, 2009.

KHALIL, C. N. “As tecnologias de produção de biodiesel”. In: CRISTO, C.M.P.N. (coord), **O Futuro da Indústria: Biodiesel - Coletânea de Artigos**, Série Política Industrial, Tecnológica e de Comércio Exterior, 14, MDIC (Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior), Instituto Euvaldo Lodi – IEL/Núcleo Central. Brasília, DF: MDIC-STI/IEL, 2006.

KLEIN, C., NOVOA, R.S.A., OGLE, S., *et al.* “N₂O Emissions From Managed Soils, and CO₂ Emissions From Lime and Urea Application”. In: Eggleston, S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K. (eds.), **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories – Volume 4**, Capítulo 11, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, IGES, Japão, 2006.

LASCO, R.D., OGLE, S., RAISON, J., *et al.* “Cropland ”. In: Eggleston, S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K. (eds.), **2006 IPCC Guidelines for National**

Greenhouse Gas Inventories – Volume 4, Capítulo 5, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, IGES, Japão, 2006.

LÉCHON, Y., CABAL, H., DE LA RÚA, C. “Energy and greenhouse gas emission savings of biofuels in Spain’s transport fuel. The adoption of the EU policy on biofuels”, **Biomass & Bioenergy**, v. 33, pp. 920-932, 2009.

LIMA, M.A., LUIZ, A.J.B, VIERA, R.F., *et al*, “Emissões de óxido nitroso (N₂O) provenientes de solos agrícolas – Relatório de Referência”. In: Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT). **Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa**, Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia e Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMPRABA – Meio Ambiente), Brasil, 2006.

LIMA, S.M.V. & CASTRO, A.M.G. “O agronegócio do biodiesel e suas matérias-primas”. In: CASTRO, A.M.G., LIMA, S.M.V., SILVA, J.F.V. (eds), **Complexo Agroindustrial de Biodiesel no Brasil: Competitividade das Cadeias Produtivas de Matérias-Primas**, 1 ed., capítulo 2, Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2010a.

LIMA, S.M.V. & CASTRO, A.M.G. “A agroindústria de óleo vegetal para a produção de biodiesel”. In: CASTRO, A.M.G., LIMA, S.M.V., SILVA, J.F.V. (eds), **Complexo Agroindustrial de Biodiesel no Brasil: Competitividade das Cadeias Produtivas de Matérias-Primas**, 1 ed., capítulo 6, Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2010b.

LOBO, L.F.L.F. *Cálculo das Propriedades Físico-Químicas das Principais Matérias-Primas e Produtos da Reação de Obtenção do Biodiesel*. Dissertação de M.Sc., UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.

MACEDO, I.C., SEABRA, J.E.A., SILVA, J.E.A.R. “Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020”, **Biomass & Bioenergy**, v. 32, pp. 582-595, 2008.

MACEDO, J.L.V., ROCHA, A.C.P.N., LIMA, S.M.V., *et al*. “Sistema produtivo de dendê para a produção de biodiesel”. In: CASTRO, A.M.G., LIMA, S.M.V., SILVA, J.F.V. (eds), **Complexo Agroindustrial de Biodiesel no Brasil: Competitividade das Cadeias Produtivas de Matérias-Primas**, 1 ed., capítulo 8, Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2010.

MACQUEEN, D. AND KORHALILLER, S. **Bundles of energy: The case for renewable biomass energy**, In: Natural Resource Issues n. 24, IIED (International Institute for Environment and Development), London, 2011.

MARZULLO, R.C.M. *Análise da Ecoeficiência dos Óleos Vegetais Oriundos da Soja e da Palma, Visando a Produção de Biodiesel*. Dissertação de M.Sc., Escola Politécnica, USP, São Paulo, SP, Brasil, 2007.

MCT (MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA). **Fatores de Emissão de CO₂ para utilizações que necessitam do fator médio de emissão do Sistema Interligado Nacional do Brasil**. MCT, Brasília, Brasil, 2012. Disponível em: www.mct.gov.br/index.php/content/view/74694.html, acessado em fevereiro de 2012.

MDA (MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO AGRÁRIO). **Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel**, MDA, Brasília, Brasil, 2011.

MENDONÇA, R.M.L. *Avaliação do Ciclo de Vida do Carbono na Queima do Biodiesel à Base de Óleo de Soja*. Dissertação de M.Sc., Faculdade de Tecnologia, UNB, Brasília, DF, Brasil, 2007.

MMA (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE). **1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários**, MMA, Brasília, Brasil, 2011.

MME (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA). **Biodiesel - O Novo Combustível do Brasil**, MME, Brasília, Brasil, 2004. Disponível em: www.mme.gov.br/programas/biodiesel/galerias/arquivos/biodiesel/cartilha_biodiesel_p_ortugues.pdf, acessado em agosto de 2011.

MME (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA). **Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel**, 2011. Disponível em www.mme.gov.br/programas/biodiesel, acesso em dezembro de 2011.

MONTEIRO, J.M.G. *Plantio de Oleaginosas por Agricultores Familiares do Semi-árido Nordestino para Produção de Biodiesel como uma Estratégia de Mitigação e*

Adaptação às Mudanças Climáticas. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.

MORTIMER, N.D., CORMACK, P., ELSAYED, M.A., *et al.* **Evaluation of the Comparative Energy, Global Warming and Socio-Economic Costs and Benefits of Biodiesel**, Department for Environment, Food and Rural Affairs, School of Environment and Development, Sheffield Hallam University, UK, 2003.

MOURAD, A.L. *Avaliação da Cadeia Produtiva de Biodiesel Obtido Através da Soja*. Tese de D.Sc, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil, 2008.

NEUTZLING, D.M. *Sustentabilidade em uma Cadeia de Biodiesel no Rio Grande do Sul com Foco na Agroindústria Produtora*. Dissertação de M.Sc., Centro de Estudos e Pesquisas em Agronegócios, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil, 2009.

O'CONNOR, D. **Biodiesel GHG Emissions, Past, Present, and Future**. In: A Report To IEA Bioenergy Task 39. Delta, BC, Canada, 2011.

OBERMAIER, M., HERRERA, S., LA ROVERE, E.L. “Análise de problemas estruturais da inclusão da agricultura familiar na cadeia produtiva de biodiesel”, In: **IV Congresso Brasileiro de Mamona e I Simpósio Internacional de Oleaginosas Energéticas**, pp. 326-331, João Pessoa, Paraíba, 2010.

OLIVEIRA, L.B. *Potencial de Aproveitamento Energético de Lixo e de Biodiesel de Insumos Residuais no Brasil*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004.

ONU (Organização das Nações Unidas). “FAO assina convênio para recuperar áreas degradadas na Amazônia”, Centro de Informações das Nações Unidas (UNIC) Rio de Janeiro, 17 nov. 2010. Disponível em: unicrio.org.br, acesso em março de 2012.

OSBORNE, B.; SAUNDERS, M., WALMSLEY, D., *et al.* “Key questions and uncertainties associated with the assessment of the cropland greenhouse gas balance”, **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 139, pp. 293–301, 2010.

PARADIGMA. **Extração do Óleo da Polpa**. Paradigma Consultoria e Projetos, 2012. Disponível em: www.paradigma.ind.br, acesso em março de 2012.

PARENTE, E.J.S. **Biodiesel: uma Aventura Tecnológica num País Engraçado**, Fortaleza, CE, 2003. Disponível em: <http://pt.scribd.com/doc/63748762/BIODIESEL-UMA-AVENTURA-TECNOLOGICA-NUM-PAIS-ENGRACADO>, acesso em novembro de 2011.

PARENTE, E.J.S. “Biodiesel no Plural”, In: CRISTO, C.M.P.N. (coord), **O Futuro da Indústria: Biodiesel - Coletânea de Artigos**, Série Política Industrial, Tecnológica e de Comércio Exterior, 14, MDIC (Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior), Instituto Euvaldo Lodi – IEL/Núcleo Central. Brasília, DF: MDIC-STI/IEL, 2006.

PIMENTEL, D. & PATZEK, T.W. “Ethanol Production Using Corn, Switchgrass, and Wood; Biodiesel Production Using Soybean and Sunflower”, **Natural Resources Research**, v. 14, n. 1, pp. 65-76, 2005.

PORTO, M.F.P. **O Crepúsculo do Petróleo**. Brasport, Rio de Janeiro, 2006.

RATHMANN, R. *Identificação dos Fatores e Motivações Relacionados ao Processo de Tomada de Decisão dos Diferentes Agentes da Cadeia Produtiva do Biodiesel no Rio Grande do Sul*. Dissertação de M.Sc., Centro de Estudos e Pesquisas em Agronegócios, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil, 2007.

ROBBINS, M. “Fueling Politics”. In: Biofuels Outlook, **Nature** v. 474, pp. S22 – S24, 2011.

ROCHA, M.J.B. *Do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo ao Programa de Atividades: Uma Análise do Uso do Biodiesel e da Energia Eólica no Brasil*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.

ROZA, F.C. & FREITAS, L.S. *Balanço das Emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE) na Cadeia Completa de Produção do Biodiesel de Soja*. Projeto de Graduação, Escola Politécnica/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2010.

SANTOS, M.A. *Inserção do Biodiesel na Matriz Energética Brasileira*. Dissertação de M.Sc., Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, EP, FEA, IEE, IF/USP, São Paulo, SP, Brasil, 2007.

SANTOS, A.M. *Análise do Potencial do Biodiesel de Dendê para a Geração Elétrica em Sistemas Isolados da Amazônia*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.

SANTOS, G.R. “Biocombustíveis no Brasil: Evolução da Produção e Uso do Biodiesel de Oleaginosas e Interfaces com as Políticas Públicas”, Apresentação, Instituto de Pesquisas Econômicas Aplicadas (IPEA), Diretoria de Estudos Setoriais, Inovação Tecnológica e Regulação (DISET), 2010.

SCHAFFEL, S.B. & LA ROVERE, E.L. “The quest for eco-social efficiency in biofuels production in Brazil”, **Journal of Cleaner Production**, v. 18, pp. 1663-1670, 2010.

SCHMIDT, J.H. *Life cycle assessment of rapeseed oil and palm oil*. Ph.D. thesis, Part 3: Life cycle inventory of rapeseed oil and palm oil, Department of Development and Planning, Aalborg University, DK, 2007.

SCARLAT, N. & DALLEMAND, J. “Recent developments of biofuels/bioenergy sustainability certification: A global overview”, **Energy Policy**, v. 39, pp. 1630-1646, 2011.

SEARCHINGER, T., HEIMLICH, R., HOUGHTON, R.A., *et al.* “Use of U.S. croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land use change”, **Science**, v. 319, pp. 1238-1240, 2008.

SHARMA, Y.C. & SINGH, B. “Development of Biodiesel: Current Scenario”, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, pp. 1646–1651, 2009.

SHEEHAN, J., CAMOBRECO, V., DUFFIELD, J., *et al.* **Life cycle inventory of biodiesel and petroleum diesel for use in an urban bus**, National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, USA, 1998.

SILVA, V.P., VAN DER WERF, H.M.G., SPIES, A., *et al.* “Variability in environmental impacts of Brazilian soybean according to crop production and transport scenarios”, **Journal of Environmental Management**, v. 91, pp. 1831-1839, 2010a.

SILVA, J. F. V.; RICHETTI, A.; HIRAKURI, M. H.; CASTRO, A. M. G. “Sistema produtivo de soja para a produção de biodiesel”. In: CASTRO, A.M.G., LIMA, S.M.V., SILVA, J.F.V. (eds), **Complexo Agroindustrial de Biodiesel no Brasil: Competitividade das Cadeias Produtivas de Matérias-Primas**, 1 ed., capítulo 11, Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2010b.

SINISCALCHI, C.R. *Análise da Viabilidade para Inserção da Agricultura Familiar do Semiárido no Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel: O Caso do Ceará*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.

SMEETS, E. M. W., BOUWMAN, L. F., STEHFEST, E., *et al.* “Contribution of N₂O to the greenhouse gas balance of first-generation biofuels”, **Global Change Biology**, v. 15, pp. 1–23, 2009.

SNYDER, C.S., BRUULSEMA, T.W., JENSEN, T.L. “Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects”, **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 133, pp. 247–266, 2009.

SOARES, L.H.B; ARAÚJO, E.S.; ALVES, B.J.R.; *et al.* “Eficiência energética comparada das culturas do girassol e da soja, com aptidão para a produção de biodiesel no Brasil”, **Circular Técnica 025**, Embrapa Agrobiologia, Seropédica, RJ, 2008.

SOUZA, S.P., PACCA, S., ÁVILA, M.T., *et al.* “Greenhouse gas emissions and energy balance of palm oil biofuel”, **Renewable Energy**, v. 35, pp. 2552-2561, 2010.

SZULCZYK, K.R. & McCARL, B.A. “Market penetration of biodiesel”, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.14, pp. 2426–2433, 2010.

TAKAHASHI, F. & ORTEGA, H. “Assessing the sustainability of Brazilian oleaginous crops—possible raw material to produce biodiesel”, **Energy Policy**, v. 38, pp. 2446–2454, 2010.

TALENS, L. VILLALBA, G., GABARRELL, X. “Exergy analysis applied to biodiesel production”, **Resources, Conservation and Recycling** 51, pp. 397–407, 2007.

THAMSIRIROJ, T. & MURPHY, J.D. “Is it better to import palm oil from Thailand to produce biodiesel in Ireland than to produce biodiesel from indigenous Irish rape seed?”, **Applied Energy**, v. 86, pp. 595-604, 2009.

THAMSIRIROJ, T. & MURPHY, J.D. “The impact of the life cycle analysis methodology on whether biodiesel produced from residues can meet the EU sustainability criteria for biofuel facilities constructed after 2017”, **Renewable Energy**, v. 36, pp. 50-63, 2011.

THE GOLD STANDARD. **Technologies and Practices to Displace Decentralized Thermal Energy Consumption**, 2011. Disponível em: www.cdmgoldstandard.org/wp-content/uploads/2011/10/GS_110411_TPDDTEC_Methodology.pdf, acesso em fevereiro de 2012.

TILMAN, D., HILL, J., LEHMAN, C. “Carbon-Negative Biofuels from Low-Input High-Diversity Grassland Biomass”, **Science**, v. 329, pp. 1598-1600, 2006.

TSATSARONIS, G. “Definitions and nomenclature in exergy analysis and exergoeconomics”, **Energy**, v. 32, pp.249–253, 2007.

UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change). **Approved consolidated baseline and monitoring methodology ACM0017: Production of biodiesel for use as fuel**. Version 2.0.0, 2010. Disponível em: <http://cdm.unfccc.int/methodologies/PAmethodologies/approved>, acesso em setembro de 2010.

USDA (United States Department of Agriculture). **Oilseeds: world markets and trade**, USDA, 2012. Disponível em: www.fas.usda.gov/oilseeds/Current/, acesso em março de 2012.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Fossil Energy**, 2011. Disponível em: <http://fossil.energy.gov/>, acesso em dezembro de 2011.

U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. **International Energy Statistics: Renewables**, 2012. Disponível em: 205.254.135.7/cfapps/ipdbproject, acesso em janeiro de 2012.

VIANA, M.M. *Inventário do Ciclo de Vida do Biodiesel Etílico do Óleo de Girassol*. Dissertação de M.Sc., Escola Politécnica, USP, São Paulo, SP, Brasil, 2008.

VIANNA, S.C. *Análise de Ecoeficiência: Avaliação do Desempenho Econômico-Ambiental do Biodiesel e Petrodiesel*. Dissertação de M.Sc., Escola Politécnica, USP, São Paulo, SP, Brasil, 2006.

VILLELA, A.A. *O Dendê como Alternativa Energética Sustentável em Áreas Degradadas da Amazônia*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.

VRIES, S.C., VAN DE VEN, G.W.J., VAN ITTERSUM, M.K., *et al.* “Resource use efficiency and environmental performance of nine major biofuel crops, processed by first-generation conversion techniques”, **Biomass and Bioenergy**, v. 34, pp. 588-601, 2010.

WALDRON, C.D., MAURICE, L.Q., HARNISCH, J., *et al.* “Mobile combustion”. In: Eggleston, S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K. (eds.), **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories – Volume 2**, Capítulo 3, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, IGES, Japão, 2006.

WILKINSON, J. & HERRERA, S. “Biofuels in Brazil: debates and impacts”, **The Journal of Peasant Studies**, v. 37, n. 4, pp. 749–768, 2010.

YAN, X. & CROOKES, R.J. “Life cycle analysis of energy use and greenhouse gas emissions for road transportation fuels in China”, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, pp. 2505–2514, 2009.

YEE, K.F., TAN, K.T., ABDULLAH, A.Z., *et al.* “Life cycle assessment of palm biodiesel: Revealing facts and benefits for sustainability”, **Applied Energy**, v. 86, pp. S189–S196, 2009.

ANEXO I

Tabela 45 - Matérias-primas utilizadas (%) na produção mensal de biodiesel no Brasil em 2010

Matérias-primas	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Óleo de soja	75,11	82,77	85,44	83,7	83,44	84,15	85,44	81,93	82,79	82,95	79,65	78,48
Óleo de dendê	0,56	0,28	0,10	0,42	0,23	0,86	-	-	0,09	-	0,09	-
Óleo de algodão	4,87	2,27	1,50	0,49	0,24	0,47	2,52	3,5	3,77	2,93	4,63	1,8
Óleo de girassol	0,02	-	-	-	-	-	-	-	0,04	0,01	0,01	-
Óleo de sésamo	0,10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Óleo de amendoim	-	-	-	0,1	0,11	-	-	-	-	-	-	-
Óleo de nabo forrageiro	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,37	0,4
Sebo bovino	16,04	11,86	10,92	13,1	14,47	12,16	10,49	12,81	12,25	12,45	12,56	17,15
Gordura de frango	3,14	2,71	1,84	1,93	1,22	1,83	0,73	1,31	0,65	1,23	2,25	1,37
Gordura de porco	0,01	-	0,03	0,05	0,1	0,14	0,49	0,19	0,08	0,01	0,03	-
Óleo de fritura usado	-	-	0,03	0,09	-	-	-	0,06	0,16	0,22	0,25	0,53
Outros materiais graxos	0,15	0,11	0,14	0,17	0,19	0,39	0,33	0,2	0,17	0,2	0,16	0,27

Fonte: Elaboração própria, com base em ANP (2011b).

ANEXO II

Tabela 46 - Área cultivada de palma (em hectares) entre 2006 e 2010, por região e estado.

REGIÃO/UF*	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Área (ha)						
NORTE	47.030,0	51.851,0	49.245,0	49.614,0	50.396,0	55.193,0
AM	61	61	61	70	70	2.949
PA	46.969	51.790	49.184	49.544	50.326	52.244
NORDESTE	41.691,0	44.941,0	53.077,0	55.442,0	53.517,0	53.726,0
BA	41.691	44.941	53.077	55.442	53.517	53.726
BRASIL	88.721	96.792	102.322	105.056	103.913	108.919

* Alguns estados não aparecem porque não possuem/possuíram produção de biodiesel.

Fonte: Elaboração própria, com base em IBGE (2012).