



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Mecânica

Maria Teresa Cardenas Galvis

**Avaliação e classificação de oleaginosas capazes de
contribuir na diversificação de matérias-primas para
uma produção sustentável do biodiesel**

Campinas
2020

Maria Teresa Cardenas Galvis

Avaliação e classificação de oleaginosas capazes de contribuir na diversificação de matérias-primas para uma produção sustentável do biodiesel

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

Orientador: Prof. Dr. Waldyr Luiz Ribeiro Gallo

ESTE TRABALHO CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELA ALUNA MARIA TERESA CARDENAS GALVIS, E ORIENTADA PELO PROF. DR. WALDYR LUIZ RIBEIRO GALLO.

Campinas
2020

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

C178a Cardenas Galvis, Maria Teresa, 1988-
Avaliação e classificação de oleaginosas capazes de contribuir na diversificação de matérias-primas para uma produção sustentável do biodiesel / María Teresa Cárdenas Galvis. – Campinas, SP : [s.n.], 2020.

Orientador: Waldyr Luiz Ribeiro Gallo.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Biodiesel. 2. Matérias-primas. 3. Sementes oleaginosas. 4. Óleos vegetais. 5. Desenvolvimento sustentável. I. Gallo, Waldyr Luiz Ribeiro, 1954-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Evaluation and classification of oilseeds capable of contributing to the diversification of raw materials for a sustainable production of biodiesel

Palavras-chave em inglês:

Biodiesel

Feedstocks

Oilseeds

Vegetable oils

Sustainable development

Área de concentração: Planejamento de Sistemas Energéticos

Titulação: Mestre em Planejamento de Sistemas Energéticos

Banca examinadora:

Waldyr Luiz Ribeiro Gallo [Orientador]

Gonçalo Amarante Guimarães Pereira

Joaquim Eugenio Abel Seabra

Data de defesa: 18-12-2020

Programa de Pós-Graduação: Planejamento de Sistemas Energéticos

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0002-1282-2525>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/5280025743972291>

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

**Avaliação e classificação de oleaginosas capazes de
contribuir na diversificação de matérias-primas para
uma produção sustentável do biodiesel**

Autor: Maria Teresa Cardenas Galvis

Orientador: Prof. Dr. Waldyr Luiz Ribeiro Gallo

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

**Prof. Dr. Waldyr Luiz Ribeiro Gallo, Presidente
FEM/UNICAMP**

**Prof. Dr. Gonçalo Amarante Guimarães Pereira
Bioenergia/UNICAMP**

**Prof. Dr. Joaquim Eugênio Abel Seabra
FEM/UNICAMP**

A ata de defesa com as respectivas assinaturas dos membros da Comissão julgadora, encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica.

Campinas, 18 de dezembro de 2020

Dedicatória

À minha família pelo apoio incondicional e a quem foi meu companheiro Alejandro, quem sempre acreditou em mim e me incentivou a fazer mais do que eu pensava que poderia fazer. A sua recuperação é o maior desejo do meu coração.

Agradecimentos

Aos meus pais Ricardo Cardenas e Elsy Galvis, por seu amor, apoio e confiança, por todo o incentivo para dar continuidade aos meus estudos. Tudo o que eu conquistei e vier a conquistar será graças a vocês e, dessa forma, sempre dedicado a vocês.

Ao meu irmão, minhas sobrinhas e minha família na Colômbia não há distância que enfraqueça o laço tão bonito e verdadeiro que nos une, vocês são o motor da minha vida.

Aos meus colegas do PSE, Pablo e Stella pelos conhecimentos compartilhados, e particularmente ao meu grupo (Bia, Hélio, Nath, Carol, Rafael M, Rafael A, Nilena, Marjorie, Vitor) por me ensinar a cada dia um pouco do seu país e da sua cultura, pelos cafés, pelas pizzas e pelas confraternizações.

A minhas colegas colombianas Sara, Laura e Lorena pelas conversas, pelos conselhos e pela sua amizade.

A meus amigos Maury e Johann pelo apoio, pela ajuda, pelos inúmeros momentos agradáveis, por serem tão prestativos e atenciosos e pelo carinho demonstrado.

Ao Prof. Dr. Waldyr L. R. Gallo, pela orientação, aprendizado, por sempre estar receptivo e disponível em me atender. Obrigada pelo incentivo e a confiança.

Aos professores do PSE, pela importante contribuição em minha formação acadêmica e profissional.

A todos que acreditaram em mim e ajudaram de alguma forma na realização deste trabalho, de perto ou de longe, muito obrigada!

Por fim, pelo apoio financeiro, eu agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

*Algunas cosas del pasado desaparecieron pero otras abren una brecha
al futuro y son las que quiero rescatar.*

—Mario Benedetti

Resumo

As preocupações ambientais e os compromissos assumidos pelo Brasil para reduzir as emissões de gases de efeito estufa levaram ao país, entre outras medidas possíveis, a adotar como estratégia aumentar a participação de bioenergia sustentável na matriz energética do país, expandindo o consumo de biocombustíveis e aumentando a parcela de biodiesel na mistura de diesel. Diferentes programas governamentais e políticas regulatórias foram implementadas com o intuito de estimular a produção de biodiesel ao longo do tempo. Entretanto, no curto prazo, a principal força propulsora do crescimento da demanda por biocombustíveis é a atual política RenovaBio. O aumento da participação do biodiesel na matriz energética nacional, pressupõe o aumento da demanda de matérias-primas para a geração desse biocombustível. A soja é a principal matéria-prima utilizada na cadeia de produção de biodiesel e hoje preocupa a alta tendência exportadora dessa oleaginosa em grão. Numerosas outras fontes de óleo vegetal podem ser usadas para a produção do biodiesel, mas nem todas são adequadas. Dentro do cenário apresentado, o objetivo deste trabalho é avaliar e classificar diferentes alternativas oleaginosas capazes de contribuir na cadeia produtiva do biodiesel, visando a produção sustentável desse biocombustível. Para isso, foi definida uma metodologia onde foram estabelecidos alguns aspectos e indicadores para a avaliar a viabilidade de cada matéria-prima nas dimensões técnica, econômica e ambiental. Um sistema de pontuação permitiu estabelecer uma classificação das oleaginosas com as melhores características, tentou-se refletir o ponto de vista de diferentes agentes econômicos caracterizados pelo grau de verticalização das usinas produtoras e sob a ótica dos gestores de políticas públicas. Encontrou-se que as oleaginosas apresentam diferentes desempenhos dependendo da dimensão onde foram analisadas. Como exemplo, a canola é uma boa alternativa considerando apenas a dimensão técnica, mas não é tão boa pelas dimensões econômica e ambiental. Por outro lado, a classificação das oleaginosas depende do ponto de vista do agente econômico. A visão do produtor totalmente integrado que está no plantio, esmagamento e produção do biocombustível é diferente daquele não integrado que só produz biodiesel e compra óleo vegetal no mercado. O mesmo acontece com o gestor de políticas públicas que está mais preocupado com aspectos da dimensão ambiental, por exemplo. A escolha das alternativas muda conforme os interesses dos tomadores de decisão. Por último, o resultado da classificação global considerando as três dimensões, mostrou que as cinco melhores alternativas dentre as dez oleaginosas avaliadas, para serem inseridas na cadeia produtiva do biodiesel, são a palma de óleo, o girassol, a macaúba, o pinhão manso e a canola.

Palavras-chave: Biodiesel, Matérias-primas, Oleaginosas, Óleos vegetais, RenovaBio, Desenvolvimento sustentável, Indicadores.

Abstract

Environmental concerns and commitments made by Brazil to reduce greenhouse gas emissions, led the country, among other possible measures, to adopt as a strategy to increase the share of sustainable bioenergy in the country's energy matrix, expanding the consumption of biofuels and increasing the share of biodiesel in the diesel mix. Different government programs and regulatory policies have been implemented in order to stimulate the production of biodiesel over time. However, in the short term, the main driving force behind the growth in demand for biofuels is the current RenovaBio policy. The increase in the share of biodiesel in the national energy matrix presupposes an increase in the demand for raw materials for the generation of this biofuel. Soybean is the main feedstock used in the biodiesel production chain and nowadays it concerns the high export trend of this oilseed. Numerous other sources of vegetable oil can be used to produce biodiesel, but not all are suitable. Within the presented scenario, the objective of this work is to evaluate and classify different oilseed alternatives capable of contributing to the biodiesel production chain aiming at the sustainable production of this biofuel. For this purpose, a methodology was defined where some aspects and indicators were established to assess the viability of each raw material in the technical, economic and environmental dimensions. A scoring system made it possible to establish a classification of oilseeds with the best characteristics, an attempt was made to reflect the point of view of different economic agents characterized by the degree of verticalization of the biodiesel producing plants and from the perspective of public policy managers. It was found that oilseeds present different performances depending on the dimension where they were analyzed. As an example, canola is a good alternative considering only the technical dimension, but it is not so good for the economic and environmental dimensions. On the other hand, the classification of oilseeds depends on the point of view of the economic agent. The vision of the fully integrated producer who is planting, crushing and producing biofuel is different from the non-integrated producer that only produces biodiesel and buys vegetable oil on the market. The same is true of the public policy manager who is more concerned with aspects of the environmental dimension, for example. The choice of alternatives changes according to the interests of decision makers. Finally, the result of the global classification considering the three dimensions, showed that the five best among the ten evaluated oilseeds alternatives, to be inserted in the biodiesel production chain, are oil palm, sunflower, macaw palm, jatropha and canola.

Keywords: Biodiesel, Feedstocks, Oilseeds, Vegetable oils, RenovaBio, Sustainable development, Indicators.

Lista de Figuras

| | | |
|-----|--|-----|
| 2.1 | Preços médios dos Leilões de biodiesel desde L1 em 2005 até L67 em 2019 | 24 |
| 2.2 | Evolução anual da produção do biodiesel, capacidade nominal autorizada pela ANP, número de usinas no país e demanda projetada para o biodiesel até 2029. | 26 |
| 2.3 | Infraestrutura de produção do biodiesel no Brasil em 2019 | 27 |
| 2.4 | Estrutura dos ácidos graxos | 31 |
| 2.5 | Equação geral da Transesterificação | 33 |
| 2.6 | Éster: Propanoato de metila | 33 |
| 2.7 | Equação geral para a Transesterificação de triglicerídeos | 34 |
| 2.8 | Efeito da adição de biodiesel nas emissões diretas em motores de ciclo diesel . . | 39 |
| 2.9 | Variação das emissões CO, HC, MP e NO _x com o uso do B20 | 40 |
| 3.1 | Produção mundial dos principais óleos vegetais em 2018 | 42 |
| 3.2 | Evolução dos preços médios dos óleos vegetais entre portos | 45 |
| 3.3 | Evolução dos preços do petróleo bruto - Média de Brent, Dubai e WTI | 45 |
| 3.4 | Consumo global e principal uso das oleaginosas no mundo | 46 |
| 3.5 | Matérias-primas utilizadas na produção de biodiesel (B100) | 50 |
| 4.1 | Esquema de funcionamento do RenovaBio | 71 |
| 4.2 | Esquema geral de funcionamento da RenovaCalc | 75 |
| 4.3 | Planilha de RenovaCalc para a fase agrícola na rota de biodiesel | 76 |
| 4.4 | Planilha de RenovaCalc para a fase industrial (Processamento e rendimentos) na rota de biodiesel | 76 |
| 4.5 | Planilha de RenovaCalc para a fase industrial (Processamento e rendimentos) na rota de biodiesel | 77 |
| 4.6 | Planilha de RenovaCalc para a fase distribuição na rota de biodiesel | 78 |
| 4.7 | Passos para a geração da nota de eficiência energético ambiental da RenovaCalc | 80 |
| 4.8 | Processo de Certificação da produção eficiente de biocombustíveis | 82 |
| 6.1 | Resultados da avaliação das oleaginosas no cenário base por meio dos indicadores técnicos | 113 |
| 6.2 | Resultados da avaliação das oleaginosas para o cenário base por meio dos indicadores econômicos | 119 |
| 6.3 | Resultados da avaliação das oleaginosas no cenário base por meio dos indicadores ambientais | 125 |
| 6.4 | Cenário base - Participação por dimensão na pontuação de cada matéria-prima | 126 |

| | | |
|-----|---|-----|
| A.1 | Diagrama de extremos e quartis | 157 |
| A.2 | Distribuição dados indicador técnico 1. Produtividade esperada do óleo | 157 |
| A.3 | Distribuição dados indicador técnico 2. Nível de domínio tecnológico agrícola | 158 |
| A.4 | Distribuição dados indicador técnico 3. Nível de domínio tecnológico industrial | 158 |
| A.5 | Distribuição dados indicador econômico 1. Preço da oleaginosa | 158 |
| A.6 | Distribuição dados indicador econômico 2. Preço do óleo vegetal | 159 |
| A.7 | Distribuição dados indicador econômico 4. Ciclo de cultivar | 159 |
| A.8 | Distribuição dados indicador ambiental 1. Fator de emissão de $\text{gCO}_{2\text{eq}}/\text{MJ}$ | 160 |
| A.9 | Distribuição dados indicador ambiental 5. Pegada hídrica parte agrícola | 160 |

Lista de Tabelas

| | | |
|------|--|-----|
| 2.1 | Maiores produtores de biodiesel no mundo em 2019 | 21 |
| 2.2 | Evolução do percentual de teor de biodiesel presente no diesel fóssil no Brasil . . | 23 |
| 2.3 | Preços médios para o biodiesel e diesel de 2009 a 2019 | 24 |
| 2.4 | Número de usinas de biodiesel e capacidade de operação autorizada por região no Brasil 2019 | 28 |
| 2.5 | Composição em ácidos graxos (% massa) de alguns óleos e gorduras | 32 |
| 2.6 | Propriedades do biodiesel dependendo da sua composição | 32 |
| 2.7 | Características do diesel derivado do petróleo e do biodiesel | 35 |
| 2.8 | Especificações do biodiesel na UE, EUA e Brasil | 36 |
| 2.9 | Principais propriedades de qualidade do biodiesel | 37 |
| 3.1 | Maiores produtores de biodiesel no mundo e as principais matérias-primas utilizadas | 42 |
| 3.2 | Estatísticas do complexo da soja | 52 |
| 4.1 | Metas compulsórias anais estabelecidas em unidades de Créditos de Descarbonização (CBIOS) | 72 |
| 4.2 | Emissão total de GEE na produção de biodiesel para matérias-primas não convencionais | 81 |
| 5.1 | Síntese geral dos aspectos e indicadores na dimensão técnica para avaliar as matérias-primas | 91 |
| 5.2 | Síntese geral dos aspectos e indicadores na dimensão econômica para avaliar as matérias-primas | 94 |
| 5.3 | Síntese geral dos aspectos e indicadores na dimensão ambiental para avaliar as matérias-primas | 98 |
| 5.4 | Indicadores técnicos aplicados as dez matérias-primas em discussão | 100 |
| 5.5 | Indicadores econômicos aplicados as dez matérias-primas em discussão | 101 |
| 5.6 | Indicadores ambientais aplicados as dez matérias-primas em discussão | 102 |
| 5.7 | Pontuação para os indicadores | 103 |
| 5.8 | Sistema de pontuação dos indicadores na dimensão técnica | 104 |
| 5.9 | Sistema de pontuação dos indicadores na dimensão econômica | 105 |
| 5.10 | Sistema de pontuação dos indicadores na dimensão ambiental | 106 |
| 5.11 | Características dos agentes econômicos | 107 |
| 6.1 | Cenário base - Sistema de pontuação dos indicadores na dimensão técnica | 109 |
| 6.2 | Cenário base- Pontuação dimensão técnica | 110 |

| | | |
|------|--|-----|
| 6.3 | Cenário base - Sistema de pontuação dos indicadores na dimensão econômica . . . | 115 |
| 6.4 | Cenário base - Pontuação dimensão econômica | 116 |
| 6.5 | Cenário base - Sistema de pontuação dos indicadores na dimensão ambiental . . . | 121 |
| 6.6 | Cenário base - Pontuação dimensão ambiental | 122 |
| 6.7 | Cenário base - Resultados globais para cada dimensão | 126 |
| 6.8 | Cenário base - Classificação das oleaginosas | 128 |
| 6.9 | Variação de pesos para os indicadores | 130 |
| 6.10 | Atribuição de pesos de acordo com a interpretação da visão do agente econômico de cada cenário | 131 |
| 6.11 | Classificação das oleaginosas de acordo com os diferentes cenários na dimensão técnica | 134 |
| 6.12 | Classificação das oleaginosas de acordo com os diferentes cenários na dimensão econômica | 136 |
| 6.13 | Classificação das oleaginosas de acordo com os diferentes cenários na dimensão ambiental | 138 |
| 6.14 | Classificação das oleaginosas de acordo com os diferentes cenários nas três dimensões | 140 |
| 6.15 | Média da pontuação obtida por cada cenário | 141 |

Sumário

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Introdução | 16 |
| 1.1 | Objetivos | 17 |
| 1.2 | Estrutura do trabalho | 18 |
| 2 | Revisão Bibliográfica | 19 |
| 2.1 | Contextualização histórica do biodiesel | 19 |
| 2.2 | O biodiesel no Brasil | 21 |
| 2.2.1 | A produção de biodiesel no Brasil | 25 |
| 2.3 | Definições básicas do biodiesel | 29 |
| 2.3.1 | Óleos e gorduras | 30 |
| 2.3.2 | Transesterificação | 33 |
| 2.3.3 | Qualidade do biodiesel | 35 |
| 2.3.4 | O biodiesel e as emissões diretas | 38 |
| 3 | Matérias-primas oleaginosas para a produção do biodiesel no Brasil | 41 |
| 3.1 | Matérias-primas tradicionais para a produção mundial do biodiesel | 41 |
| 3.2 | Análise do mercado mundial de oleaginosas tradicionais | 43 |
| 3.2.1 | Evolução dos preços dos principais óleos vegetais | 44 |
| 3.2.2 | Principais usos globais das oleaginosas | 46 |
| 3.2.3 | Competição entre óleos vegetais com fins alimentares ou energéticos | 47 |
| 3.3 | Oleaginosas para a produção de biodiesel no Brasil | 49 |
| 3.3.1 | O complexo da soja | 51 |
| 3.4 | Oleaginosas não convencionais para a produção de biodiesel no Brasil | 53 |
| 3.4.1 | Algodão | 53 |
| 3.4.2 | Girassol | 54 |
| 3.4.3 | Colza / Canola | 56 |
| 3.4.4 | Amendoim | 57 |
| 3.4.5 | Mamona | 59 |
| 3.4.6 | Cártamo | 60 |
| 3.4.7 | Pinhão Manso | 61 |
| 3.4.8 | Palma de óleo | 63 |
| 3.4.9 | Macaúba | 66 |
| 3.4.10 | Babaçu | 68 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4 | A Política RenovaBio um programa para aumentar a produção de biocombustíveis em direção ao desenvolvimento sustentável | 70 |
| 4.1 | O que é o RenovaBio | 70 |
| 4.2 | Metas de descarbonização dos biocombustíveis | 72 |
| 4.3 | Certificação da produção eficiente de biocombustível | 72 |
| 4.3.1 | RenovaCalc | 73 |
| 4.3.2 | Estimativa de emissões e cálculo da Intensidade de Carbono das matérias-primas para a produção do biodiesel | 78 |
| 4.3.3 | Procedimento para certificação da produção eficiente de biocombustíveis | 81 |
| 4.4 | Crédito de Descarbonização por Biocombustíveis CBIO | 82 |
| 4.5 | O carácter de sustentabilidade do programa RenovaBio | 84 |
| 5 | Metodologia | 86 |
| 5.1 | Estabelecimento de aspectos e indicadores para avaliar as matérias-primas de origem vegetal não convencionais | 86 |
| 5.1.1 | Aspectos e indicadores na dimensão técnica | 88 |
| 5.1.2 | Aspectos e indicadores na dimensão econômica | 91 |
| 5.1.3 | Aspectos e indicadores na dimensão ambiental | 94 |
| 5.2 | Aplicação dos indicadores para avaliar as dez oleaginosas discutidas | 98 |
| 5.3 | Sistema de pontuação | 103 |
| 5.4 | Caraterização dos tomadores de decisão | 106 |
| 6 | Resultados | 108 |
| 6.1 | Cenário base - Avaliação das matérias-primas onde os indicadores têm a mesma importância | 108 |
| 6.1.1 | Avaliação na dimensão técnica | 108 |
| 6.1.2 | Avaliação na dimensão econômica | 114 |
| 6.1.3 | Avaliação na dimensão ambiental | 120 |
| 6.1.4 | Avaliação das oleaginosas nas três dimensões | 126 |
| 6.1.5 | Classificação das oleaginosas | 127 |
| 6.2 | Análise de sensibilidade | 129 |
| 6.2.1 | Classificação das oleaginosas na dimensão técnica de acordo com os diferentes cenários | 133 |
| 6.2.2 | Classificação das oleaginosas na dimensão econômica de acordo com os diferentes cenários | 135 |
| 6.2.3 | Classificação das oleaginosas na dimensão ambiental de acordo com os diferentes cenários | 137 |
| 6.2.4 | Classificação global das oleaginosas nas três dimensões de acordo com os diferentes cenários | 139 |
| 7 | Conclusões | 142 |
| | Referências | 145 |
| A | Apêndice | 157 |
| A.1 | DEQ para os indicadores técnicos, econômicos e ambientais | 157 |

Introdução

O principal gás responsável pelo efeito estufa é o dióxido de carbono (CO_2), proveniente da queima de combustíveis fósseis para a geração de eletricidade e transporte. Em 2019, o total das emissões antrópicas associadas à matriz energética brasileira atingiu 419,9 milhões de toneladas de CO_2eq e o setor de transportes contribuiu com 190,5 milhões de toneladas de CO_2eq representando 45,4% (EPE, 2020b).

As preocupações ambientais e os compromissos internacionais assumidos pelo Brasil para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) em 37% abaixo dos níveis de 2005, em 2025, levaram ao país, entre outras medidas possíveis, a adotar como estratégia aumentar a participação de bioenergia sustentável na sua matriz energética para aproximadamente 18% até 2030, expandindo o consumo de biocombustíveis e aumentando a parcela de biodiesel na mistura de diesel (BRASIL, 2015).

Diferentes programas governamentais e políticas regulatórias como o Pro-óleo em 1980, o Pro biodiesel no ano 2002 e finalmente o Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB) lançado em 2005, foram implantados com o intuito de estimular a produção de biodiesel, abarcando tanto temas sociais, econômicos e ambientais quanto políticos para dar viabilidade à utilização do biodiesel no Brasil, bem como apoiar iniciativas para a diversificação das matérias-primas para a produção do biocombustível.

Entretanto, no curto prazo, a principal força propulsora do crescimento da demanda por essas fontes será o estabelecimento da atual política RenovaBio, programa que incentiva o aumento da produção de biocombustíveis na matriz energética de transportes do país, ao tempo que promove a mitigação de uma quantidade específica de GEE em relação ao seu substituto

fóssil, contribuindo com previsibilidade para a participação dos biocombustíveis no mercado de combustíveis, com ênfase na sustentabilidade da indústria e na segurança do abastecimento (MME, 2017b).

O aumento da participação do biodiesel na matriz energética nacional pressupõe o aumento da demanda de matérias-primas para a geração do biocombustível. O Brasil possui ampla área agricultável e vocação agrícola, que somadas às condições climáticas favoráveis permitem a produção de biomassa para biocombustíveis sem afetar a produção alimentar quando produzidos de forma sustentável (FGVENERGIA, 2017).

A busca de diferentes matérias-primas oleaginosas a serem inseridas na produção de biodiesel não é um tema novo. A ideia vem se desenvolvendo desde o estabelecimento do biodiesel na agenda energética do país. Porém, o óleo de soja se configurou rapidamente como a principal fonte para a cadeia produtiva do biodiesel, e hoje preocupam a forte dependência dessa oleaginosa e a alta tendência exportadora de soja em grão que reduz a disponibilidade doméstica dessa matéria-prima para o setor industrial.

Entretanto, numerosas outras fontes de óleo vegetal podem ser usadas para a produção do biodiesel, mas não todas são adequadas. A viabilidade de uma matéria-prima depende de sua competitividade tanto técnica quanto econômica e socioambiental (RAMOS et al., 2017).

1.1 Objetivos

Dentro do cenário apresentado, este trabalho propõe como objetivo principal avaliar e classificar diferentes oleaginosas, visando a diversificação de matérias-primas de origem vegetal em busca de uma produção de biodiesel sustentável. A escolha das melhores candidatas é feita considerando a interpretação do ponto de vista de diferentes agentes econômicos definidos pelo grau de verticalização das usinas produtoras do setor e sob a ótica dos gestores de políticas públicas.

Para cumprir com o objetivo acima são destacados os seguintes objetivos secundários desta dissertação.

- Identificar algumas fontes para extração de óleo vegetal tradicionais, ou promissoras, ou não convencionais, capazes de contribuir com a cadeia produtiva do biodiesel no Brasil, ressaltando seus gargalos e suas potencialidades.

- Compreender os fundamentos e instrumentos da atual política RenovaBio identificando os desafios que o programa apresenta e que dificultam a entrada de novas oleaginosas na rota produtiva do biodiesel.
- Definir diferentes aspectos e indicadores para facilitar a avaliação da viabilidade de cada matéria-prima nas dimensões técnica, econômica e ambiental.
- Obter uma classificação das oleaginosas com as melhores características resultantes de um sistema de pontuação definido e avaliado de acordo com os diferentes cenários estabelecidos.

1.2 Estrutura do trabalho

Para abordar o tema proposto, a presente dissertação está organizada em seis capítulos além da introdução, descritos a seguir.

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica a respeito da contextualização do biodiesel no mundo e no Brasil.

No Capítulo 3 se apresenta uma revisão das matérias-primas tradicionais para a produção do biodiesel, focando no cenário mundial das oleaginosas, a cotação do mercado de óleos vegetais e finalmente algumas alternativas não convencionais e promissoras para a produção de biodiesel no Brasil.

No Capítulo 4 é feita a descrição da política RenovaBio, seus principais objetivos e instrumentos para incentivar a fabricação dos biocombustíveis e as dificuldades existentes particularmente para a rota de biodiesel.

No Capítulo 5 é descrita a metodologia proposta e empregada neste trabalho para a avaliação e classificação das matérias-primas, com o estabelecimento de indicadores nas três dimensões técnica, econômica e ambiental, bem como na definição do sistema de pontuação.

No Capítulo 6 são apresentados os resultados por dimensão considerando cinco cenários; um cenário base onde todos os indicadores possuem a mesma importância e quatro cenários que consideram uma ponderação para cada indicador definidos segundo o grau de verticalização dos agentes econômicos na produção do biodiesel e sobre a ótica de um gestor de políticas públicas, obtendo para cada cenário uma classificação das matérias-primas oleaginosas.

Finalmente no Capítulo 7, são apresentadas as conclusões do trabalho.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Este capítulo apresenta uma revisão da literatura abordando a contextualização histórica do biodiesel, a introdução do biodiesel no Brasil, as definições básicas deste biocombustível, as características técnicas, o processo de transesterificação, os requisitos de qualidade e as emissões direitas associadas ao biodiesel.

2.1 Contextualização histórica do biodiesel

A história do biodiesel é concebida junto com a criação dos motores diesel no final do século XIX, quando o pesquisador alemão Rudolf Diesel e inventor do motor que carrega seu nome, testou o óleo vegetal (de amendoim) no seu motor na Exposição de Paris em 1900. Na verdade, o motor que havia sido construído para operar com óleo mineral, operou com óleos vegetais sem qualquer modificação como demonstrou a companhia francesa Otto por solicitação do governo francês. Mais tarde, o inventor diria que seus motores também funcionaram bem, experimentalmente, com outros óleos orgânicos como o óleo de mamona e gorduras animais (KNOTHE, 2001).

Rudolf Diesel acreditava que a utilização de combustível proveniente da biomassa era o real futuro para o seu motor e já previa a importância dos óleos vegetais dentre os combustíveis, apesar da insignificância que a eles era atribuída naquela época, conforme registrado em seu discurso realizado em 1912 (ENCARNAÇÃO, 2008).

Só houve avanços na perspectiva do uso de óleos vegetais combustíveis a partir do momento em que se percebeu que “a remoção do glicerol da molécula original de óleo vegetal gerava

um combustível muito mais apropriado para os motores do tipo diesel”. Isso ocorreu quando o belga George Chavanne da Universidade de Bruxelas descobriu o processo de transesterificação, a reação que permite a obtenção do biodiesel moderno. A descoberta de Chavanne foi patenteada na Bélgica em 1937 e logo ganhou aplicação prática (BIODIESELBR, 2019c).

Durante a Segunda Guerra Mundial (1939-1945), muitos países usaram óleos de origem vegetal como fonte de combustível ou pesquisaram esse uso. A necessidade de substituição do petróleo, principal fonte de energia primária que escasseava e tinha experimentado um aumento súbito de preço devido as restrições impostas pelo conflito, foram as principais motivações para essas tentativas. Com o final desta guerra, a produção e a distribuição do petróleo pelo mundo se normalizaram, e as pesquisas para uso do biodiesel foram temporariamente abandonadas, visto que o biocombustível não era competitivo com o diesel mineral para os baixos preços do petróleo daquele momento (BIODIESELBR, 2019c).

As pesquisas para substituir o diesel por um biocombustível só seriam retomadas quase 30 anos depois, na crise petrolífera de 1973. Não apenas pelos preços internacionais do petróleo que foram afetados particularmente por eventos geopolíticos e econômicos, mas também pela incapacidade das nações industrializadas de diminuir a participação do petróleo no seu perfil de consumo de energia primária (BIODIESELBR, 2019c).

Mais uma vez, as perspectivas de segurança energética tornaram-se um importante impulsionador do uso de óleo diesel a base de óleo vegetal, colocando cientistas e governos novamente atrás de uma alternativa viável para o combustível fóssil (KNOTHE, 2001).

Além dos fatores econômicos e políticos revisados anteriormente, a partir da década de 1990, verifica-se um aumento de conscientização acerca dos problemas ambientais causados pela queima de combustíveis fósseis. Vê-se surgir em vários países uma intensificação das pesquisas e políticas públicas destinadas a promover a busca por novas alternativas energéticas e a produção de biocombustíveis para diminuir a emissão de gases relacionados com o efeito estufa (SUAREZ; MENEGHETTI, 2007).

A Europa, em particular a Alemanha, intensificou as pesquisas e instituiu a mistura de biodiesel a base de colza no diesel. Os Estados Unidos, por sua vez, estimularam a produção de biodiesel baseado na produção de soja e o Brasil dirigiu sua atenção, no final dos anos 90, aos projetos destinados ao desenvolvimento do biodiesel com as matérias-primas provenientes das culturas de mamona e de soja. A utilização do óleo vegetal como combustível deixou um

importante legado no meio científico, abrindo caminhos para muitas pesquisas sobre a temática (SEMBRAE, 2007).

Atualmente, entre os principais produtores de biodiesel do mundo estão a Indonésia com uma produção de 7,9 bilhões de litros, seguida pelo Brasil, Estados Unidos, Alemanha, França e Argentina conforme apresenta o ranking mundial em 2019 (Tabela 2.1) (REN21, 2020).

Tabela 2.1: Maiores produtores de biodiesel no mundo em 2019

| | País | Produção (Bilhões de Litros) |
|----|----------------|---------------------------------|
| | Total | 40,9 |
| 1 | Indonésia | 7,9 |
| 2 | Brasil | 5,9 |
| 3 | Estados Unidos | 4,0 |
| 4 | Alemanha | 3,8 |
| 5 | França | 2,8 |
| 6 | Argentina | 2,5 |
| 7 | Espanha | 2,0 |
| 8 | Tailândia | 1,7 |
| 9 | Malásia | 1,6 |
| 10 | Holanda | 1,0 |
| 11 | Polônia | 1,0 |
| 12 | Itália | 0,8 |
| 13 | China | 0,6 |
| 14 | Canadá | 0,3 |
| 15 | Índia | 0,2 |
| | EU-28 | 12,4 |

Fonte:REN21 (2020)

2.2 O biodiesel no Brasil

No Brasil, a trajetória do uso de biocombustíveis começou a ser delineada desde a década de 1920, com o Instituto Nacional de Tecnologia (INT) que já estudava e testava combustíveis alternativos e renováveis (SEMBRAE, 2007). Em função disso, dada a elevada dependência externa de suprimento de petróleo e seus derivados na época, começou a se desenvolver nos anos 1930 a adição de etanol anidro à gasolina.

Na década de 70 do século XX, o Brasil inicia de forma pioneira o Programa Nacional do Álcool (Proálcool), para substituir parte da gasolina automotiva por álcool hidratado, e

ainda utilizar álcool anidro como aditivo à gasolina tornando menos poluente a sua combustão (SEMBRAE, 2007).

Na mesma época, também foram desenvolvidas algumas iniciativas com a substituição do diesel por óleos vegetais *in natura* ou transesterificados. Foi proposta a utilização de óleos provenientes de mamona e soja para a produção de biodiesel, resultando no lançamento do Programa Nacional de Produção de Óleos Vegetais para Fins Energéticos (Pro-óleo), elaborado pelo Conselho Nacional de Energia, através da Resolução nº 007, de 22 de outubro de 1980 (SUAREZ; MENEGHETTI, 2007).

Previa-se a regulamentação de uma mistura de 30% de óleo vegetal ao óleo diesel, com perspectivas de sua substituição integral em longo prazo. No entanto, devido ao fim da crise, houve uma queda do preço do petróleo, inviabilizando economicamente o uso de óleos vegetais e o Pró-Óleo foi abandonado em 1986 (SUAREZ; MENEGHETTI, 2007).

No marco da história do biodiesel no Brasil, embora houve desaceleração dos programas governamentais, muitas experiências concretas seguiram o seu curso. Ressalta-se a solicitação do registro da primeira patente brasileira para produção de biodiesel e de querosene vegetal de aviação pelo engenheiro químico e pesquisador da Universidade Federal do Ceará (UFCE), Exedito José de Sá Parente em 1980. Esse registro saiu em 1983 no Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI), sendo considerado uma referência para o país (SEMBRAE, 2007).

O tema só voltou à agenda política na segunda metade da década de 1990, quando houve uma reestruturação da matriz energética do país, com a instituição de novos marcos regulatórios e criação das agências reguladoras dentro da lógica do processo de privatização do sistema energético estatal. Assim, através da resolução nº 180 de 1998, a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) autorizou a realização de testes e comercialização de combustíveis não-especificados, cujos resultados indicaram a viabilidade econômica de uma política nacional que buscasse a substituição progressiva do óleo diesel mineral pelo biodiesel advindo de biomassa (MATTEI, 2010).

Em decorrência, o Governo Federal criou o Programa Brasileiro de Biocombustíveis (Pro biodiesel) em 2002, cuja coordenação ficou ao encargo do Ministério de Ciência e Tecnologia, com os objetivos principais de reduzir a dependência do petróleo, expandir os mercados das oleaginosas, impulsionar a demanda por combustíveis alternativos e reduzir a emissão de gases poluentes. Porém, em 2004 o Pro biodiesel sofreu diversas reformulações e foi renomeado como

o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB), sendo o seu principal objetivo garantir a produção viável economicamente do biocombustível, tendo como tônica a inclusão social e o desenvolvimento regional (MATTEI, 2010; SUAREZ; MENEGHETTI, 2007).

Assim, a principal ação legal do PNPB foi a introdução efetiva do biodiesel derivado de óleos e gorduras na matriz energética brasileira a partir da criação do marco regulatório, pela lei nº 11.097, de 13 de janeiro de 2005 (SUAREZ; MENEGHETTI, 2007). Esta lei previu uma mistura obrigatória, denominada B2, de 2% de adição de biodiesel ao combustível diesel vendido no país, a partir de 1º de janeiro de 2008. Com o amadurecimento do mercado brasileiro, esse percentual foi sucessivamente ampliado pelo Conselho Nacional de Política Energética (CNPE)(ANP, 2020b), conforme aparece na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Evolução do percentual de teor de biodiesel presente no diesel fóssil no Brasil

| Data | % Biodiesel no Diesel |
|-----------|-----------------------|
| 2003 | Facultativo |
| jan/2008 | 2% |
| jul/2008 | 3% |
| jul/2009 | 4% |
| jan/2010 | 5% |
| ago/2014 | 6% |
| nov/2014 | 7% |
| mar/2018 | 10% |
| set/2019 | 11% |
| mar/2020 | 12% |
| *mar/2021 | 13% |
| *mar/2022 | 14% |
| *mar/2023 | 15% |

Fonte: Adaptado de ANP (2020b)

* Próximas evoluções de adição obrigatória

A comercialização do biodiesel, conforme definido pela Resolução CNPE nº 5, de 03 de dezembro de 2007, foi pautada na adoção do modelo de leilões públicos organizados pela ANP com periodicidade bimestral. Desde a inserção do biodiesel na matriz energética brasileira, a ANP também assumiu a atribuição de regular e fiscalizar as atividades relativas à produção, controle de qualidade, distribuição, revenda e comercialização (as condições de entrega e o preço máximo de referência) e da verificação da porcentagem de mistura do biodiesel no diesel (FGVENERGIA, 2017; SAMPAIO, 2017).

O formato dos leilões sofreu algumas alterações ao longo dos anos, chegando ao modelo

atual, que ocorre de forma online utilizando a plataforma de compras da Petrobras, a Petronect. A Petrobras, detentora de participação superior a 99% da produção do óleo diesel no país, é considerada a única adquirente pela ANP e a ela cabe operacionalizar as etapas de comercialização dos leilões, fazendo a seleção das ofertas dos produtores de acordo com as necessidades dos seus clientes (as distribuidoras) (FGVENERGIA, 2017).

A Figura 2.1 resume os preços médios em cada leilão de biodiesel, conforme organizado pela ANP desde seu início, em novembro de 2005 até novembro de 2019. Na Tabela 2.3 se apresenta a evolução dos preços de biodiesel negociados nos leilões, além dos preços do óleo diesel nos últimos dez anos. Observa-se que historicamente o preço do biodiesel sempre foi superior ao do diesel mineral.

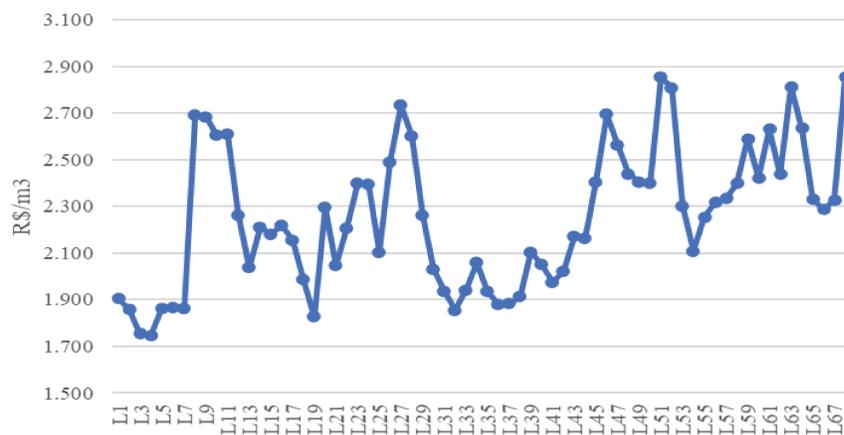


Figura 2.1: Preços médios dos Leilões de biodiesel desde L1 em 2005 até L67 em 2019
Fonte: (ANP, 2019a)

Tabela 2.3: Preços médios para o biodiesel e diesel de 2009 a 2019

| Preços médios (R\$/ m ³) | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 |
|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Biodiesel - Leilões | 2.163 | 2.067 | 2.262 | 2.484 | 2.015 | 1.961 | 2.239 | 2.579 | 2.286 | 2.579 | 2.595 |
| Diesel produtores e importadores | 1.409 | 1.352 | 1.361 | 1.408 | 1.587 | 1.741 | 1.978 | 2.085 | 2.096 | 2.444 | 2.514 |
| Diesel nas distribuidoras | 2.060 | 2.002 | 2.026 | 2.087 | 2.319 | 2.512 | 2.827 | 3.013 | 3.112 | 3.488 | 3.589 |

Fonte: Adaptado de ANP (2020a)

Para desenvolver a produção de biodiesel e alcançar os objetivos do PNPB, além dos leilões para a comercialização, foram trabalhados instrumentos financeiros como o Programa de Financiamento a Investimentos em Biodiesel, executado junto ao Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) e a outras instituições financeiras, com o objetivo de apoiar investimentos em todas as fases da produção de biodiesel e incentivos fiscais organizados a partir

da diferenciação entre regiões e matérias-primas utilizadas, com destaque para tributos federais como PIS/ PASEP e COFINS na busca por promover a inclusão social e o desenvolvimento regional tendo como instrumento o Selo Combustível Social (SCS) (SAMPAIO, 2017).

O selo é um certificado concedido aos produtores de biodiesel que adquirirem percentuais mínimos de matéria-prima da agricultura familiar (15% a 40%), mediante a celebração de contratos com os agricultores familiares, estabelecendo prazos e condições de entrega da matéria-prima, bem como o fornecimento de assistência técnica a estes agricultores, ação executada pelo Ministério de Desenvolvimento Agrário (MDA). O objetivo do governo não era apenas estimular as usinas por meio de isenções fiscais, mas utilizar o mercado de biodiesel para incluir os agricultores familiares como fornecedores de matéria-prima. A ideia original, era que os produtores de mamona nordestina fossem beneficiados com essa iniciativa. Contudo diante da falta de estruturação desses produtores, que elevava o custo para o fornecimento de assistência técnica, os usineiros concentraram a aquisição de matéria-prima da agricultura familiar junto aos produtores de soja do sul do país, onde já havia uma cultura de cooperativismo de várias décadas proporcionando menores custos para a obtenção do SCS (FGVENERGIA, 2017).

2.2.1 A produção de biodiesel no Brasil

A produção de biodiesel no Brasil vem crescendo ano após ano desde o início do PNPB, conforme vem aumentando a porcentagem mandatória de mistura de biodiesel no diesel mineral como foi mostrado na seção 2.2. Com base na previsão do consumo regional de óleo diesel realizada pela EPE (2020c), espera-se saltar de 5,9 milhões de m³ de biodiesel produzidos em 2019 (ANP, 2020a), para mais de 11 milhões de m³ em 2029 no patamar de B15 conforme a Figura 2.2. Na mesma figura observa-se que a indústria de biodiesel vem atuando com capacidade instalada bem acima do nível de produção.

Em 2008 estavam autorizadas 62 usinas com capacidade para produção de 3.9 milhões de m³, já em 2010 esse número passou para 66 com capacidade para 5,8 milhões de m³ de biodiesel, porém, mostra-se distante do total produzido (2,4 milhões de m³). De acordo com a FGV Energia (2017), a falta de previsibilidade em relação ao aumento dos percentuais obrigatórios deixou o setor inseguro e o reflexo foi o fechamento de usinas, hoje 51 no total (Figura 2.2).

Em 2019, a capacidade nominal de produção de biodiesel no Brasil foi de cerca de 9,3 milhões de m³, entretanto a produção nacional foi 5,9 milhões de m³, o que significa 3,4 milhões

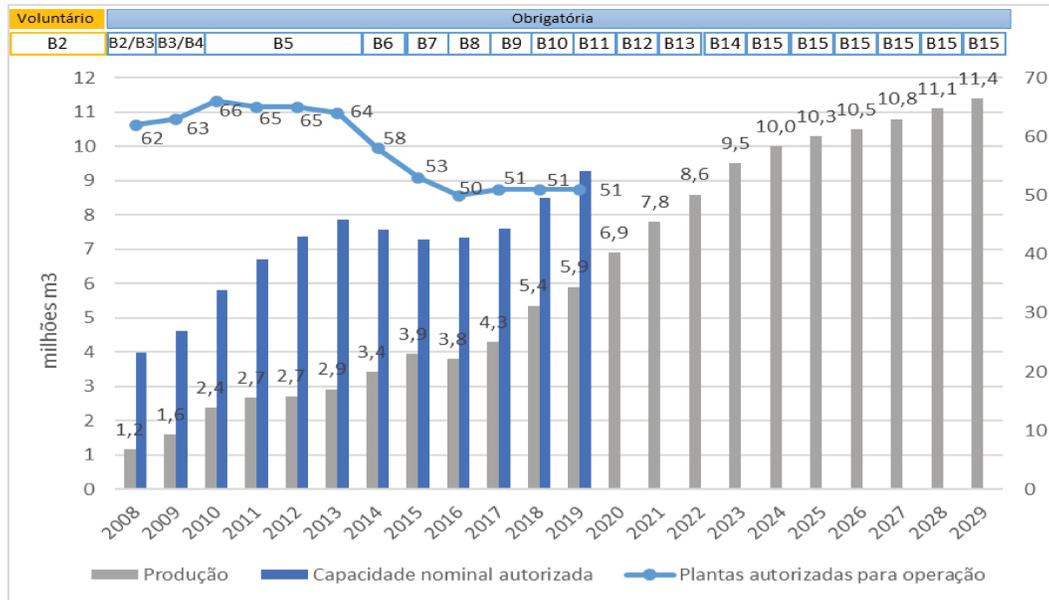


Figura 2.2: Evolução anual da produção do biodiesel, capacidade nominal autorizada pela ANP, número de usinas no país e demanda projetada para o biodiesel até 2029.

Fonte: ANP (2020a), EPE (2020c)

a menos e uma capacidade ociosa de 36% (ANP, 2020a).

Os dados indicam que a atual capacidade instalada de produção de biodiesel permite atender a obrigatoriedade do B11 planejada para o ano corrente. Não obstante, as usinas poderiam diversificar suas matérias-primas a fim de aumentar a produção, reduzir a ociosidade existente e buscar equilibrar o atendimento dos mercados regionais afetados pela distribuição geográfica das usinas.

Mendes e Costa (2010) mencionam que os produtores de biodiesel via de regra estão localizados próximos à produção da matéria-prima ou próximos aos grandes centros consumidores. No Brasil, dado que a produção de biodiesel está focada na soja, a maior parte das plantas autorizadas para produzir se encontram nas regiões de maior concentração de produção do grão: Centro-Oeste ou Sul conforme a Figura 2.3.

A Tabela 2.4 mostra a distribuição das usinas e capacidade de operação autorizada por região para 2019. As regiões Centro-Oeste com 24 usinas autorizadas e a região Sul com 12 usinas responderam cada uma por 41% da produção nacional, com destaque para os estados de Mato Grosso e Rio Grande do Sul; a região Sudeste com 7 usinas produziu 8%; e as regiões Nordeste com 4 usinas e Norte com apenas 3 usinas, responderam por 8% e 2% da produção de biodiesel nacional nessa ordem, o que indica a baixa contribuição nessas últimas regiões.

Tabela 2.4: Número de usinas de biodiesel e capacidade de operação autorizada por região no Brasil 2019

| Região | UF | No Usinas | Capacidade autorizada (m ³ /d) |
|--------------|----|-----------|--|
| Norte | RO | 1 | 90,0 |
| | TO | 2 | 881,0 |
| | | 3 | 971,0 |
| Nordeste | BA | 2 | 1645,5 |
| | CE | 1 | 50,0 |
| | PI | 1 | 250,0 |
| | | 4 | 1945,5 |
| Centro-Oeste | GO | 6 | 3500,0 |
| | MS | 2 | 1300,0 |
| | MT | 17 | 5993,5 |
| | | 25 | 10793,5 |
| Sudeste | MG | 1 | 463,6 |
| | RJ | 2 | 616,7 |
| | SP | 4 | 1321,7 |
| | | 7 | 2402,0 |
| Sul | PR | 2 | 2213,0 |
| | RS | 9 | 6733,3 |
| | SC | 1 | 510,0 |
| | | 12 | 9456,3 |
| Total | | 51 | 25568,3 |

Fonte: Adaptado de ANP (2020a)

No setor de biodiesel, as usinas produtoras podem ser classificadas de acordo com seu grau de verticalização como integradas, parcialmente integradas e não integradas. As empresas integradas têm a opção de vender o grão, vender o óleo vegetal ou vender o biodiesel. Normalmente, essas empresas optam por vender os produtos que tiverem as melhores margens num determinado período. As usinas parcialmente integradas são aquelas que podem produzir e comercializar o óleo vegetal, por disporem de planta de esmagamento e biodiesel. Essas empresas não plantam e nem comercializam a cultura vegetal. Finalmente as não integradas não têm a opção de fabricar produtos diversificados (biodiesel, óleo vegetal, ou grão), uma vez que produzem única e exclusivamente biodiesel. Elas adquirem o óleo vegetal a preço de mercado e não a custo de produção como as empresas integradas. Elas estão focadas no mercado de biodiesel e precisam trabalhar continuamente, evitando as paradas usuais de uma produção flexível, para compensar o aumento de custo de matéria-prima (MENDES; COSTA, 2010).

A verticalização oferece várias vantagens. Os produtores mais integrados têm maior possibilidade de apresentar preços mais competitivos nos leilões da ANP, ao atuar em todas as etapas possíveis do processo de produção: plantio e esmagamento; esmagamento e produção do biodiesel; produção e distribuição do biodiesel. Além da produção e comercialização dos coprodutos, são usinas com mais flexibilidade e rentabilidade (BIODIESELBR, 2007) .

2.3 Definições básicas do biodiesel

Nos Estados Unidos (EUA) a definição de biodiesel pela ASTM D6751 afirma que o biodiesel é composto de “mono-alquil” ésteres de ácidos graxos de cadeia longa proveniente de óleos vegetais ou gorduras animais diante o processo químico da transesterificação, também denominado B100 (KNOTHE, 2010; USDOE, 2016). O termo ésteres mono-alquílicos indica que o biodiesel contém apenas uma ligação éster em cada molécula. Óleos vegetais crus ou refinados, gorduras animais e graxas contêm três ligações de ésteres e portanto não são legalmente biodiesel (USDOE,2016).

Na União Europeia (UE) o Parlamento e o Conselho Europeu aprovaram a Diretiva 2003/30/CE para o uso de biocombustíveis no setor de transportes, definindo o biodiesel como um “éster metílico” produzido a partir de óleo vegetal ou óleo animal, com qualidade de diesel, para ser usado como biocombustível (EU-COMMISSION et al., 2003).

No Brasil, a ANP define o biodiesel como um combustível renovável obtido a partir de um processo químico denominado transesterificação. Por meio desse processo, os triglicerídeos presentes nos óleos e gordura animal reagem com um álcool primário, metanol ou etanol, gerando dois produtos: o éster e a glicerina. O primeiro somente pode ser comercializado como biodiesel, após passar por processos de purificação para adequação à especificação da qualidade, sendo destinado principalmente à aplicação em motores de ignição por compressão (ciclo Diesel) (ANP, 2020b).

Com a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira, a definição legal foi: biocombustível derivado de biomassa renovável para uso em motores a combustão interna com ignição por compressão ou, conforme regulamento, para geração de outro tipo de energia, que possa substituir parcial ou totalmente combustíveis de origem fóssil (Lei nº 11.097, de 13 de janeiro de 2005) (BRASIL, 2005).

De acordo com Gallo (2007), as definições de “biodiesel” que possuem maior consistência técnica são aquelas que caracterizam sua composição química (mono-álquil ésteres de ácidos graxos), sua origem (vegetal ou animal), seu uso (motores diesel) e suas características técnicas (especificações). Por tanto, a definição legal de biodiesel no Brasil ainda não tem consistência técnica, desta forma, qualquer produto de origem renovável que possa ser utilizado como substituto do óleo diesel pode, em princípio, ser chamado de “biodiesel”.

A partir das definições anteriores, resulta necessário conhecer alguns conceitos do ponto de vista químico para compreender melhor o processo de produção deste biocombustível.

2.3.1 Óleos e gorduras

Os óleos e gorduras são substâncias que pertencem à classe química dos lipídeos, podendo ser de origem animal, vegetal ou microbiana (RAMOS et al., 2017). Os lipídeos são uma importante fonte de alimento e energia renovável (VAZ, 2018), que abrangem os ácidos graxos e seus derivados, esteróis, ceras e carotenoides e são uma classe de substâncias químicas cuja principal característica é serem hidrofóbicas, ou seja, não serem solúveis em água, mas solúveis em solventes orgânicos, como éter, benzeno e álcoois (RAMALHO; SUAREZ, 2013).

Os ácidos graxos são ácidos orgânicos lineares, que diferem pelo número de carbonos, variando de 4 a 22 átomos de carbono com um grupo carboxílico terminal e, pela presença das ligações, eles são chamados saturados quando todos os carbonos estão ligados por ligações

simples e insaturados quando um ou mais carbonos são ligados com ligações duplas. Com uma única ligação dupla, eles são monoinsaturados, e poli-insaturados quando contêm duas ou mais ligações duplas (Figura 2.4) (VAZ, 2018).

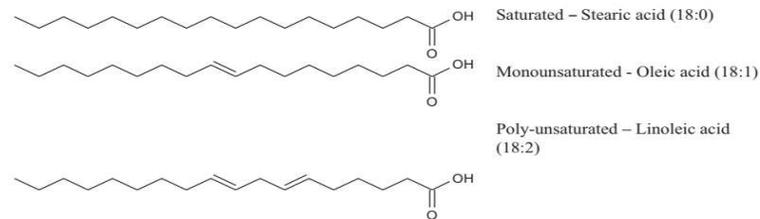


Figura 2.4: Estrutura dos ácidos graxos
Fonte: Vaz (2018)

Ácidos graxos são encontrados na natureza na forma não associada, sendo assim conhecidos como ácidos graxos livres, ou associados formando outras classes de compostos químicos. Os acilglicerídeos, representam uma das principais formas em que são encontrados, são formados pela condensação entre ácidos graxos e uma ponte de glicerol são classificados de mono-, di- ou triglicerídeos, dependendo se uma, duas ou três moléculas de ácido graxo se associam covalentemente ao glicerol, respectivamente (RAMOS et al., 2017).

Concentrando-se nos óleos vegetais, eles são formados predominantemente por triglicerídeos. Os ácidos graxos constituintes dos triglicerídeos mais comuns apresentam 12,14,16 e 18 átomos de carbonos (MORETTI, 2013). Assim é comum expressar a sua composição química em função das cadeias de ácidos graxos presentes, e não dos compostos químicos efetivamente presentes na mistura (RAMALHO; SUAREZ, 2013). Alguns dos diversos ácidos graxos de ocorrência natural que compõem óleos e gorduras estão listados na Tabela 2.5.

As características e propriedades de um biodiesel em particular serão determinadas pela porcentagem de cada ácido graxo presente no óleo ou gordura a partir da qual foi produzido. Em conformidade com USDOE (2016), para avaliar como variam as propriedades do biodiesel de diferentes matérias-primas, o critério de saturação das cadeias de ácidos graxos indica, qualitativamente, como a saturação afeta três propriedades importantes: número de cetano, ponto de névoa, e estabilidade à oxidação (Tabela 2.6). O biodiesel produzido pelos ácidos graxos saturados possui maior número de cetano e estabilidade do que os insaturados, porém é difícil seu uso em baixas temperaturas já que tem alto ponto de névoa.

Tabela 2.5: Composição em ácidos graxos (% massa) de alguns óleos e gorduras

| Fontes | Láurico (12:0) $C_6H_{24}O_2$ | Mirístico (14:0) $C_{14}H_{28}O_2$ | Palmítico (16:0) $C_{16}H_{38}O_2$ | Esteárico (18:0) $C_{18}H_{34}O_2$ | Oléico (18:1) $C_{18}H_{32}O_2$ | Linoléico (18:2) $C_{18}H_{30}O_2$ | Linolênico (18:3) $C_{18}H_{30}O_2$ |
|---------------------|-------------------------------------|--|--|--|---------------------------------------|--|---|
| Soja | | | 8-13,0 | 2,0-5,4 | 17-30-31 | 48-59 | 4,5-11,0 |
| Algodão | ND-0,2 | 0,6-1 | 21,4- 26,4 | 2,1-3,3 | 14,7- 21,7 | 46,7- 58,2 | ND-0,4 |
| Girassol | | | 5-7,6 | 1,3-3 | 14-39,4 | 48,3-74 | |
| Canola | | | 1.5-6.0 | 0.5-3.1 | 8.0-60.0 | 11.0- 23.0 | 5.0-13.0 |
| Amendoim | 0,1 | 0,5 | 8,0-14 | 1,0-4,5 | 35-69 | 12,0- 43,0 | ND-0,3 |
| Mamona ^a | | | 1,25 | 1,31 | 3,81 | 5,27 | 0,81 |
| Cartamo | | | 8 | | 16 - 20 | 71-75 | |
| Pinhão | 0,1 | 0,01 | 12,2 | 0,1 | 39 | 36,8 | 0,7 |
| Manso | | | | | | | |
| Palma de óleo | ND-0,5 | 0,5-2,0 | 39,3- 47,5 | 3,5-6,0 | 36-44 | 9,0-12,0 | ND-0,5 |
| Macaúba | 0,8 | 0,6 | 14,8- 24,4 | 2,1-4,2 | 47-72,6 | 1,0-13 | 1,0-4,0 |
| Babaçu | 40-55 | 5,2-11 | 5,8-8,5 | 1,8-7,4 | 9,0-20 | 1,4-6,6 | |
| Sebo | | 3,6 | 25-37 | 25-37 | 26-50 | 1-2,5 | |

Fonte: Adaptado de Moretti (2013), Vaz (2018)

^a Ácido Ricinoléico (18:1 OH) 87,1.

Tabela 2.6: Propriedades do biodiesel dependendo da sua composição

| Ácido graxo | Saturados | Mono-insaturados | Poli-insaturados |
|----------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| | $C_{12} : 0$ a $C_{22} : 0$ | $C_{16} : 1$ a $C_{22} : 1$ | $C_{18} : 2$ a $C_{18} : 3$ |
| Número cetano | Alto | Médio | Baixo |
| Ponto de névoa | Alto | Médio | Baixo |
| Estabilidade | Alto | Médio | Baixo |

Fonte:USDOE (2016)

2.3.2 Transesterificação

A transesterificação é o processo mais utilizado na indústria para produção do biodiesel, já que promove a redução da viscosidade e da densidade dos triglicerídeos de gordura animal ou óleo vegetal, além de outras propriedades que afetam a combustão e conseqüentemente, a eficiência do motor de ciclo diesel (FGVENERGIA, 2017).

Transesterificação ou alcoólise é a reação química que produz o deslocamento de álcool de um éster por outro em um processo semelhante à hidrólise, exceto que o álcool é usado em vez da água (MEHER; SAGAR; NAIK, 2006). A reação de transesterificação é representada pela equação geral da Figura 2.5.

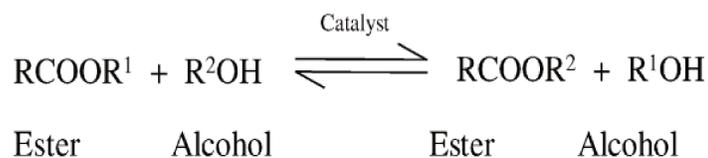


Figura 2.5: Equação geral da Transesterificação
 Fonte: Meher, Sagar e Naik (2006)

Os ésteres são caracterizados pela estrutura R – COO – R1, onde R y R1 são radicais orgânicos unidos pela “ponte” - COO -, como pode ser visto no exemplo na figura 2.6. (GALLO, 2007).

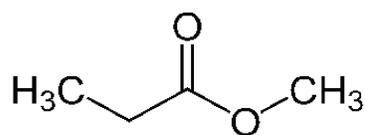


Figura 2.6: Éster: Propanoato de metila

Neste método, um triglicerídeo de gordura animal ou óleo vegetal reage com álcool (metanol ou etanol) na presença de um catalisador (ácido, básico, biológico ou metálico) formando uma mistura de ésteres alquílicos de ácidos graxos e glicerol (MORETTI, 2013). A reação requer um mol de triglicerídeos e três moles de álcool para produzir um mol de glicerol e três moles de ésteres de ácidos graxos alquílicos, conforme Meher, Sagar e Naik (2006) e sua representação esquemática global é apresentada na Figura 2.7.

Assim, cada molécula de biodiesel é um mono éster de metila, do tipo R – COO – CH₃,

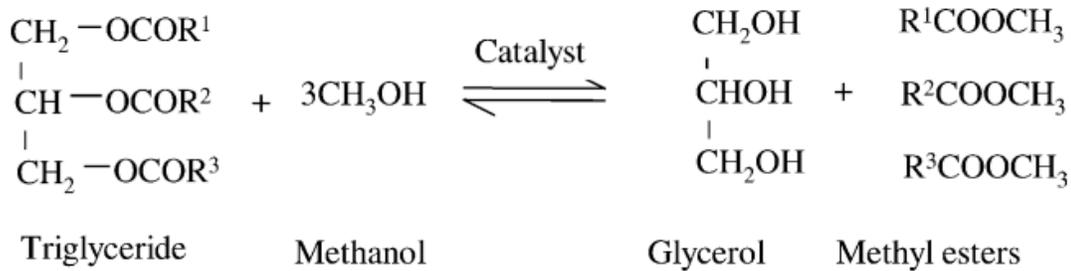


Figura 2.7: Equação geral para a Transesterificação de triglicerídeos
 Fonte: Meher, Sagar e Naik (2006)

onde R é um radical de ácido graxo e o grupo CH₃ vem do metanol. No caso do etanol, para a reação, as moléculas de biodiesel serão mono ésteres de etilo do tipo R – COO – C₂H₅ (GALLO, 2007).

A transesterificação é uma das reações reversíveis e prossegue essencialmente por mistura dos reagentes, sendo comum o uso de álcool em amplo excesso. No entanto, a presença de um catalisador acelera a conversão (MEHER; SAGAR; NAIK, 2006). O rendimento deste processo é tipicamente muito elevado, normalmente mais do que 96% e geralmente não depende do perfil de ácidos graxos da matéria-prima (KNOTHE, 2010).

Deve salientar-se que quase todo o biodiesel produzido mundialmente é do tipo metílico. No Brasil apesar da ampla disponibilidade da industrial de etanol e da grande vocação agrícola, o país também utiliza metanol importado, pois esse álcool é mais barato que o etanol. Não sendo só por isso, com o metanol, a etapa de reação é mais rápida e possui maior rendimento. Além disso, a separação do biodiesel do álcool em excesso é mais fácil com o metanol (MORETTI, 2013).

De acordo com Knothe (2010), na transesterificação, ao utilizar outros álcoois diferentes do metanol, algumas alterações nas condições da reação são necessárias, tais como temperatura mais elevada (cerca do ponto de ebulição do álcool) podendo ocorrer outros efeitos, como uma possível formação de emulsões ao produzirem ésteres etílicos. Pequenas quantidades dos produtos intermediários ou laterais são sempre deixados de fora da reação, como diglicerídeos, monoglicerídeos e ácidos graxos livres, assim como vestígios do coproduto glicerol, ou insumos como álcool e catalisador. Esses componentes menores (impurezas) podem influenciar nas propriedades do combustível pelo que devem ser limitadas pelas especificações correspondentes no biodiesel.

2.3.3 Qualidade do biodiesel

É muito importante estabelecer padrões de qualidade para o biodiesel, pois apesar da sua semelhança físico-química para óleo diesel depois do processo da transesterificação (Tabela 2.7), o biodiesel tem algumas particularidades que precisam ser cuidadas.

Tabela 2.7: Características do diesel derivado do petróleo e do biodiesel

| Propriedades | Diesel | Biodiesel |
|---|--------|-----------|
| Massa específica (kg/l) | 0,883 | 0,880 |
| Valor calorífico (MJ/l) | 38,3 | 33,3 |
| Viscosidade (mm ² /s a 40°C) | 3,9 | 4,7 |

Fonte: Vaz (2018)

Segundo Knothe (2010) e Vaz (2018), o biodiesel pode ser obtido a partir de várias fontes com diferentes perfís de ácidos graxos, parâmetros que podem alterar as propriedades do biocombustível. Ele é menos estável do que o diesel, que mantêm as suas características inalteradas por longos períodos.

O biodiesel feito a partir de gordura bovina, por exemplo, devido à maior presença de gorduras saturadas, tende a solidificar mais facilmente em baixas temperaturas do que o biodiesel produzido a partir de óleos vegetais, e isso pode causar o entupimento dos bicos injetores, comprometendo a queima eficiente do combustível (FGVENERGIA, 2017).

Gallo (2007) e Knothe (2010), mencionam que alguns dos problemas técnicos também estão relacionados com contaminantes no produto final que devem ser eliminados para obter as características adequadas para seu uso em motores diesel.

Devido a essas características, a maioria dos países criaram políticas rígidas para o controle da qualidade de utilização de biodiesel e a sua mistura com diesel. Os principais standards de qualidade são as normas ASTM D6751 usada nos EUA e a norma EN 14214 usada na UE. No Brasil, a ANP define os padrões de qualidade do biodiesel (GALLO, 2007).

A Resolução ANP nº 45/2014 atualmente em vigor estabelece a especificação do biodiesel no território nacional (ANP, 2014). No entanto, considerando os resultados dos testes para utilização de B15 do MME (2019), a especificação foi alterada para a Resolução ANP nº 798/2019 que determina a obrigatoriedade da aditivação do biodiesel com antioxidante e estabelece novo limite da característica estabilidade à oxidação (ANP, 2018). A Tabela 2.8 apresenta uma comparação entre a especificação brasileira e a especificação da UE e dos EUA.

Tabela 2.8: Especificações do biodiesel na UE, EUA e Brasil

| Standards do Biodiesel | | UE | EUA | Brasil |
|--|--------------------|-----------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Especificação | | EN 14214:2012 | ASTM D 6751- 15 | Res. 45/2014 - 798/2019 |
| Densidade a 15 °C | g/cm ³ | 0,86–0,90 | | 0,85–0,9 (20 °C) |
| Viscosidade a 40 °C | mm ² /s | 3,5–5,0 | 1,9–6,0 | 3,0–6,0 |
| Destilação | %/°C | | 90%, 360 °C | |
| Ponto de fulgor, mín. | °C | 101 mín. | 93 mín. | 100 mín. |
| Ponto de entupimento de filtro a frio, máx. | °C | Específico do país | | Pela região |
| Ponto de névoa | °C | | Anotar | |
| Enxofre total, máx. | mg/kg | 10 máx. | 15 máx. | 10 máx. |
| Resíduo de Carbono | % massa | | 0,05 máx. | |
| Cinzas sulfatadas, máx. | % massa | 0,02 máx. | 0,02 máx. | 0,02 máx. |
| Água | mg/kg | 500 máx. | | 200 máx. |
| Contaminação total, máx. | mg/kg | 24 máx. | | |
| Corrosividade ao co- bre | 3h/50°C | 1 | 3 | 1 |
| Estabilidade à oxida- ção | hrs;110°C | 8 h mín. | 3 h mín. | 12 h mín. |
| Número Cetano | | 51 mín. | 47 mín. | Anotar |
| Índice de acidez, máx. | mgKOH/g | 0,50 máx. | 0,50 máx. | 0,50 máx. |
| Metanol | % massa | 0,20 máx. | 0,20 máx. or Fp < 130 °C | 0,20 máx. |
| Teor de éster, mín. | % massa | 96,5 mín. | | 96,5 min |
| Monoacilglicerol, máx. | % massa | 0,70 máx. | 0,40 máx. | 0,70 máx. |
| Diacilglicerol, máx. | % massa | 0,20 máx. | | 0,20 máx. |
| Triacilglicerol, máx. | % massa | 0,20 máx. | | 0,20 máx. |
| Glicerol livre, máx. | % massa | 0,02 máx. | 0,02 máx. | 0,02 máx. |
| Glicerol total, máx. | % massa | 0,25 máx. | 0,24 máx. | 0,25 máx. |
| Índice de Iodo | % massa | 120 máx. | Anotar | Anotar |
| Ácido linolênico ME | % massa | 12 máx. | | |
| Fósforo, máx. | mg/kg | 4 máx. | 10 máx. | 10 máx. |
| Sódio + Potássio, máx. | mg/kg | 5 máx. | 5 máx. | 5 máx. |
| Cálcio + Magnésio, máx. | mg/kg | 5 máx. | 5 máx. | 5 máx. |

Fonte: Vaz (2018), ANP (2014), ANP (2018)

As propriedades do biodiesel mais relevantes encontram-se sumarizadas na tabela 2.9

Tabela 2.9: Principais propriedades de qualidade do biodiesel

| Parâmetros | Descrição |
|-----------------------------------|---|
| Viscosidade | Propriedade importante para determinar o tamanho médio das gotas que formam o jato de combustível injetado no cilindro do motor. Se a forma de jato e do tamanho médio das gotas do combustível são muito diferentes daqueles para o qual o motor foi projetado, haverá problemas na combustão, formação de depósitos e o óleo de lubrificação será contaminado por ésteres ou outros produtos de combustão incompleta (GALLO, 2007). |
| Lubricidade | Ventagem técnica do biodiesel, já que é muito maior que a do diesel de petróleo com baixa quantidade de enxofre. A adição de 2% de biodiesel no diesel melhora sua lubrificação significativamente (mais de 50%) sendo um parâmetro importante porque os motores a diesel exigem que o combustível tenha propriedades de lubrificação especialmente no sistema de injeção que tem alta precisão mecânica e é lubrificado pelo próprio combustível (KNOTHE, 2010; GALLO, 2007). |
| Ponto de fulgor mínimo | É a temperatura em que um combustível se torna inflamável na presença de uma chama ou faísca. Tal propriedade é definida para a segurança no manuseio do produto, para garantir que o biodiesel não tenha muito metanol livre que aumente a inflamabilidade. O ensaio de ponto de fulgor deve apresentar valor mínimo de 100 C no Brasil. Quando o resultado for superior a 130 C fica dispensada a análise de teor de metanol/etanol (PINHO, 2015). |
| Ponto de névoa e ponto de Fluidez | É a temperatura na qual aparecem os primeiros sólidos no combustível, mas o combustível pode ainda fluir, embora esses sólidos podem levar ao entupimento do filtro de combustível. O ponto de fluidez geralmente alguns graus abaixo do ponto de névoa, é a temperatura na qual o combustível já não pode ser vertido livremente (KNOTHE, 2010). Essas propriedades são consideradas importantes no que diz respeito à temperatura ambiente em que o combustível deva ser armazenado e utilizado. Geralmente, espera-se que os combustíveis operem a temperaturas tão baixas quanto seu ponto de névoa. |
| Quantidade de água | Indica o máximo valor que pode estar presente no combustível, excesso de água pode causar corrosão ou um ambiente ótimo para o crescimento dos microrganismos. Técnicas de secagem inadequadas durante a fabricação ou contato com água em excesso durante o transporte ou armazenamento podem causar que o biodiesel fique fora da especificação (USDOE, 2016). A especificação brasileira é a mais exigente no que diz respeito ao teor de água. Os 200 mg/kg adotados, são cerca da metade do que se tolera no resto do mundo, exigência que se faz necessária, devido às particularidades logísticas do extenso território nacional (FGVENERGIA, 2017). |
| Estabilidade oxidativa | Refere-se a tendência do biocombustível reagir com o oxigênio na presença de ar, luz, temperaturas elevadas e de materiais estranhos. Portanto, cadeias de ésteres insaturados contidos no biodiesel tendem a ter menor estabilidade oxidativa e vice-versa, embora um certo número de outros fatores influencia a estabilidade oxidativa consideravelmente (KNOTHE, 2010). |
| Número cetano | É uma medida da qualidade da ignição e um indicador do comportamento do combustível para iniciar a combustão. Números de cetano mais altos melhoram a partida a frio, diminuem a fumaça branca de partida, melhoram a durabilidade do motor e reduzem o nível de ruído do motor (GALLO, 2007). |

Fonte: Elaboração própria

2.3.4 O biodiesel e as emissões diretas

A produção de biodiesel pode contribuir para uma significativa redução de emissões, tanto de GEE quanto de outras substâncias nocivas à saúde humana. Segundo o reportado por Luque (2012), USDOE (2016) e Cerri et al. (2017), quando o biodiesel substitui o diesel, diferentes Avaliações do Ciclo de Vida (ACV) estimam que dependendo da matéria-prima, da rota tecnológica de conversão e da proporção de teor de mistura, o biodiesel tem potencial de mitigação de GEE de 23-74% sobre o diesel fóssil.

Quando as oleaginosas crescem (plantas que contém um alto teor de óleo tanto a partir de suas sementes como a partir de seus frutos), elas extraem dióxido de carbono (CO_2) do ar para produzir caules, raízes, folhas e sementes. Depois que o óleo é extraído das oleaginosas, é convertido em biodiesel. Quando o biodiesel é queimado, o CO_2 e outras emissões são liberadas e devolvidas à atmosfera. Em suma, a maior parte desse CO_2 emitido não aumenta a concentração líquida de CO_2 no ar porque a próxima safra de oleaginosas reutiliza o CO_2 à medida que cresce, embora uma pequena fração do carbono emitido é derivado fóssil por causa dos combustíveis fósseis e produtos químicos usados na agricultura e no processo industrial, especialmente se o metanol usado é originário do gás natural, distribuição e transporte do biodiesel (USDOE, 2016).

A literatura apresenta diversos estudos sobre a influência da adição do biodiesel nas emissões diretas nos motores dos veículos de ciclo diesel. O estudo elaborado pela *Environmental Protection Agency* (EPA) em 2002 é amplamente citado. Conforme mostra a Figura 2.8, a adição de biodiesel no diesel traz melhorias significativas nas emissões de monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC) e materiais particulados (MP), com um pequeno incremento nas emissões do óxido de nitrogênio (NO_x). Assim, uma adição de 20% de biodiesel baseado em soja, reduz em 21,1% as emissões de HC, em 11,1% as emissões de CO e em 10% as de MP. Em contrapartida, há um aumento de emissões de compostos nitrogenados, porém pouco expressivos (2%) (EPA, 2002).

O aumento das emissões de (NO_x) associado ao biodiesel tem sido confirmado por muitos outros estudos, porém na Figura 2.8 não consta o importante efeito sobre os óxidos de enxofre (SO_x) (principais constituintes da chuva ácida). Como o biodiesel não contém enxofre, as emissões destes óxidos são reduzidas com o uso do biodiesel (FANG, 2012).

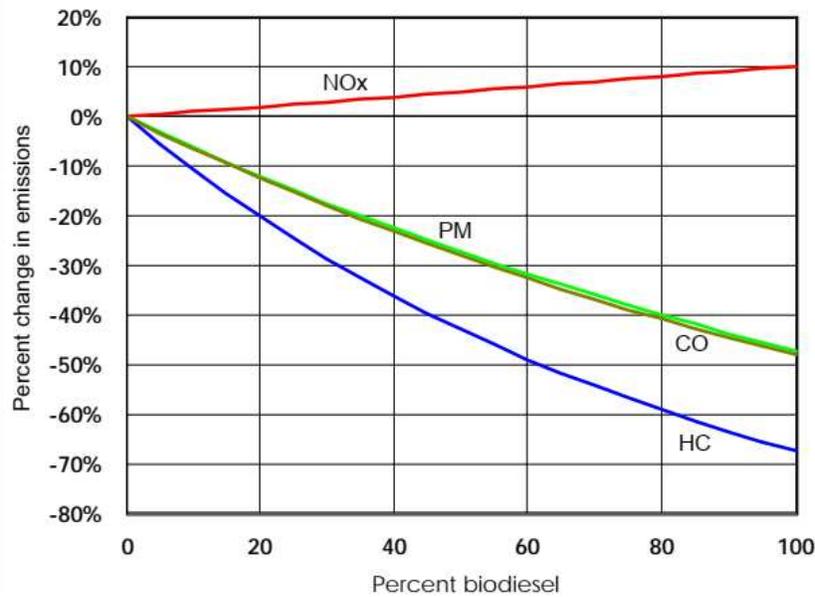


Figura 2.8: Efeito da adição de biodiesel nas emissões diretas em motores de ciclo diesel
Fonte: EPA (2002)

No Brasil, os Relatórios do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento MAPA (2014), MAPA (2015a) avaliaram o efeito da adição de biodiesel nas emissões dos motores de ciclo diesel, principalmente em testes de bancadas, segundo diferentes ciclos e com o uso de biodiesel de diferentes oleaginosas e gorduras no Brasil e no mundo; de modo geral confirmam-se os resultados da EPA em 2002. O aumento no teor de biodiesel tende a reduzir as emissões de MP, HC e CO, enquanto tem uma influência variável nas emissões de (NO_x). O efeito é proporcional à quantidade de biodiesel adicionada, resultando num balanço de emissões favorável às misturas elevadas ora analisadas (Figura 2.9).

Outro aspecto que se ressalta no relatório do MAPA (2015b), referente ao NO_x , indica que as emissões desse poluente são fortemente dependentes das condições de operação do motor, carga, rotação e toque do motor. Existem testes com resultados que sugerem, inclusive, a possibilidade de redução nas emissões de NO_x nos motores dotados de conversor catalítico, situação em que se enquadram os motores da fase P7 do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE) a partir de 2012.

De acordo com EPE (2020a), a elevada participação de renováveis na matriz energética nacional proporciona uma significativa redução nas emissões de GEE, as emissões evitadas pelo uso de biodiesel em comparação ao seu equivalente fóssil (diesel), foi de 16,5 milhões de toneladas de CO_2eq .

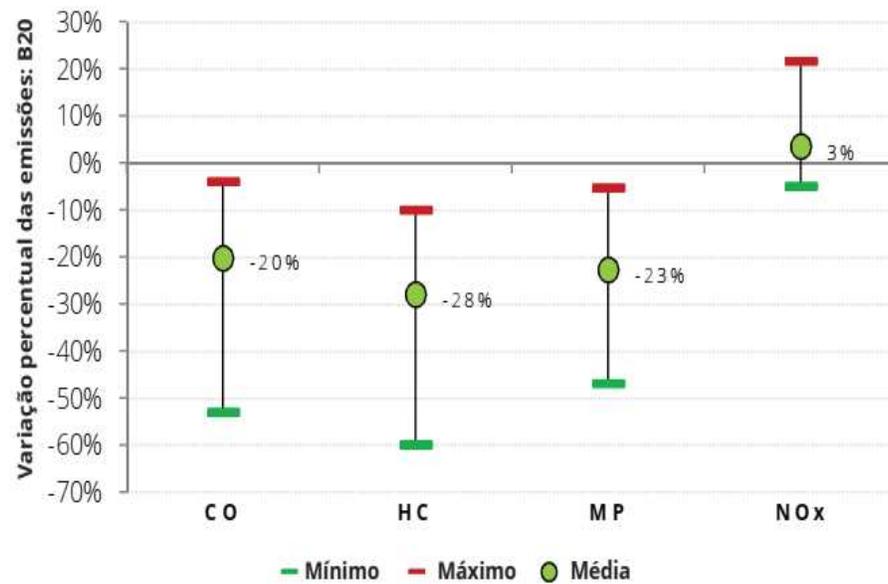


Figura 2.9: Variação das emissões CO, HC, MP e NO_x com o uso do B20
Fonte: MAPA (2015a)

Capítulo 3

Matérias-primas oleaginosas para a produção do biodiesel no Brasil

O presente capítulo apresenta uma revisão das matérias-primas tradicionais para a produção do biodiesel, focando no cenário mundial das oleaginosas, as cotações dos óleos vegetais mais usados na cadeia produtiva, discutindo o aspecto relevante da competição entre óleos vegetais com fins alimentares ou energéticos e finalmente se apresentam algumas alternativas não convencionais e promissoras para a produção de biodiesel particularmente no Brasil.

3.1 Matérias-primas tradicionais para a produção mundial do biodiesel

Como foi apresentado no capítulo anterior, óleos e gorduras constituem as principais matérias-primas para a fabricação de biodiesel, podendo ser de origem vegetal proveniente de plantas oleaginosas; da gordura animal, ou originada por microalgas e outros microrganismos oleíferos, assim como de óleo residual (RAMOS et al., 2017).

Embora mais de 350 espécies de plantas oleaginosas já foram identificadas como fontes potenciais para sua utilização na produção de biodiesel, a produção global de biodiesel continua sendo dominada pelas matérias-primas tradicionais resultantes de sistemas de produção agrícola bem estabelecidos no mundo (Figura 3.1). Assim, óleos vegetais comestíveis são as principais fontes a usar como óleo de soja, de palma, de canola, de semente de girassol e semente de algodão (FAVARO et al., 2017; RAMOS et al., 2017; FANG, 2012).

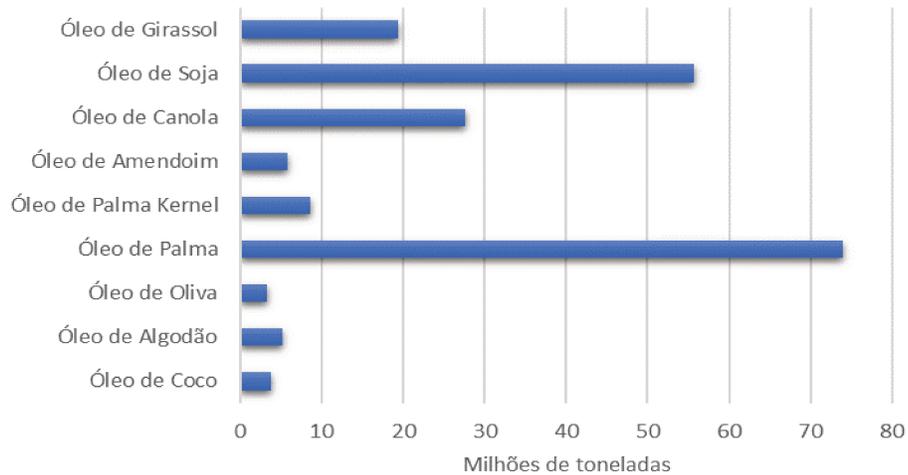


Figura 3.1: Produção mundial dos principais óleos vegetais em 2018
 Fonte: Adaptado de (USDA, 2020)

Em conformidade com dados específicos da OECD/FAO (2019), cerca de 77% do biodiesel mundial é baseado em óleos vegetais, como mencionado (30% óleo de soja, 25% óleo de palma e 18% óleo de canola) ou de resíduos de óleos de cozinha (22%). Tecnologias mais avançadas baseadas em matérias-primas celulósicas ou microbianas não têm maior contribuição no total da produção do biocombustível.

A Tabela 3.1 apresenta as matérias-primas mais utilizadas entre os maiores produtores de biodiesel no mundo em 2018.

Tabela 3.1: Maiores produtores de biodiesel no mundo e as principais matérias-primas utilizadas

| Maiores Produtores | Principais matérias primas |
|--------------------|-----------------------------------|
| Europa | Óleo de canola/ Óleos de descarte |
| Estados Unidos | Óleo de soja/ Outros óleos |
| Indonésia | Óleo de palma |
| Brasil | Óleo de soja |
| Argentina | Óleo de soja |
| Tailândia | Óleo de palma |
| China | Óleos de descarte |
| Colômbia | Óleo de palma |
| Canadá | Óleos de descarte |

Fonte: OECD/FAO (2019)

Geralmente, fatores como geografia, clima e economia, determinam qual é o óleo vegetal de maior interesse para uso potencial no biodiesel. Assim, nos EUA, o óleo de soja é considerado

como a principal matéria-prima; dentro da UE, é o óleo de canola; e em países tropicais, é o óleo de palma (KNOTHE, 2001).

No entanto, também existem as matérias-primas alternativas que normalmente surgem por necessidade em regiões do mundo onde as fontes apresentadas acima não estão disponíveis localmente, ou como parte de um esforço para reduzir a dependência do petróleo importado (MOSER, 2009).

Fang (2012), menciona que no Brasil por exemplo, há óleos não comestíveis acessíveis e facilmente disponíveis. Eles podem ser obtidos de outras oleaginosas como *Jatropha curcas* (pinhão manso), *Ricinus communis* (mamona) L., *Pongamia pinnata*, *Calophyllum inophyllum* (puna, nudá ou undeira), *Hevea brasiliensis* (árvore-da-borracha), *Azadirachta indica* (nim), *Madhuca indica and Madhuca longifolia* (mahua), *Ceiba pentandra* (mafumeira, sumaúma ou samaúma), *Simmondsia chinensis* (jojoba), *Euphorbia tirucalli* (avelós), *Attalea speciosa* (baçaú) entre muitas outras.

3.2 Análise do mercado mundial de oleaginosas tradicionais

A experiência internacional indica que a seleção da matéria-prima tem um grande impacto sobre o custo final da produção industrial de biodiesel. Em meados da década de 1990, cerca de 60-75% do custo era devido à matéria-prima, porém, com o passo dos anos esse valor chegou a atingir até 85% do custo final (CANAKCI; SANLI, 2008). Por conseguinte, resulta importante discutir os preços dos óleos vegetais tradicionais no mercado, principais fontes para a geração do biocombustível, uma vez que eles determinam amplamente a dinâmica de preços do biodiesel.

Adicionalmente, os preços dos óleos são importantes para as usinas produtoras de acordo com o grau de verticalização como foi visto na seção 2.2. Existem as totalmente integradas que produzem desde a etapa agrícola até biodiesel, as parcialmente integradas produtoras de óleos e biodiesel e as não integradas que produzem unicamente biodiesel. Em cada caso as condições de análise de custo de produção de biodiesel são diversas.

3.2.1 Evolução dos preços dos principais óleos vegetais

O relatório estadunidense de mercados e comércio mundial de oleaginosas USDA (2020) apresenta a evolução dos preços médios dos principais óleos vegetais nas últimas décadas, cuja tendência é similar (Figura 3.2). Observa-se na primeira década dos anos 2000, um aumento progressivo nos preços dos óleos vegetais, chegando a um período de preços extremamente altos em 2007/08 ponto conhecido como a crise alimentar mundial, repetindo o pico em 2010/11 (FAO et al., 2011).

A partir de 2014, percebe-se uma queda no preço dos óleos vegetais de palma, soja, algodão, canola e girassol, refletindo ajustes ocorridos na oferta e demanda global daquelas *commodities* e principalmente pela influência dos preços do petróleo. De acordo com THE WORLD BANK (2020), existe uma alta relação entre os preços das *commodities* agrícolas primárias e do petróleo, efeito justificado pelo fato de que a fase agrícola usa em grande medida insumos baseados em derivados do petróleo, como fertilizantes químicos, combustível para maquinaria e transporte, gerando assim movimentos pontuais de elevação ou retração dos custos de produção dos óleos vegetais. É possível avaliar a tendência dos preços do petróleo na Figura 3.3 e ver a relação com o preço dos óleos de origem vegetal.

Além da influência da oferta e demanda, os preços internacionais (Figura 3.2) tendem a acompanhar os preços dos demais óleos vegetais, visto que existe uma grande capacidade de substituir um óleo por outro na grande maioria de seus empregos e, por isso, competem em muitos mercados, principalmente no alimentício e energético (GALLO, 2007; MAPA, 2018).

Dentre os óleos vegetais apresentados na Figura 3.2, o óleo de amendoim é o mais valorizado no mercado internacional, em torno de 54% mais caro do que o óleo de palma, que é de longe o óleo vegetal mais barato no mercado global ao longo do período. Em segundo lugar vem o óleo de girassol 38% mais custoso do que a referência, entretanto os óleos de canola e algodão estão na faixa de 26 a 27% mais caros. Finalmente, o óleo de soja disputa o preço mais baixo, porém, manteve-se em média 15% superior ao preço do óleo de palma ao longo dos vinte anos.

De acordo com a informação apresentada nesta seção, não é por acaso que os maiores volumes de óleos vegetais comercializados correspondam as principais matérias-primas, caracterizadas por uma larga escala de produção, por um mercado bem estabelecido e preço de venda baixo como a soja e a palma de óleo.

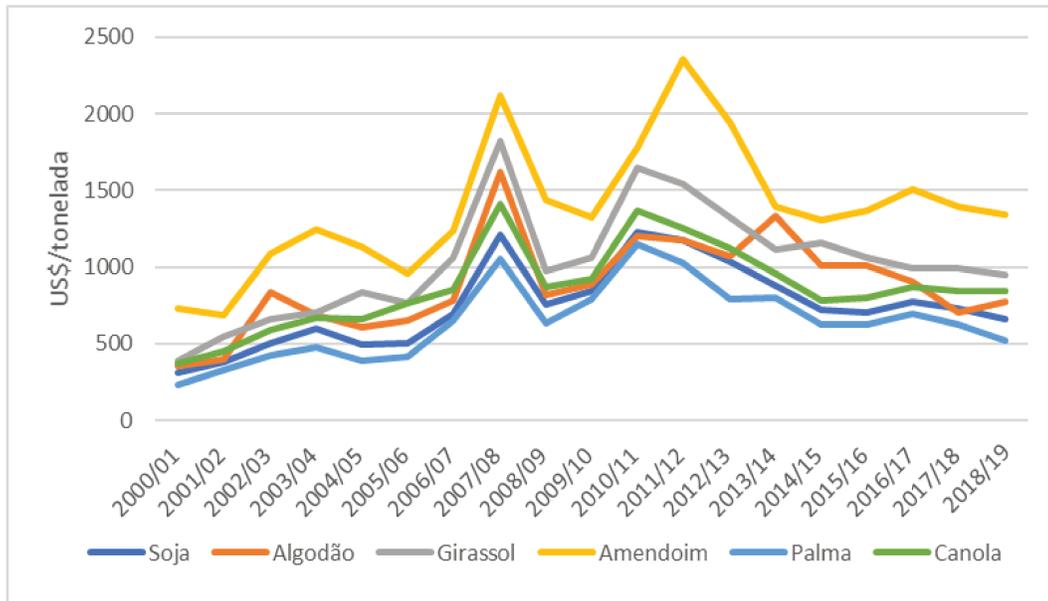


Figura 3.2: Evolução dos preços médios dos óleos vegetais entre portos
 Fonte: Elaborado a partir de (USDA, 2020)



Figura 3.3: Evolução dos preços do petróleo bruto - Média de Brent, Dubai e WTI
 Fonte: Elaborado a partir de (THE WORLD BANK, 2020)

3.2.2 Principais usos globais das oleaginosas

Globalmente a produção de oleaginosas é dirigida para ser esmagada e produzir óleos vegetais, enquanto gera farelo e torta de extração conjuntamente (UFOP, 2019). Uma fonte oleaginosa pode ser usada como alimento humano, ração animal, combustível e matéria-prima para aplicações industriais (Figura 3.4). A demanda das oleaginosas é impulsionada por um conjunto de fatores comuns, como a dinâmica da população, a renda disponível, preços e preferências do consumidor. Mas desde inícios dos anos 2000 uma parte significativa do seu uso crescente é destinado à produção de biocombustíveis, particularmente do biodiesel, fato que foi impulsionado quando as políticas públicas começaram a exigir seu uso em mandatos obrigatórios de mistura, tendo como exemplo, Brasil a União Europeia e os Estados Unidos (OECD/FAO, 2019).

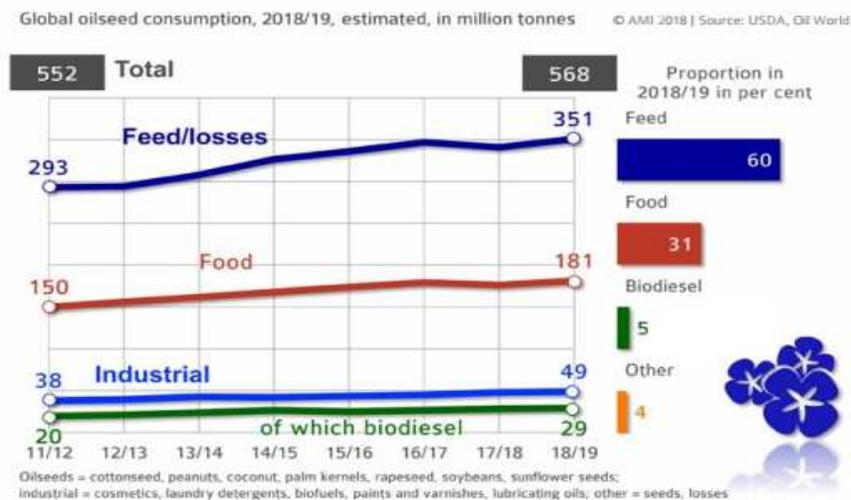


Figura 3.4: Consumo global e principal uso das oleaginosas no mundo
Fonte: UFOP (2019)

Na figura anterior, pode-se observar a evolução do consumo global das oleaginosas de 2011 até 2018. Para esse último ano, verifica-se cerca de 60% das oleaginosas tradicionais foram destinadas à produção de ração animal, em torno de 31% é usado como alimento e apenas 5% no biodiesel.

Ainda quando aquele uso para a produção do biodiesel seja pouco significativo, ao utilizar óleos vegetais comestíveis como matérias-primas, a produção desse óleo deve competir com o consumo direto alimentício e conseqüentemente com seus preços (GALLO, 2007). Assim, os óleos vegetais competem em muitos mercados, principalmente no alimentício e energético.

Segundo Mendes e Costa (2010), ao se utilizar um óleo vegetal alimentar para produzir biodiesel, aumenta-se a demanda daquele óleo e, conseqüentemente, há uma pressão de alta de seu preço, uma vez que a quantidade ofertada nem sempre aumenta no mesmo ritmo da demanda. As discussões pelos usos e preços dos óleos vegetais, colocam a produção de biodiesel na margem da competição com a produção de alimentos.

3.2.3 Competição entre óleos vegetais com fins alimentares ou energéticos

O debate conhecido como alimento versus combustível ganhou impulso com a crise de oferta de alimentos em 2007/08, quando a produção de biocombustíveis foi apontada como a principal razão para o aumento dos preços dos alimentos, contudo, diversos aspectos estão associados a esse cenário.

De acordo com Flammini (2008) e Timmer (2008), fatores que aumentaram a sensibilidade dos preços dos alimentos no período em questão foram: o preço bem mais alto do petróleo que impactou na indústria agrícola (através dos combustíveis usados em tratores e transportes, além de pesticidas e fertilizantes); o surgimento de biocombustíveis (estimulando a demanda de grãos e oleaginosas); a fraqueza do dólar; economias emergentes aumentaram sua demanda de alimentos à medida que a renda per capita aumentou (por exemplo China e Índia, grandes consumidores de soja e óleos vegetais); as especulações maciças de novos participantes financeiros que buscavam melhores retornos do que em ações ou imóveis inundaram os mercados das *commodities* apostando em preços mais altos, e as perdas de safras relacionadas ao clima (Seca na Austrália, na Argentina, incêndios na Rússia e danos causados pela geada nos EUA, Canadá e na UE). Esses eventos resultaram em proibições de exportação e especulações de curto prazo, causando tumultos e instabilidade política em mais de 30 países em todo o mundo (FAO et al., 2011).

Embora posteriormente tenha sido demonstrado que o impacto da produção de biocombustíveis foi limitado nessa crise, o assunto ainda é bastante contencioso e como consequência, há aversão à produção de biocombustíveis usando matérias-primas alimentares (VAZ, 2018; FAO et al., 2019).

A União para a Promoção de Plantas Oleaginosas e Proteicas - UFOP (2019) uma das principais representações de produtores e processadores de oleaginosas da Europa, aponta que a motivação de cada país é diferente para a produção de biodiesel, ainda quando certamente

a maior força motriz que promove os biocombustíveis são os requisitos legais de mistura nos combustíveis fósseis. Assim, os interesses dos EUA e do Brasil, por exemplo, concentram-se na segurança do suprimento no setor de energia e na redução das importações de combustíveis fósseis, enquanto a UE atribui grande importância à proteção do clima e ao aumento da proporção geral de energia renovável gerada. Os objetivos em países asiáticos, como Malásia, Indonésia e China, mas também na Argentina, são diferentes novamente. Nesses países, o principal objetivo é reduzir o excedente de óleo vegetal, em um esforço para estabilizar os preços de mercado. Entretanto, segundo Walter (2007) em todos os casos, a preservação dos interesses dos agricultores domésticos é uma questão igualmente fundamental.

Visto isso, os países produtores de biodiesel membros da UE propõem discussões em que são colocadas as possibilidades de substituição gradual dos biocombustíveis provenientes de matérias-primas destinadas à alimentação pelos biocombustíveis avançados produzidos a partir de resíduos agrícolas, industriais e urbanos que não concorrem com aqueles orientados para a produção de alimentos. Essa pauta que insere o apoio aos biocombustíveis avançados está permeada por argumentos da indústria europeia de biodiesel que reconhece seus limites para o crescimento da produção do biocombustível atrelado aos sistemas alimentares, impondo especificações técnicas nas quais o biodiesel produzido com base em outras fontes como óleo de soja e palma não se enquadram (UFOP, 2019).

Nesse sentido, também nascem iniciativas de sustentabilidade como a Diretiva de Energias Renováveis (EU-RED), que exige dos Estados Membros da UE, que pelo menos 10% do uso de energia de transporte se baseie em energias renováveis até 2020 e aumente para 14% até 2030, monitorando os impactos nos preços, produção e consumo alimentar e reduzindo os biocombustíveis de “alto risco de ILUC” (Mudança de Uso do Solo Indireta – ILUC), ou seja aqueles que são produzidos a partir de alimentos e forragens que requerem uma expansão significativa de terras com alto estoque de carbono, como florestas, pântanos e turfeiras (OECD/FAO, 2019).

Reconhecendo esta situação, a importância da produção de matéria-prima vegetal comestível para a produção global de biocombustíveis é questionada. A questão ética é se essas matérias-primas deveriam ou não ser cultivadas e processadas para fins energéticos, embora a parcela de matéria-prima agrícola usada na produção de biocombustíveis represente apenas 12% do uso global UFOP (2019).

De qualquer maneira, a mudança do uso de produtos comestíveis para as culturas não

alimentares como matéria-prima para a produção de biocombustível vem acontecendo há vários anos em conformidade com Flammini (2008), principalmente por causa dos preços mais altos dos alimentos e volatilidade (*commodities* alimentares estão fortemente vinculados a outros mercados e políticas) e por causa das visões críticas na comunidade internacional, sobre os inconvenientes que os biocombustíveis podem ter nas comunidades pobres.

No entanto como foi visto nesta seção, isso vai depender de diferentes fatores e da motivação de cada país, mas é desejável desenvolver a oferta de óleos vegetais a partir de fontes oleaginosas que não concorram com o uso alimentar, seja no preço, seja na ocupação do solo, seja no uso do recurso.

3.3 Oleaginosas para a produção de biodiesel no Brasil

O Brasil, além de possuir larga experiência na produção de biocombustíveis e apresentar condições climáticas favoráveis para tal, possui área agrícola suficiente para o plantio de culturas com fins energéticos de forma a não afetar a produção de alimentos ou a biodiversidade, o que representa uma vantagem que deve ser aproveitada. Diferentemente de países da Europa, por exemplo, o Brasil não tem restrições de área agrícola (FGVENERGIA, 2017).

Segundo resultados da EPE (2018b), o Brasil é um grande produtor agrícola, de pecuária e florestal, o que o coloca entre os principais atores no cenário internacional da bioenergia. É detentor de uma área potencial para expansão da fronteira agrícola de 144 milhões de hectares sem impedimentos legais e consoante as diretrizes ambientais, da qual grande parte já apresenta uso antrópico, classificado como pecuária ou agropecuária, ou é coberta por vegetação nativa. Área que com manejo adequado e por meio de aplicação de tecnologia, pode ser usada ou recuperada na produção de alimentos e biocombustíveis.

Além disso, existem no país mais de 200 espécies que produzem óleo em frutos e grãos, com diferentes potencialidades e adaptações naturais às condições edafoclimáticas, que podem ser usadas para a produção de biocombustíveis ou outros fins de maior valor agregado (CSOB/MAPA, 2019).

Com o estabelecimento do biodiesel na agenda da política energética do país no final dos anos 1990 e início dos anos 2000, constitui-se o objetivo de expandir os mercados das oleaginosas, em particular para a soja que encontraria uma possibilidade de ampliar ainda mais a produção,

e a exportação de farelo e, ao mesmo tempo, encontrar novo mercado, mais valorizado, para seu óleo, e com o PNPB outras oleaginosas ocupariam espaço, especialmente aquelas produzidas pela agricultura familiar o que também proporcionaria a distribuição regional da produção (SAMPAIO, 2017).

Nesse caminho, segundo o relatório do Banco de Cooperação Internacional do Japão JBIC (2006), o MAPA e a Embrapa no começo do PNPB selecionaram cinco espécies (soja, palma de óleo ou dendê, mamona, girassol e colza) como produtos elegíveis para a produção do biodiesel, considerando parâmetros de seleção como: (a) alto teor de óleo; (b) produtos que já houvessem sido cultivados; (c) produto representativo da região; (d) métodos de cultivo conhecidos. Além dessas cinco culturas, plantas como pinhão manso, nabo forrageiro e amendoim estariam sendo consideradas também como matéria-prima.

Assim, o óleo de soja se configurou rapidamente como a principal fonte, com participação média de 74% na matriz de óleos usados na produção de biodiesel ao longo dos anos. A gordura animal, matéria-prima que neste trabalho não será discutida, é a segunda fonte, seguida do algodão. Por fim, as demais oleaginosas e fontes graxas representaram historicamente uma contribuição inferior a 5% na cadeia de produção do biodiesel. No entanto, eles vêm crescendo ao longo do tempo, como se apresenta na Figura 3.5 que trata da evolução de matérias primas utilizadas na fabricação de biodiesel até 2019.

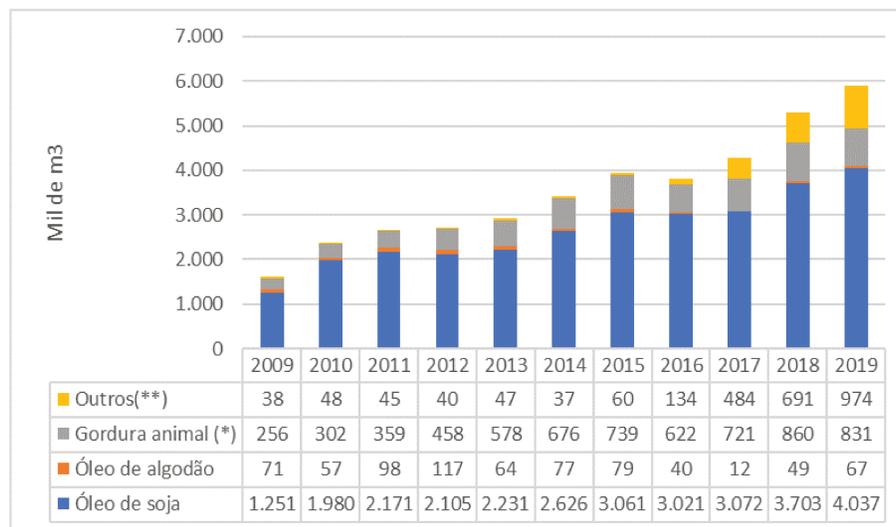


Figura 3.5: Matérias-primas utilizadas na produção de biodiesel (B100)

Fonte: (ANP, 2020a), *1Inclui gordura bovina, de frango e de porco, **Inclui óleo de palma, de amendoim, de nabo-forrageiro, de girassol, de mamona, de sésamo, de canola, de milho, de fritura usado e outros materiais graxos.

Antes de iniciarmos o estudo sobre as oleaginosas não convencionais para produção do biodiesel, é oportuno apresentar um breve cenário sobre a soja no Brasil e seu cultivo.

3.3.1 O complexo da soja

A soja (*Glycine max* L.) pertence à família *Fabaceae*, de ciclo anual. O grão de soja contém 14 a 17% de óleo e 33 a 40% proteína (SOUZA; SEABRA; NOGUEIRA, 2017), a produtividade média na safra 2018/2019 foi de 3206 kg/ha, ocupando uma área de 35,87 milhões de hectares (CONAB, 2019a), que produz cerca de 620 l/ha (EPE, 2018a). A soja possui cerca de 19-30% de ácido oleico (18:1) e 44-62% de ácido linoleico (18:2) (FANG, 2012).

A *commodity* é a fonte de proteína vegetal mais consumida para produzir proteína animal junto com o milho, aproximadamente 90% dos grãos são direcionados ao processo de esmagamento, que irá gerar farelo e óleo de soja, em uma proporção próxima a (80/20), sem considerar as perdas. Não obstante, seu óleo também assume papel importante ao ser o segundo mais consumido mundialmente, atrás apenas do óleo de palma (HIRAKURI; LAZZAROTO, 2014). Essa condição coloca o farelo proteico como principal produto, o óleo vegetal como um subproduto e a produção de biodiesel como um novo segmento a ser agregado (SAMPAIO, 2017).

A soja é uma das principais matérias-primas do setor de óleos vegetais, é um dos grandes complexos agroindustriais da agricultura do país e sua alta relevância na produção de biodiesel se deve a alguns motivos como, o alto nível de estruturação da cadeia produtiva, a sua inserção em um mercado global típico de uma *commodity* internacional, e ao acúmulo de anos de pesquisa e desenvolvimento tecnológico, atendendo na totalidade os três parâmetros básicos do PNPB que são: domínio tecnológico, escala de produção e logística (FGVENERGIA, 2017; CSOB/MAPA, 2019).

Na Safra 2018/2019, o Brasil foi o segundo maior produtor mundial de grão de soja, atrás dos EUA (USDA, 2020). Observa-se na Tabela 3.2 alguns dados estatísticos do complexo da soja. Em 2019 o Brasil produziu 120,8 milhões de toneladas de soja, desse total, exportou 74,1 milhões de toneladas em grão (61%) e processou 43,5 milhões de toneladas (36%).

Por ser isenta de tributação, a exportação do grão *in natura* acaba sendo privilegiada, em detrimento do seu processamento, que dá origem ao óleo e ao farelo, produtos de maior valor agregado (FGVENERGIA, 2017).

Tabela 3.2: Estatísticas do complexo da soja

| Soja | Milhões de toneladas | | | $\Delta\%$ | |
|--|----------------------|-------|-------|-------------|-------------|
| | 2017 | 2018 | 2019 | (2017-2018) | (2018-2019) |
| Produção | 113,8 | 123,1 | 120,8 | 8,2% | -1,9% |
| Exportação em grão | 68,2 | 83,3 | 74,1 | 22,2% | -11,0% |
| Processamento | 41,8 | 43,6 | 43,5 | 4,1% | -0,2% |
| Capacidade Instalada de processamento | 63,0 | 63,5 | 63,3 | 0,8% | -0,3% |
| Farelo produzido | 31,6 | 33,2 | 33,5 | 5,1% | 0,9% |
| Óleo produzido | 8,4 | 8,8 | 8,8 | 4,7% | -0,5% |
| Exportação de óleo | 1,3 | 1,4 | 1,0 | 5,7% | -26,4% |
| Consumo de óleo na indústria de alimento e química | 4,4 | 4,2 | 4,4 | -6,5% | 5,5% |
| Consumo de óleo de soja para biodiesel | 2,6 | 3,3 | 3,5 | 24,6% | 6,7% |

Fonte: Adaptado de FGV Energia (2017), EPE (2018a), ABIOVE (2019), ABIOVE (2020)

A capacidade instalada de processamento no país em 2019 foi de 63,3 milhões de toneladas, porém processou-se só 43,5 milhões de toneladas, quer dizer, apenas 68,8% da sua capacidade. A quantidade de farelo produzido no mesmo ano foi 33,5 milhões de toneladas, enquanto o óleo foi 8,8 milhões de toneladas e desse óleo unicamente 3,5 milhões de toneladas, destinou-se para a fabricação de biodiesel.

Existem diferentes preocupações com o complexo da soja. Por um lado, de acordo com FGV Energia (2017) e Ubrabio (2017), o excedente cada vez maior de farelo gerado em função do aumento da produção do biodiesel que precisa de compradores para esse enorme volume adicional, e por outro, tendo em conta a tendência exportadora da soja em grão do país e a guerra comercial entre China e EUA, situação que mostrou os riscos a que os produtores estão expostos, já que a disponibilidade de matéria-prima no mercado interno diminuiu com o aumento das exportações, ocasionando uma valorização artificial da *commodity*. Os efeitos negativos dessas distorções impactam outras cadeias produtivas, como o setor de carnes, que teve que pagar mais pelo farelo, e conseqüentemente, o setor de biodiesel devido à alta dependência dessa matéria-prima.

Nesse cenário, o Brasil requer diversificar as fontes de matérias-primas de origem vegetal para a produção de biodiesel como foi verificado nesta seção e existem muitas outras fontes potenciais e capazes de agregar valor à cadeia produtiva do biocombustível.

3.4 Oleaginosas não convencionais para a produção de biodiesel no Brasil

A seguir, descrevem-se as principais culturas oleaginosas tradicionais como o algodão, girassol, canola, amendoim, mamona e palma de óleo, ou as promissoras como cártamo, pinhão-manso, macaúba e babaçu, fontes de óleo vegetal não convencionais no país objetos de comparação dessa dissertação. Aproveitou-se as recomendações das referências bibliográficas para identificar os gargalos e ressaltar as potencialidades de cada uma dentro da cadeia produtiva do biodiesel no Brasil.

3.4.1 Algodão

O cultivo de algodão (*Gossypium hirsutum* L.) no Brasil é proveniente, predominantemente, do algodoeiro herbáceo de ciclo anual (*Gossypium hirsutum* L. var. *latifolium* Hutch) (FAOSTAT, 2018).

O algodão é composto, em média, por 60% de caroço e 40% de fibra (CARVALHO, 2015). A fibra de algodão é a principal matéria-prima da indústria têxtil brasileira e mundial. Seu subproduto, o caroço, representa importante fonte energética, podendo ser utilizado de forma *in natura* para alimentação animal, ou esmagado, permitindo a elaboração de subprodutos como a torta de algodão de alto teor proteico, cuja principal aplicação reside na elaboração de rações animais (CONAB, 2018). O óleo de semente de algodão tem diversas aplicações nos setores alimentício, cosmético, farmacêutico e é promissora matéria-prima para o biodiesel, uma vez que sua produção ocorre principalmente na entressafra da soja. E o cultivo do algodoeiro não afeta a produção de alimentos humanos (CARVALHO, 2015).

No Brasil, a produção ocorre predominantemente nos estados de Mato Grosso e Bahia. O rendimento médio nacional permaneceu acima dos 4000 kg/ha (algodão em caroço), e foram mais de 6,8 milhões de toneladas de algodão em caroço colhidas em uma área plantada de 1618,2 mil hectares na Safra 2018/2019 (CONAB, 2019a).

A semente de algodão tem baixo teor de óleo, cerca de 16,1–26,7%, porém esse teor pode ser melhorado em 5% a partir da seleção de certas linhagens de algodão (CARVALHO, 2015).

O óleo da semente de algodão mostra 13-44% de ácido oleico (18:1) e 33-59% de ácido

linoléico (18:2). Embora o algodão tenha um fator antinutricional resultante do gossipol das sementes (substância tóxica presente nas folhas e nos caules do algodoeiro que impede o estabelecimento de pragas), este composto não interfere no processo de produção de biodiesel (FANG, 2012).

Dentre as vantagens do biodiesel de algodão esta que tem alta qualidade por causa de algumas propriedades, como elevada densidade (0,875 g/cm³), baixa viscosidade (6,00 cSt a 37,8 °C), ausência de enxofre, baixo teor de oxigênio (11%) e capacidade inflamável superior a do diesel mineral, além do biodiesel do algodão não ser corrosível (CARVALHO, 2015). Porém, exige uma pré-tratamento que aumenta o custo de produção do biodiesel (SOUZA; SEABRA; NOGUEIRA, 2017).

No que respeita aos preços do caroço de algodão no mercado brasileiro, entre 2018/2019 caíram pela alta produção e o produto tem virado ração para bois (BIODIESELBR, 2019a). Porém, um destino natural seria a produção de óleo, para gerar biodiesel, mas, nesse mercado, o produto ainda não tem competitividade econômica. O preço do algodão em caroço para as esmagadoras em Mato Grosso que lidera a oferta brasileira de soja e algodão, foi de 2066 R\$/t, enquanto o preço da soja em grão foi de 1127 R\$/t em 2018 (CONAB, 2020).

3.4.2 Girassol

O girassol (*Helianthus annuus* L.) é uma dicotiledônea anual rica em óleo cujo teor varia de 38% a 50% dependendo da variedade. Em média, além do óleo, para cada tonelada de grão são extraídos 250 kg de casca e 350 kg de torta para alimentação animal, com 45% a 50% de proteína bruta (SOUZA; SEABRA; NOGUEIRA, 2017).

O girassol possui ciclo entre 90 a 140 dias (MAPA, 2015a). O principal destino da produção desta oleaginosa é atender a indústria de óleo comestível, podendo ser usado também como fonte de proteínas para alimentação animal na forma de farelo e até como forragem, silagem e adubo verde, ou no mercado de grãos para alimentação de pássaros, para confeitaria ou torrado, ou como flor de corte e até a produção de biodiesel (EMBRAPA, 2020b).

No Brasil, o girassol é uma cultura que se desenvolve bem na maioria dos solos agrícolas, podendo ser cultivado em praticamente todo o território nacional, possui boa tolerância à seca, ao frio e ao calor, além de ampla capacidade de adaptação às diversas condições edafoclimáticas e possui rendimento pouco influenciado pela latitude, longitude e fotoperíodo, embora

seja bastante susceptível à umidade, e ao excesso de chuvas (EMBRAPA, 2020b; CONAB, 2019a). É uma importante alternativa a ampliar a escala de produção em cultivo safrinha nas regiões Centro-Sul do Brasil e como oleaginosa principal em regiões do semiárido em sistemas de sequeiro e irrigado, sendo uma das oleaginosas com priorização para diversificação de matérias-primas usadas na produção de biodiesel até 2030 (CSOB/MAPA, 2019).

De acordo com os dados da CONAB (2019a), o Mato Grosso é o maior produtor do grão, responsável por mais de 60% da produção nacional seguido por Goiás, Rio Grande do Sul e Minas Gerais. Porém, registrou-se declínio da produtividade, diminuindo a área plantada e a produção em relação ao último ano, com recuo de 101,9 mil toneladas na safra 2017/2018 para 60,7 mil toneladas em 2018/2019 resultado da competição com culturas de segunda safra mais rentáveis, a exemplo do algodão. A produtividade média na última safra, foi de 1597 kg/ha em uma área plantada de 62,8 mil hectares.

A oferta de óleo de girassol no Brasil teve aumento em decorrência do fortalecimento da produção no Mato Grosso e no Rio Grande do Sul, estados que receberam forte incentivo das empresas de biodiesel após a implantação do PNPB e o SCS cuja vantagem prática ao fomentar agricultores familiares foi a participação nos leilões da ANP. Em Minas Gerais, por sua parte a Petrobras ajudou agricultores familiares comprando sua produção ao valor de 90% da cotação da soja na bolsa de Uberlândia. Visando quando a escala aumentar, usar a flor como matéria-prima alternativa para a fabricação de biodiesel na usina mineira (BIODIESELBR, 2013).

Ao utilizar biodiesel de girassol em motor de ignição por compressão, verifica-se o cumprimento com as especificações da ANP. Contudo, com o óleo de girassol existe o inconveniente de possuir mais de 80% dos seus ácidos graxos insaturados, linoléico (18:0) na maior parte, o que demanda uso de aditivos para sua estabilização visando o armazenamento e a formação de estoques logísticos, além da presença de cera, que deixa o biocombustível turvo com o resfriamento (EMBRAPA, 2020b; BELTRÃO; OLIVEIRA, 2008).

Entre as desvantagens dessa cultura está a elevada cotação do seu óleo no mercado internacional, quase 30% acima do preço do óleo de soja nos últimos anos conforme USDA (2020), visto que o óleo de girassol é de alta qualidade para o consumo humano (BIODIESELBR, 2013).

3.4.3 Colza / Canola

A colza (*Brassica napus* L.) ou sua variedade melhorada, a canola (*Brassica napus* L. var. oleífera) é uma das principais oleaginosas no mundo que tem sido usada como forragem verde para alimentação animal, adubação para condicionamento do solo e matéria-prima para extração de óleo, o qual tem sido empregado na alimentação humana (óleo comestível, margarina, maionese e outros derivados), para iluminação (lâmparina à base de óleos vegetais), para uso industrial (sabões e outros derivados) e, mais recentemente, para produção de biocombustível (MORI; TOMM; FERREIRA, 2014).

Entre os maiores produtores mundiais de canola estão a China, a Alemanha, o Canadá, a Índia e a França; juntos respondem por 65% da produção mundial (FAOSTAT, 2018). Na UE, principalmente na Alemanha a canola é a principal matéria-prima usada na produção de biodiesel, representando cerca de 44% da oferta total (UFOP, 2019).

Os grãos de canola produzidos no Brasil possuem em torno de 24 a 27% de proteína e 38% de óleo (EMBRAPA, 2014). A produtividade média da canola no país em 2018 ficou em torno de 1394 kg/ha. Esta espécie é cultivada principalmente no estado do Rio Grande do Sul, que responde por 86% da área plantada e Paraná por 14%. No total 35,5 mil hectares (CONAB, 2019a).

A produção brasileira de canola destina-se à obtenção de óleo comestível, em função de seu excelente valor nutricional, e uma pequena parte para transformação em biodiesel (EMBRAPA, 2014). O óleo de canola contém principalmente ácido oleico (18:1) 62%, seguido por 32% de ácido linoleico (18:2) (FANG, 2012).

A canola possui ciclo entre 110 a 130 dias e é opção de cultivo de safrinha no Cerrado, em sucessão a cultura da soja ou milho por exemplo, e pode produzir mais que o dobro de óleo comparada à soja, além disso está em andamento o trabalho de tropicalização no Cerrado e na região do Semiárido (BIODIESELBR, 2019b).

De acordo com a Agenda de inovação para a cadeia produtiva do biodiesel da CSOB, a canola se encontra entre as oleaginosas com prioridade para a diversificação de matérias-primas usadas na produção de biodiesel pelo que contará com apoio técnico e econômico para ampliar a escala de produção, nas regiões Centro-Sul do Brasil, para o crescimento sustentável do setor até o ano de 2030, visando a oportunidade de atender as especificações europeias (CSOB/MAPA, 2019).

Em relação as vantagens do óleo de colza como matéria-prima de biodiesel, tem bom desempenho em ambientes de baixas temperaturas, sendo ótimo para o sul do Brasil, apresenta níveis mais baixos de fumaça e emissões reduzidas de material particulado e hidrocarbonetos quando comparado ao óleo de soja e de palma (SOUZA; SEABRA; NOGUEIRA, 2017).

Pelo fato de produzir um óleo de altíssima qualidade, tanto para alimentação humana quanto para produção de biodiesel, a canola tem forte demanda, proporcionando uma oportunidade de mercado e preços atraentes e estáveis. Para os produtores do sul do país o preço de mercado é equiparado à cotação da soja, atribuindo à canola o título de “soja de inverno” (BIODIESELBR, 2019b). Segundo dados da CONAB (2019a) o preço médio da canola em grão no mercado interno em 2018 foi 1185,33 R\$/t, enquanto o preço da soja 1127,16 R\$/t .

3.4.4 Amendoim

O amendoim (*Arachis hypogaea* L.) é uma leguminosa anual originária da América do Sul. O teor de óleo na semente varia de 47-54%, conforme a cultivar e a época de semeadura do amendoim (SOUZA; SEABRA; NOGUEIRA, 2017). O óleo de amendoim foi a primeira matéria-prima utilizada como fonte de biocombustível, utilizado por Rudolph Diesel para testar o motor que carrega seu nome ao final do século XIX (KNOTHE, 2001).

O óleo do amendoim tem larga aplicabilidade no segmento alimentar, sendo muito parecido com o óleo de oliva, utilizado na culinária. Possui alta estabilidade, assegurando maior vida de prateleira. Na indústria oleoquímica é utilizado na produção de margarinas, gorduras hidrogenadas, farinhas, proteínas, leite, queijos e pastas. Na indústria cosmética é utilizado para fabrico de sabonetes, cremes, pomadas lubrificantes, entre outros e finalmente na produção de biodiesel (EMBRAPA, 2012). A torta resultante da extração do óleo pode ser aproveitada para a alimentação animal. No entanto, é necessário cuidados durante a colheita e armazenamento do grão para impedir a infecção pelo fungo *Aspergillus flavus*, que produz uma toxina altamente letal, a aflatoxina (SOUZA; SEABRA; NOGUEIRA, 2017).

No Brasil a oleaginosa tem duas safras no ano, e o Estado de São Paulo é o principal produtor para ambas safras. A área total de plantio de amendoim foi 146,8 mil hectares e uma produtividade de amendoim em casca de 2962 kg/ha para 2018/2019.

O uso do amendoim em sistemas de rotação com a cana-de-açúcar colocou o estado de São Paulo como o principal produtor do grão, representando 93% da produção nacional. Adici-

onalmente neste estado estão localizadas as processadoras e empacotadoras dos grãos (CONAB, 2019a). No Nordeste, onde tem representação a colheita da segunda safra, o amendoim é cultivado predominantemente por pequenos agricultores cuja produção é destinada principalmente ao consumo *in natura* (RODRIGUES et al., 2016).

O amendoim forrageiro, devido a suas características de cobertura do solo, é excelente para o controle de erosão, recuperação de áreas degradadas e evita a lixiviação de nutrientes, além de promover a fixação biológica de nitrogênio (SOUZA; SEABRA; NOGUEIRA, 2017).

Em 2011 a Embrapa conseguiu desenvolver uma nova cultivar de amendoim (*BRS Pérola Branca*) adequado à produção de biodiesel. A semente tem entre 50% a 52% de óleo bruto e é bem precoce, com ciclo variando de 130 a 140 dias. A produtividade média é de 3t/ha. Entre as vantagens desta variedade, é que ela tem a haste maior, facilitando a colheita manual e o plantio. Também é muito resistente às doenças das folhas, ao clima mais seco e pode ser plantada em consórcio com outras espécies, como mamona, feijão, milho, gergelim, algodão e árvores frutíferas, porém continua em desenvolvimento (EMBRAPA, 2012).

O óleo de amendoim apresenta em sua composição de 50-60% de ácido oleico, 18-30% (18:1) de ácido linoleico (18:2) e 6-12% de ácido palmítico (16:0), dando-lhe características nobres para constituir-se como excelente matéria-prima para a farmacologia e indústria alimentícia com elevado valor comercial (RODRIGUES et al., 2016).

As principais características do biodiesel obtido do óleo de amendoim são massa específica (872 kg/m³), o ponto de fulgor (196 °C), viscosidade (4,80 cSt a 40 °C), índice de Iodo (95), poder calorífico superior (40 kJ/kg) e estabilidade à oxidação (0,3 horas), atendendo as especificações da ANP. Pode ser misturado ao diesel em todas as proporções, como os preparados com óleos de soja, girassol, canola (EMBRAPA, 2012).

Em termos econômicos, o preço do óleo de amendoim é bem superior ao de suas concorrentes no mercado de óleos vegetais. Em 2018, o preço médio foi de 1422 US\$/t frente a 745 US\$/t do óleo de soja, ou seja 47% mais caro (USDA, 2020). No mercado interno o preço médio de amendoim em casca para as esmagadoras no mesmo ano foi de 1569 R\$/t na primeira safra e 1725 R\$/t na segunda (CONAB, 2019a). Dessa forma, atualmente, a oleaginosa não se apresenta como uma fonte viável economicamente para a produção de biodiesel.

3.4.5 Mamona

A mamoneira (*Ricinus communis* L.) é uma oleaginosa da família Euphorbiaceae. Pode ser plantada em sistema de consórcio e/ou rodízio com outras culturas como feijão, mandioca e milho, que servem à alimentação diária. O principal produto da mamona é o óleo de rícino, que é uma importante matéria-prima para a indústria química, com aplicações como: tintas, vernizes, cosméticos, fabricação de graxas e lubrificantes e plásticos. A torta, principal subproduto tem sido mundialmente usada como adubo orgânico; estudos têm apontado sua eficácia no controle de nematóides e insetos. Embora apresente elevado conteúdo proteico, seu uso como ração animal é inviabilizado pela alta toxicidade e pela presença de elementos alérgicos. Entretanto, começou a ser enxergado como meio produtivo para obtenção de combustível renovável (VENTURA; ALVES; SANTOS, 2010; SOUZA; SEABRA; NOGUEIRA, 2017).

No Brasil, a mamona é cultivada principalmente no Nordeste, sendo um cultivo de ano, adequado para temperaturas de 20 a 28°C, resistente a secas e pode ser cultivada em áreas com índice pluviométrico de 600 a 700mm anuais (JBIC, 2006). Na implantação do PNPB, a mamona foi a grande aposta do governo federal para o desenvolvimento da agricultura familiar e inclusão social, principalmente no semiárido do Nordeste brasileiro (SAMPAIO, 2017).

Em 2007 foi publicado o Zoneamento Agrícola de Risco Climático para a cultura de mamona. Além da Paraíba, a recomendação aponta que o cultivo da mamona é viável nos estados de Alagoas, Bahia, Ceará, Pernambuco, Piauí, Rio Grande do Norte e Sergipe (EMBRAPA, 2007).

O Brasil já esteve na liderança mundial da produção de óleo de mamona entre as décadas de 1960 e 1980. Em 2018 o maior produtor foi a Índia, que detém 84% da produção mundial e Brasil ficou em quinto lugar (FAOSTAT, 2018). A área plantada no país na safra 2018/2019 foi de cerca de 46 mil ha com uma produção correspondente a cerca de 30,6 mil toneladas. A Bahia é responsável por 91% da produção nacional e uma produtividade de 658kg/ha (CONAB, 2019b).

Das sementes da mamona são extraídos de 47 a 50% de óleo. Cerca de 90% do óleo provem principalmente do ácido ricinoléico (18:1), com uma ligação insaturada pertence ao grupo dos hidroxiácidos caracterizando-se por seu alto peso molecular (298 g/mol) e baixo ponto de fusão (5 °C). O grupo hidroxila presente no ácido ricinoléico confere-lhe a propriedade exclusiva de solubilidade em álcool, e uma alta viscosidade que é mantida em ampla faixa de temperatura,

além de solidificarem em baixas temperaturas, possibilitando também estabilidade a oxidação (VENTURA; ALVES; SANTOS, 2010).

A alta viscosidade do biodiesel de mamona (20-30 mm²/s), resulta em uma queima incompleta do biocombustível, o que provoca a formação dos acúmulos de carbono nos bicos injetores e nos anéis dos pistões, colocando o óleo fora dos limites permitidos pela ANP (3-6 mm²/s). Todavia, uma proporção deste biocombustível pode ser adicionado ao diesel de petróleo (até 40%), mantendo o mesmo dentro da especificação, razão pela qual esta matéria-prima não é excluída da análise (BELTRÃO; OLIVEIRA, 2008).

Em 2018, o preço médio da saca (60 kg) em Irecê, BA, foi cerca de R\$ 144,42 o que representa 2407 R\$/t (CONAB, 2020). Valor que inviabiliza a produção de biodiesel frente ao preço da soja. O preço do óleo de mamona no mercado internacional tem sofrido constantes aumentos devido à sua importância na indústria química, o preço internacional para o mesmo ano foi de 1517 US\$/t (CSOB/MAPA, 2019), enquanto o preço do óleo de soja 745 US\$/t, sendo 51% superior, preço alto comparado com os outros óleos vegetais.

3.4.6 Cártamo

O cártamo (*Carthamus tinctorius* L.) pertencente à família Asteraceae, e é uma das mais antigas culturas da humanidade. Cultivada para a produção do pigmento vermelho carتامina, uma substância usada na culinária, bem como de um pigmento amarelo usado para tintura de tecidos durante anos. Nos últimos cinquenta anos o cártamo vem sendo cultivado, principalmente, para a produção do óleo extraído de suas sementes (FREIRE, 2009).

O cártamo é uma planta anual que tolera bactérias, doenças, secas, geadas, fungos, pH alto, fagos, sal, areia, ferrugem, vírus, vento e natureza (FANG, 2012).

O óleo do cártamo, incolor e inodoro, é usado em medicamentos e considerado ideal para cosméticos. É preferido para o envernizamento em indústrias de tintas, devido às suas propriedades específicas, baixos valores de cor, baixo teor de ácidos graxos livres, insaponificabilidade e ausência de cera, que tornam a qualidade das tintas, resinas e revestimentos alquídicos sem comparação (KUMAR et al., 2017).

A produção máxima de sementes de cártamo no mercado mundial ocorreu em 2016 e foi da ordem de 949 mil toneladas, porém a produção sofreu uma queda até 2018 com 627.653 toneladas. A Índia, o México, a Rússia, o Cazaquistão e os Estados Unidos são os principais

produtores, a Argentina, China, Turquia e Etiópia são considerados produtores secundários (FAOSTAT, 2018).

O ciclo de vida do cártamo mundialmente é curto com aproximadamente 110 a 160 dias (FANG, 2012). Segundo Lichston et al. (2019), em cultivos no semiárido brasileiro no Rio grande do Norte, foi verificado que o cártamo encurta seu ciclo reprodutivo de 140 para 75 dias, com uma produtividade de 1500 kg de sementes por hectare, podendo-se chegar a 6000 kg/ha ao ano, superando a produtividade média da soja (3000 kg/ha). Quanto à quantidade de óleo nas sementes, o cártamo cultivado no semiárido apresentou até 36% de óleo, contrastando com 20% de óleo observado na soja.

É uma das culturas oleaginosas com um bom padrão de qualidade para produção de biodiesel, suas sementes contêm cerca de 32% a 40% de óleo (KUMAR et al., 2017), constituindo-se em 16-20% de ácido oleico (18:1), 6-8% de ácido palmítico (16:0), e 71-75% ácido linoleico (18:2) (LICHSTON et al., 2019).

O biodiesel metílico derivado das sementes de cártamo, apresentou resultados que se enquadram nas especificações exigidas pela ANP, podendo tornar-se uma alternativa sustentável para produção regional de biodiesel no Nordeste brasileiro, com a inserção da espécie na cadeia energética nacional (LICHSTON et al., 2019).

O cártamo atualmente é foco em pesquisa, desenvolvimento e transferência de tecnologia para cultivo em regiões semiáridas do Nordeste do Brasil em sistemas de sequeiro e irrigado, encontrando-se com prioridade para a diversificação de matérias-primas para o crescimento sustentável do setor até o ano de 2030 (CSOB/MAPA, 2019).

O preço médio internacional das sementes é de US\$120 por tonelada (TRIDGE, 2020). A oleaginosa até então tem pouca expressão econômica no Brasil, precisando ainda de pesquisa, investimento e desenvolvimento.

3.4.7 Pinhão Manso

O pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.) é um arbusto perene, não comestível pertencente à família Euforbiaceae. Embora seja considerado nativo da América Central, atualmente está amplamente disperso em todo o mundo (DURÃES; LAVIOLA; ALVES, 2011). Os frutos da planta são compostos de 53 a 62% de sementes, que por sua vez, são compostas, em média, por 37% de cascas e 63% de amêndoa, com variações que dependem das condições do sistema, dos

tratos culturais e da variedade (SOUZA; SEABRA; NOGUEIRA, 2017).

Nas avaliações experimentais, foi demonstrado que uma única planta (com material genético não melhorado) pode produzir até 2,5 kg de grãos, com um teor de óleo de 30 a 40% (DURÃES; LAVIOLA; ALVES, 2011). De acordo com Laviola e Rodrigues (2019), o pinhão manso tem potencial para produzir 1200–1500 kg/ha, e é capaz de se desenvolver em áreas onde o solo é pouco fértil e de clima desfavorável à maioria das culturas tradicionais, como no caso da região do semi-árido brasileiro.

Esta cultura está presente em 10 estados brasileiros (Bahia, Espírito Santo, Goiás, Maranhão, Mato Grosso, Minas Gerais, Pará, Rio de Janeiro, São Paulo e Tocantins) e ocupa uma área de 42 mil hectares, dos quais 30 mil estão localizadas no Pará com uma tendência de expansão nos próximos anos (SOUZA; SEABRA; NOGUEIRA, 2017).

O óleo de pinhão manso pode ser usado como combustível de cozinha, inseticida, sabão e para uso medicinal. A torta resultante da extração do óleo das sementes de pinhão-manso constitui excelente adubo orgânico, rico em nitrogênio, fósforo e potássio. Apesar de constituir eventual fonte proteica para o suplemento de animais, a presença de fatores limitantes tóxicos, alergênicos e antinutricionais impede o uso da torta com essa finalidade, sendo os ésteres de forbol os principais componentes tóxicos (LAVIOLA, 2011). O pinhão-manso pode ser usado como cerca viva, bem como para evitar a erosão do solo e recuperar a terra (LAVIOLA; RODRIGUES, 2019).

Desde a implantação do PNPB, a espécie é considerada uma matéria-prima potencial, devido a suas características desejáveis como: altos rendimentos de grãos e óleo, boa qualidade do óleo para a produção de biodiesel, adaptabilidade a diferentes regiões, precocidade e longevidade, baixo custo de sementes e resistência ao estresse hídrico, baixa exigência nutricional e possibilidade de inserção da cultura na cadeia produtiva da agricultura familiar em consórcio com pastagens e criação animal o que a torna uma boa opção para as regiões semiáridas brasileiras (EMBRAPA, 2009; LAVIOLA; RODRIGUES, 2019).

De acordo com Fang (2012), as propriedades físicas do biodiesel produzido a partir desta fonte estão no equilíbrio certo; conferindo-lhe estabilidade adequada à oxidação e bom desempenho a frio. O pinhão manso contém principalmente 40,3% de ácido linoleico (18:2), 37% de ácido linolênico (18:3).

Apesar de seu potencial, a cultura está em fase de domesticação. Para tanto, a Embrapa

Agroenergia coordenou o projeto de “Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação em pinhão-manso para a produção de biodiesel (BRJATROPHA)”, com ações técnico-científicas e investimentos público e privado focado na pesquisa e o desenvolvimento para utilização desta oleaginosa em futuro próximo (LAVIOLA, 2011). Projeto que encerrou as atividades em 2015 obtendo resultados importantes da cultura sobre manejo, fenologia, fisiologia, fitopatologia, aspectos nutricionais, usos potenciais, melhoramento genético, além da viabilidade econômica, social e ambiental da cadeia produtiva. Porém, existem ainda gargalos com os cultivares e o sistema de produção o que impede dados concretos sobre produtividade, potencial de produção e custos de produção (DURÃES; LAVIOLA; ALVES, 2011; LAVIOLA; RODRIGUES, 2019).

Os resultados do estudo econômico do pinhão manso no livro de Laviola e Rodrigues (2019) indicam que o litro do óleo de pinhão-manso foi vendido para o exterior (Colômbia) por R\$ 2,30 preço competitivo com o do óleo de soja, só que não apresentou viabilidade econômico-financeira autossustentável para o produtor, sendo um dos fatores críticos na viabilidade econômica dessa fonte.

Além disso, verificou-se que há dificuldades à propagação da estrutura comercial da cadeia da oleaginosa, já que não existe uma demanda de mercado favorável, devido ao baixo interesse do setor privado ou pelas dificuldades na concorrência com outros grãos no processo de produção de biocombustível (ALMEIDA; BORGES; AMÂNCIO-VIEIRA, 2017). Segundo Laviola e Rodrigues (2019), precisa-se de economia de escopo e de escala na sua industrialização, modelo de negócios baseado em biorrefinarias e ecologia industrial, consórcio com culturas alimentares e aproveitamento integral de resíduos (torta, epicarpo, glicerina etc.). Aliás, o custo de implantação da cultura é alto e sua viabilidade técnica e econômica ainda depende de muitas pesquisas e estruturação da cadeia produtiva.

3.4.8 Palma de óleo

A palma de óleo ou dendê (*Elaeis guineensis* Jacq.) é uma monocotiledônea, pertencente à família Areaceae, possui duas espécies com interesse comercial e agrícola que são a palma de óleo (*Elaeis guineensis*), com origem na África e o caiaué (*Elaeis oleifera*) originária da América Central (BORGES; COLLICCHIO; CAMPOS, 2016). Foi introduzida pela primeira vez no Brasil pelos escravos, formando algumas populações subespontâneas no Rio de Janeiro e na Bahia (RAMALHO FILHO et al., 2010).

Esta é uma espécie perene adaptada a regiões tropicais úmidas, suas necessidades hídricas e de temperatura para o crescimento produtivo e rendimento requer que seu cultivo seja concentrado entre os paralelos 10^o norte ou sul do equador (VAZ, 2018).

Com produção mundial de óleo estimada em 73.58 milhões de toneladas na safra 2018/2019, a palma de óleo se consolida com maior produção de óleo no mundo. Indonésia, Malásia, Tailândia, Colômbia e Nigéria são os maiores produtores de óleo vegetal de palma, sendo que os dois primeiros países controlam cerca de 84% da produção global (USDA, 2020).

No Brasil a cultura passou por um ciclo de expansão. A área cultivada de pouco mais de 103 mil hectares em 2009 foi ampliada para 236 mil hectares em 2016, sendo o estado do Pará o que possui grande protagonismo na cultura, com 88% da área plantada, seguido pelos estados da Bahia (11%) e de Roraima (1%) (MAPA, 2018). Em 2018, a produção de óleo de palma no Brasil foi de cerca de 450 mil toneladas (FAOSTAT, 2018).

Nos estados da Bahia, Amazonas, Pará, Acre, Amapá, Maranhão, Mato Grosso, Rondônia, Roraima, Alagoas, Espírito Santo, Pernambuco, Rio de Janeiro e Sergipe foram identificadas regiões adequadas através do Zoneamento Agroecológico (ZAE) da Palma para a expansão sustentável desta oleaginosa. O país possui mais de 7 milhões de hectares antropizados e com condições ideais do ponto de vista de solo e clima para a introdução da cultura da palma de óleo (RAMALHO FILHO et al., 2010).

A palma de óleo é considerada a oleaginosa que apresenta a maior produtividade: aproximadamente 4000 a 6000 kg de óleo/ha do mesocarpo do fruto. No processamento dos cachos de fruto fresco (CFF) são gerados 20-22% de óleo de palma, 1,7% de óleo de palmiste (amêndoa), 3,5% de torta de palmiste, 22-23% de cachos de fruto vazio, 12-15% de fibras, 5-7% cascas e 50% de efluente líquido (POME). O somatório da massa é superior a 100% pois, durante o processo industrial há inserção de água, aumentando a massa de POME (RAMALHO FILHO et al., 2010; SOUZA; SEABRA; NOGUEIRA, 2017).

A colheita começa a partir de 3^o ano e pode chegar até o 30^o ano de vida, dependendo da viabilidade econômica entre continuar a colheita ou renovar o plantio (SOUZA; SEABRA; NOGUEIRA, 2017). Espera-se que nas grandes plantações, a palma de óleo se consorcie com uso de plantas de cobertura, especialmente leguminosas, cobrindo os amplos espaços intercalares entre as plantas (RAMALHO FILHO et al., 2010).

Estima-se que 72% do óleo de palma produzido no mundo seja aplicado em alimentação.

No Brasil a margem destinada à alimentação é ainda maior, em torno de 97%, no entanto ganha cada vez mais utilizações industriais (produtos químicos, cosméticos, farmacêuticos e para produzir biodiesel) (MAPA, 2018).

A palma de óleo merece destaque na agricultura bioenergética porque quando plenamente estabelecida, protege o solo contra erosão, apresenta relativamente baixo custo de produção do óleo e produz durante todo o ano. Possui ainda grande capacidade de fixação de carbono; alta eficiência na conversão energética, com balanço energético altamente positivo, gerando subprodutos com uso energético (cascas, fibras e efluentes de usina de processamento de cachos) (RAMALHO FILHO et al., 2010).

O governo federal definiu a palma de óleo como uma espécie com potencial para ser usada no âmbito do PNPB, e em maio de 2010 o Programa de Produção Sustentável de Palma de Óleo no Brasil, colocou a palmácea como produto estratégico para o país até 2030.

A contribuição de óleo de palma na produção mundial de biodiesel em 2018 foi de 19% (OECD/FAO, 2019). Entretanto, no Brasil o uso de óleo de palma para a mistura com diesel representou apenas 2% em 2018 (ANP, 2020c).

O óleo de palma apresenta grande potencial na produção de biodiesel no Brasil. No entanto, é necessário salientar que o biodiesel de palma apresenta alguns problemas como o alto ponto de névoa e de fusão, o que pode promover sua cristalização em temperaturas mais baixas; alta viscosidade (≈ 20 Cst), cerca de 10 vezes maior que o óleo diesel (± 2 Cts). Propriedades devidas ao fato de que o óleo de palma contém em torno de 32-45% de ácido palmítico (16:0), 38-52% de ácido oleico (18:1) (FANG, 2012).

Contudo, é possível obter biodiesel de palma de óleo com menor concentração de metil ésteres de ácidos graxos saturados (16:0) através de um processo de adição de metanol adicional, seguido de resfriamento a 5 °C por 24 horas e posterior filtragem a vácuo para remoção do metanol remanescente (SADROLHOSSEINI et al., 2011).

Atualmente o óleo de palma está na agenda de inovação da Câmara Setorial do Biodiesel (CSOB/MAPA, 2019) com o objetivo de chegar a 2028 com o B20 e diversificar as matérias-primas em 2,7 milhões de toneladas (50% palma de óleo e 50% outras) para a produção de biodiesel brasileiro, tornando o sistema produtivo mais sustentável e competitivo.

No que tange ao preço do óleo de palma, embora o preço internacional seja menor do que seus concorrentes 647 US\$/t (USDA, 2020), no mercado interno brasileiro, fatores relaci-

onados a questões de oportunidade de mercado (valores pagos pela indústria de alimentos são mais vantajosos), custo de produção alto (principalmente da mão de obra), demanda nacional muito superior à produção local, tem inviabilizado a sua utilização na produção de biodiesel (RAMALHO FILHO et al., 2010).

3.4.9 Macaúba

A macaúba (*Acrocomia aculeata*) é uma palmeira nativa das florestas da América tropical e subtropical distribuída desde México e Antilhas até o sul do Brasil, chegando até Paraguai e Argentina, porém ausente no Equador e Peru (MOTTA et al., 2002).

Dispersa no território brasileiro, é encontrada com maior frequência em Minas Gerais, São Paulo, Goiás, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Tocantins, Piauí e Ceará, de forma isolada ou formando povoamentos naturais chamados de “maciços” (EMBRAPA, 2014).

Os rendimentos em óleo da macaúba, previstos com base em avaliações de plantas nativas, indicam a possibilidade de que, em áreas de cultivo organizado, se alcancem valores próximos ou até mesmo superiores aos do óleo de palma (FAVARO et al., 2018).

O fruto de macaúba *in natura* é composto em massa seca por 19% de epicarpo, 28% de mesocarpo e 6% de amêndoas. O óleo do fruto de macaúba está disponível no mesocarpo (polpa) e nas amêndoas, que possuem teores de óleo em torno de 45 e 50%, respectivamente (SOUZA; SEABRA; NOGUEIRA, 2017).

A safra 2018 produziu um total de 1177 toneladas (CONAB (2019b)). Consoante com Embrapa (2014), em maciços da espécie observados na região do Alto Paranaíba, em Minas Gerais, as melhores plantas alcançaram 6900 kg/ha de óleo de polpa, utilizado na produção de biocombustíveis; 1200 kg/ha de óleo de amêndoa, destinado à fabricação de cosméticos e farelo para alimentação humana; 19300 kg/ha de endocarpo, matéria-prima para a produção de carvões vegetal e ativado; e 24500 kg/ha de resíduo de polpa e da amêndoa, que constituem a torta que serve para a produção de ração ou farelo para os animais. Se for considerada uma eficiência de 70% da extração, o rendimento bruto de óleo por prensagem do fruto fresco poderá atingir 4000 kg/ha de óleo da polpa e 800 kg/ha de óleo da amêndoa ao ano.

A exploração da espécie é efetuada de forma extrativista, sendo amplamente utilizada em âmbito doméstico e o seu beneficiamento quase sempre artesanal. No entanto, mediante avanços tecnológicos e de manejo na cadeia produtiva, a macaúba tem sido apontada como uma

espécie de grande potencial para o desenvolvimento socioeconômico das regiões onde ocorre sua distribuição (SILVA; ANDRADEO, 2014; SOUZA; SEABRA; NOGUEIRA, 2017).

O governo de Minas Gerais regulamentou a lei nº 485/2011 – Pró-Macaúba, na qual instituiu o incentivo ao cultivo, à extração, à comercialização, ao consumo e à transformação da macaúba. Assim, este é o único Estado em que mudas da palmeira são negociadas e seu plantio é feito em escala comercial (SILVA; ANDRADEO, 2014).

Além da obtenção de insumos energéticos ou alimentícios em rendimentos pouco vistos em outras espécies vegetais, esta espécie agrega outros requisitos para o desenvolvimento sustentável, destacando-se: o uso integral dos coprodutos como fonte de cogeração de energia, ou produtos de alto valor agregado, como carvões ativados; o balanço de energia favorável e reduzida emissão de GEE em sistemas de cultivo organizado; aproveitamento dos espaços entre as palmeiras, que permitem plantios intercalares com outras culturas agrícolas, inclusive oleaginosas, e/ou o pastoreio de criações da pecuária e aptidão para os sistemas de produção em Integração Lavoura Pecuária Floresta (ILPF) (FAVARO et al., 2018).

O mais importante de seus glicerídeos é o ácido láurico (12:0) cerca de 45%, seguindo-se o oléico (18:1) em 16% (BELTRÃO; OLIVEIRA, 2008). Estas características conferem boa estabilidade oxidativa ao óleo de polpa da macaúba. Apesar disso, a acidificação decorrente de manejo inadequado nas etapas de colheita e pós-colheita e o tempo de espera para o início da colheita, tem sido alguns dos gargalos para a sua comercialização (FAVARO et al., 2018).

O biodiesel de óleo de macaúba concorda com as exigências europeias de qualidade, e constitui uma ótima opção para climas frios e temperados por apresentar baixo ponto de névoa (7-8°C); ou seja, não há riscos de formação de sólidos nem entupimento dos dutos e conexões do tanque de combustível ao motor. Além disso, devido ao baixo índice de iodo (70-85 g/100g óleo de amêndoa), o biodiesel de macaúba pode ser utilizado em mistura com outro biodiesel obtido de óleos com elevados teores de ésteres insaturados, tal como o óleo de soja e de girassol (RODRIGUES, 2007).

Hoje a macaúba é foco em pesquisa e desenvolvimento para cultivo nas regiões Centro-Oeste e Nordeste em sistemas ILPF para produção de óleo pela agricultura familiar, médios e grandes produtores; de acordo com CSOB/MAPA (2019), com o objetivo de diversificar as fontes matérias-primas de biodiesel nos próximos anos.

Em relação ao preço, o fruto da macaúba foi incluso na lista de produtos extrativos da

safra 2018/2019 com preço mínimo definido, permitindo aos agricultores familiares acessar na Política de Garantia de Preços Mínimos (PGPM-Bio). Com esse programa passaram de receber entre (0,13-0,25) R\$/kg de fruto de macaúba, para R\$ 0,57 em Minas Gerais e R\$ 0,76 em Ceará por kg de fruto (CONAB, 2020; CONAB, 2019c). O preço de venda do óleo da polpa e da amêndoa foi cotado entre (3,70-4,00) R\$/l (SILVA; ANDRADEO, 2014).

A previsão em relação à macaúba é que em poucos anos seja uma fonte importante para a produção do biodiesel e muitas pesquisas estão sendo feitas para que não ocorra com a macaúba o que aconteceu há alguns anos com o pinhão-manso, um excesso de otimismo entre produtores de biodiesel antes mesmo de existirem pesquisas e o estabelecimento de dados agronômicos sobre a cultura (BIODIESELBR, 2016).

3.4.10 Babaçu

O babaçu (*Attalea Speciosa* M.) é uma palmeira da família Arecaceae, de tronco simples, robusto, imponente, com até 20 m de altura; produz cachos que comportam até 400 frutos ou cocos, pesando cerca de 120 g quando seco (BELTRÃO; OLIVEIRA, 2008).

Esta espécie atinge a maturidade com 8 a 10 anos de vida, alcança plena produção por volta dos 15 anos de idade, e tem uma vida média de 35 anos. Produz frutos durante todo o ano (CONAB, 2019b).

A área geográfica de ocorrência da palmeira de babaçu estimada para o Brasil é de 18,4 milhões de hectares com área efetivamente coberta de 6,9 milhões de hectares. Essas extensões são conhecidas como babaçuais, sendo sua maior concentração nos estados do Maranhão, Tocantins e Piauí. A atividade extrativista no estado do Maranhão foi responsável pela produção de 47.116 toneladas de amêndoas de Babaçu no ano de 2018, e representa 92,8 % do total produzido em território nacional (CONAB, 2019b). O babaçu encontra-se também em muitos municípios do Mato Grosso, Goiás, Amazonas e Pará (BELTRÃO; OLIVEIRA, 2008).

Do babaçu são extraídos diversos produtos e coprodutos. O fruto é composto pelo epicarpo (12-18%), material lignocelulósico que pode ser utilizado para geração de energia através da queima em caldeiras, pelo mesocarpo (17-22%), com aplicação na fabricação de ração animal ou produção de etanol, pelo endocarpo (52-60%), altamente resistente e que pode ser utilizado para a produção de aglomerados em substituição à madeira, forragem ou fertilizantes e, finalmente, pela amêndoa (6-8%), de onde é extraído o óleo e a torta, esta última também

com utilização na alimentação animal (BELTRÃO; OLIVEIRA, 2008).

Das folhas do babaçu podem ser fabricados diversos utilitários, tais como cestos, peneiras, esteiras, cercas, janelas, portas, além de armação e cobertura de casas. Das cascas é possível, também, produzir coque, carvão reativado, gases combustíveis, ácido acético e alcatrão (SOUZA; SEABRA; NOGUEIRA, 2017).

A amêndoa do babaçu contém 65 a 68% de óleo produzindo de 50 a 120 kg/ha (SOUZA; SEABRA; NOGUEIRA, 2017). O óleo de babaçu possui características excelentes para produção de biodiesel, de acordo com (LIMA et al., 2007), devido à predominância de ésteres láuricos na sua composição; 44% de ácido láurico (12:0), 17% de ácido mirístico (14:0) 14% de ácido oléico (18:1), que interagem de forma mais eficaz com o agente transesterificante e com o catalisador. No entanto, tais cadeias curtas de carbono proporcionam maior massa de oxigênio em relação ao carbono, reduzindo, consideravelmente, o poder calorífico do biodiesel.

O óleo não comestível de babaçu é feito tradicionalmente por unidades de beneficiamento e tem destino as fábricas de produtos de limpeza, cosméticos, alimentos e outros. Porém, a competição com óleo de palma ainda é um problema, perdendo espaço no mercado de processamento de óleos láuricos, o qual gera rendimentos comparativamente superiores. Apesar de sua representatividade, o óleo de babaçu vem perdendo mercado para o óleo de palma que é mais rentável de produzir (CONAB, 2019b).

Os extrativistas da amêndoa do babaçu se encontram incluídos na PGPM-Bio. Assim, o preço mínimo de venda é de 3,04 R\$/kg em 2018 para Norte, Nordeste e Mato Grosso (CONAB, 2019c). A palmeira é uma ótima opção para suprir a demanda de óleo nessas regiões e promover o desenvolvimento social (CONAB, 2019b).

Entre as palmeiras, o babaçu tem sido alvo de pesquisas avançadas para a fabricação de biocombustíveis como o biodiesel e o bioquerosene a partir de seu óleo (BELTRÃO; OLIVEIRA, 2008). Contudo, embora estudos demonstrem viabilidade técnica para a produção de biodiesel de óleo de babaçu, o preço de venda do óleo de babaçu em 2018 foi de 5,25 R\$/l, podendo chegar a 6,80 R\$/l, duas a três vezes mais caro do que o óleo de soja (CONAB, 2019c).

Capítulo 4

A Política RenovaBio um programa para aumentar a produção de biocombustíveis em direção ao desenvolvimento sustentável

Neste capítulo será apresentada a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), seus principais objetivos e instrumentos, dando particular ênfase na ferramenta que calcula a intensidade de carbono dos biocombustíveis RenovaCalc e os créditos de descarbonização CBIOS para o setor do biodiesel. Na última seção, aponta-se a questões referentes aos biocombustíveis e ao carácter sustentável da política.

4.1 O que é o RenovaBio

O RenovaBio é a Política Nacional de Biocombustíveis, lançado pelo MME em dezembro de 2016 e instituída pela lei nº 13.576 de 2017, constitui uma política de Estado que, pela primeira vez, objetiva traçar uma estratégia conjunta para reconhecer o papel estratégico de todos os tipos de biocombustíveis (etanol, biodiesel, biometano, bioquerosene, segunda geração, entre outros) na matriz energética brasileira, tanto no que se refere à sua contribuição para a segurança energética, com previsibilidade, quanto para mitigação de redução de emissões de gases causadores do efeito estufa no setor de combustíveis (MME, 2017a; MME, 2017b).

Seus principais objetivos são:

- Fornecer uma importante contribuição para o cumprimento dos compromissos assumidos

pele Brasil no âmbito do Acordo de Paris;

- Promover a adequada expansão dos biocombustíveis na matriz energética, com ênfase na regularidade do abastecimento de combustíveis; e
- Assegurar previsibilidade para o mercado de combustíveis, induzindo ganhos de eficiência energética e de redução de emissões de gases causadores do efeito estufa na produção, comercialização e uso de biocombustíveis (ANP, 2020d).

Diferentemente de medidas tradicionais, o RenovaBio não propõe a criação de imposto sobre carbono, subsídios, crédito presumido ou mandatos volumétricos de adição de biocombustíveis a combustíveis. O RenovaBio não altera os mandatos existentes (etanol anidro na gasolina e biodiesel no diesel) (MME, 2017a).

O funcionamento do RenovaBio se baseia em três instrumentos principais: as metas anuais de redução de intensidade de carbono ($\text{gCO}_{2\text{eq}}/\text{MJ}$) para um período mínimo de dez anos, a Certificação de Biocombustíveis e o Crédito de Descarbonização por Biocombustíveis (CBIO)(EPE, 2018a).

A Figura 4.1 apresenta o esquema de funcionamento do RenovaBio.

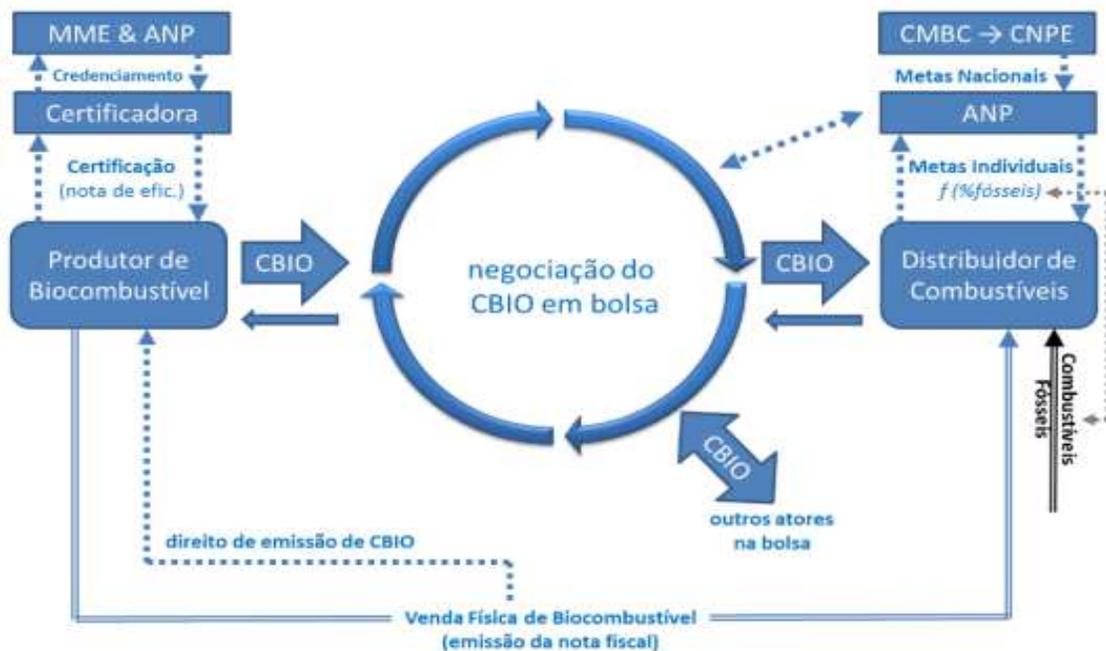


Figura 4.1: Esquema de funcionamento do RenovaBio
Fonte: (MME, 2017a)

4.2 Metas de descarbonização dos biocombustíveis

Com previsão para iniciar em 2020, as metas nacionais de descarbonização (Tabela 4.1), foram definidas para um período de dez anos de 2019 a 2029 pela Resolução CNPE nº 15, de 24 de junho de 2019 (CNPE, 2019).

Entretanto, em 10 de setembro de 2020, foi publicada a Resolução CNPE nº 8, de 18 de agosto de 2020, que alterou os valores definidos previamente, como consequência dos impactos da Pandemia de COVID-19. A meta compulsória para o ano de 2020 foi reduzida de 28,7 milhões de CBIOs para 14,53 milhões de CBIOs. Estas metas anuais serão desdobradas em metas individuais compulsórias anuais, para os distribuidores de combustíveis, conforme sua participação no mercado de combustíveis fósseis (ANP, 2020d).

Essa alteração é questionada por diferentes representantes e entidades do setor de biodiesel já que cria instabilidade no mercado e ameaça a credibilidade da política de descarbonização dos combustíveis do país (BIODIESELBR, 2020).

Tabela 4.1: Metas compulsórias anais estabelecidas em unidades de Créditos de Descarbonização (CBIOs)

| | Milhões CBIOs | | | | | | | | | | |
|--------------------------|---------------|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 | 2028 | 2029 |
| Meta Anual | 16,8 | 28,7 *14,53 | 41 | 49,8 | 59,6 | 66,9 | 73,3 | 79,5 | 85,1 | 90,1 | 95,5 |
| Intervalos de tolerância | 0 | 0 | 45,5 | 54,3 | 64,1 | 71,4 | 77,8 | 84 | 89,6 | 94,6 | 100 |
| | 0 | 0 | 36,5 | 45,3 | 55,1 | 62,4 | 68,8 | 75 | 80,6 | 85,6 | 91 |

Fonte: CNPE (2019),*ANP (2020d)

Na definição destas metas, supõe que as distribuidoras de combustível em atividade no Brasil terão que comprovar reduções do equivalente a 95,5 milhões de toneladas de CO₂ em emissões de GEE em 2029, e que a intensidade de carbono média dos combustíveis consumidos no país deverá ser de 66,1 (gCO_{2eq}/MJ) nesse ano.

4.3 Certificação da produção eficiente de biocombustível

Outro instrumento do RenovaBio é a certificação da produção de biocombustíveis. Por meio dela, serão atribuídas notas diferentes para cada produtor e importador de biocombustível. A nota refletirá exatamente a contribuição individual de cada agente produtor para a mitigação de uma quantidade específica de GEE em relação ao seu substituto fóssil (em termos de

gCO_{2eq}/MJ). Portanto, maior será a nota para o produtor que produzir maior quantidade de energia líquida, com menores emissões de CO₂ no ciclo de vida (ANP, 2020d).

A participação no RenovaBio é de caráter voluntário, porém para a emissão do Certificado produtores ou importadores (Emissor Primário) de biocombustível deverão atender aos requisitos da Resolução ANP nº 758, de 23 de novembro de 2018. Esses produtores, contratarão firmas inspetoras credenciadas na ANP para realização da Certificação de Biocombustível e validação da Nota de Eficiência Energético-Ambiental (NEEE). O Certificado da Produção Eficiente de Biocombustíveis terá validade de três anos (ANP, 2018).

Os três critérios fundamentais de elegibilidade do produtor de biomassa definidos para participar do RenovaBio são:

- A matéria-prima certificada não pode ter origem de área onde tenha ocorrido supressão de vegetação nativa a partir de novembro de 2018 (desmatamento zero na produção de biomassa);
- Registro no Cadastro Ambiental Rural (CAR) com status ativo ou pendente; e
- As áreas de cultivo devem respeitar os zoneamentos agroecológicos (ANP, 2018).

Esses critérios visam garantir que a biomassa produzida para a geração de biocombustíveis gerará um combustível limpo, vinculando os CBIOs à sustentabilidade no uso da terra.

Uma vez tendo aderido ao programa, a unidade agroindustrial produtora de biocombustível, individualmente, obriga-se a fornecer todos os parâmetros técnicos do seu processo produtivo - nas fases de produção, tratamento e conversão da biomassa em biocombustível - para alimentação da RenovaCalc ferramenta de cálculo oficial do RenovaBio (MATSUURA et al., 2018).

4.3.1 RenovaCalc

Para contabilizar a intensidade de carbono do biocombustível a certificar, o programa RenovaBio tem um modelo de calculadora que vai gerando um índice em gCO_{2eq}/MJ (MME, 2017b).

A RenovaCalc é a ferramenta desenvolvida com base na metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) atribucional, “do berço ao túmulo”, com alocação por critério energé-

tico, para avaliar diferentes rotas de produção de biocombustíveis: etanol de cana-de-açúcar de primeira e de segunda geração, etanol de milho, biodiesel, biometano e bioquerosene.

A abrangência dos cálculos “do berço ao túmulo” sugere que sejam contabilizados todos os fluxos de material e energia consumidos pelos processos produtivos e emitidos para o meio ambiente, desde a extração de recursos naturais, aquisição ou produção e tratamento da biomassa, sua conversão em biocombustível, até sua combustão em motores, incluindo todas as fases de transporte. Embora um estudo de ACV completo deva abranger várias categorias de impacto ambiental, relacionadas à proteção de recursos naturais, de sistemas ecológicos e da saúde humana, no programa RenovaBio é considerada apenas a categoria “Mudança do Clima” (MATSUURA et al., 2018).

Atualmente, a RenovaCalc (conjunto de planilhas Excel) está disponibilizada no site da ANP e se encontra em constante revisão (ANP, 2020e).

Na RenovaCalc, para cada rota de biocombustível são solicitados dados gerais de identificação da Unidade Produtora, informações sobre o cumprimento dos critérios de elegibilidade ao programa (relacionados a medidas de controle para evitar a supressão da vegetação nativa) e dados do processo produtivo, distribuídos em:

1. Fase agrícola (quando pertinente);
2. Fase industrial;
3. Fase de distribuição.

A RenovaCalc contabiliza as emissões a partir das informações da fase agrícola e industrial fornecidas pelos produtores dos biocombustíveis, gerando o índice de intensidade de carbono do biocombustível, que posteriormente é subtraído do índice do combustível fóssil correspondente, gerando a sua NEEA (em $\text{gCO}_{2\text{eq}}/\text{MJ}$). A nota é um fator para a emissão dos CBIOS que poderão ser negociados posteriormente pelo produtor de biocombustível (ANP, 2019b), como se apresenta na Figura 4.2.

Na fase agrícola os parâmetros solicitados incluem o preenchimento dos dados de produção própria da usina e de fornecedores externos, ambos de responsabilidade da unidade produtora. É possível optar pelo preenchimento dos dados por “perfil específico” ou por “perfil padrão”, exceto para as perguntas relacionadas aos critérios de elegibilidade ao programa RenovaBio e para os parâmetros: “área total”, “produção total”, “quantidade total de biomassa

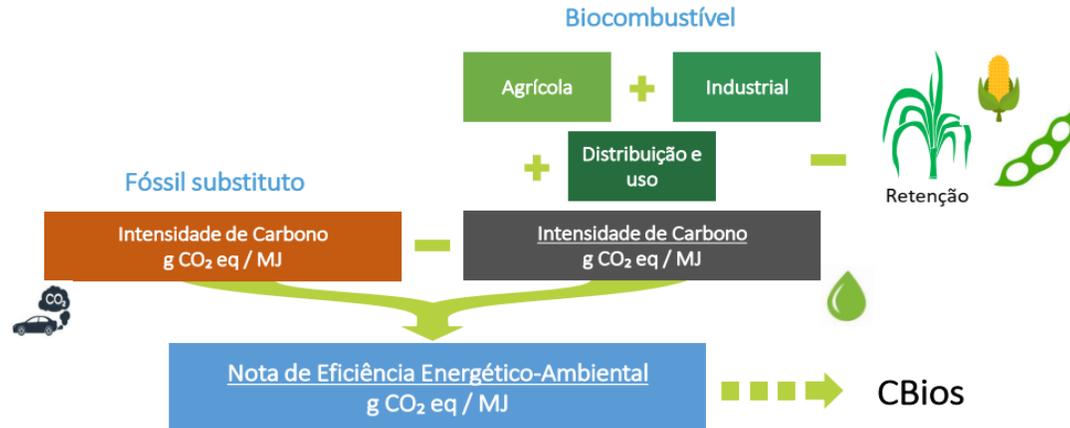


Figura 4.2: Esquema geral de funcionamento da RenovaCalc
Fonte: (MORANDI, 2019)

primária comprada pela unidade produtora”, que sempre deverão ser informados (MATSUURA et al., 2018).

Para a rota de biodiesel, outros dados referentes a produção agrícola como “quantidade de sementes”, consumo de “corretivos”, de “fertilizantes sintéticos e/ou orgânicos”, de “combustíveis e eletricidade da rede” podem ser preenchidos como informação constante no “perfil padrão” e obrigatória no “perfil específico” (Figura 4.3) (ANP, 2019b).

O “perfil de produção específico” corresponde aos dados primários do processo agrícola das áreas de produção da usina e de seus fornecedores. Já o “perfil de produção padrão” corresponde ao nível tecnológico médio nacional (típico), gerado a partir de informações de bancos de dados do setor produtivo e da literatura técnica, ao qual foram aplicados fatores de penalização (MATSUURA et al., 2018). Dito isto, sempre será melhor fornecer dados primários, ou seja, dados reais para obter melhor nota final. No entanto, se for muito difícil obtê-los e verificá-los, recomenda-se trabalhar com dados padrão.

No caso particular do produtor de biodiesel, conhecer a procedência de suas matérias-primas é um desafio já que, de forma contrária aos produtores de etanol, onde a usina produz ou compra diretamente dos produtores de cana, os fornecedores de oleaginosas tem muitos intermediários (cooperativas e cerealistas) sem disponibilidade pública de informações, precisando fazer a rastreabilidade certa da cadeia para preencher os dados RenovaCalc. Além disso existe falta de dados da fase industrial, particularmente da etapa de esmagamento e produção do óleo que mais tarde sera usado para a fabricação do biodiesel (MORANDI, 2019).

| Fase agrícola - Dados consolidados | | | | | |
|---|----------------------------------|--|-------------------|----------------------|--------|
| Informações gerais | | | | | |
| Área total | <input type="text"/> | ha | | | |
| Produção total (base úmida) | <input type="text"/> | t soja | Umidade | <input type="text"/> | |
| Quantidade comprada pela unidade produtora de biocombustível (base úmida) | <input type="text"/> | t soja | | | |
| Corretivos | | | | | |
| Calcário calcítico | <input type="text"/> | kg/t soja | | | |
| Calcário dolomítico | <input type="text"/> | kg/t soja | | | |
| Gesso | <input type="text"/> | kg/t soja | | | |
| Sementes | | | | | |
| Sementes | <input type="text"/> | kg/t soja | | | |
| Fertilizantes Sintéticos | | | | | |
| Ureia | <input type="text"/> | kg N/t soja | | | |
| Fosfato Monoamônico (MAP) | <input type="text"/> | kg N/t soja | | | |
| Fosfato Monoamônico (MAP) | <input type="text"/> | kg P ₂ O ₅ /t soja | | | |
| Fosfato diamônico (DAP) | <input type="text"/> | kg N/t soja | | | |
| Fosfato diamônico (DAP) | <input type="text"/> | kg P ₂ O ₅ /t soja | | | |
| Nitrato de amônio | <input type="text"/> | kg N/t soja | | | |
| Solução de nitrato de amônio e ureia (UAN) | <input type="text"/> | kg N/t soja | | | |
| Amônia anidra | <input type="text"/> | kg N/t soja | | | |
| Sulfato de amônio | <input type="text"/> | kg N/t soja | | | |
| Nitrato de amônio e cálcio (CAN) | <input type="text"/> | kg N/t soja | | | |
| Superfosfato simples (SSP) | <input type="text"/> | kg P ₂ O ₅ /t soja | | | |
| Superfosfato triplo (TSP) | <input type="text"/> | kg P ₂ O ₅ /t soja | | | |
| Cloreto de potássio (KCl) | <input type="text"/> | kg K ₂ O/t soja | | | |
| Outros | <input type="text"/> especificar | kg N/t soja | | | |
| Outros | <input type="text"/> especificar | kg P ₂ O ₅ /t soja | | | |
| Outros | <input type="text"/> especificar | kg K ₂ O/t soja | | | |
| Fertilizantes Orgânicos/Organominerais | | | | | |
| Outros | <input type="text"/> especificar | kg/t soja | Concentração de N | <input type="text"/> | g N/kg |
| Outros | <input type="text"/> especificar | kg/t soja | Concentração de N | <input type="text"/> | g N/kg |
| Outros | <input type="text"/> especificar | kg/t soja | Concentração de N | <input type="text"/> | g N/kg |
| Outros | <input type="text"/> especificar | kg/t soja | Concentração de N | <input type="text"/> | g N/kg |
| Outros | <input type="text"/> especificar | kg/t soja | Concentração de N | <input type="text"/> | g N/kg |

Figura 4.3: Planilha de RenovaCalc para a fase agrícola na rota de biodiesel
Fonte: ANP (2019b)

| Processamento e rendimentos | | | |
|--|----------------------|---|---|
| Óleo de soja próprio | | | |
| Quantidade de óleo de soja processado | <input type="text"/> | t óleo/ano | |
| Distância de transporte - óleo de soja | <input type="text"/> | km | |
| Alguma fração dessa matéria-prima é elegível? | <input type="text"/> | | |
| Óleo de soja de terceiros | | | |
| Quantidade de óleo de soja processado | <input type="text"/> | t óleo/ano | |
| Distância média de transporte - óleo de soja | <input type="text"/> | km | |
| Alguma fração dessa matéria-prima é elegível? | <input type="text"/> | | |
| Óleo de palma | | | |
| Quantidade de óleo de palma processado | <input type="text"/> | t óleo/ano | |
| Distância de transporte - óleo de palma | <input type="text"/> | km | |
| Alguma fração dessa matéria-prima é elegível? | <input type="text"/> | | |
| Óleo de algodão | | | |
| Quantidade de óleo de algodão processado | <input type="text"/> | t óleo/ano | |
| Distância de transporte - óleo de algodão | <input type="text"/> | km | |
| Alguma fração dessa matéria-prima é elegível? | <input type="text"/> | | |
| Outros óleos vegetais | | | |
| Quantidade de outros óleos vegetais processado | <input type="text"/> | t óleo/ano | |
| Distância de transporte - outros óleos vegetais | <input type="text"/> | km | |
| Alguma fração dessa matéria-prima é elegível? | <input type="text"/> | | |
| Óleo de fritura usado | | | |
| Aporte total de óleo de fritura usado processado | <input type="text"/> | t óleo/ano | |
| Distância de transporte - óleo de fritura usado | <input type="text"/> | km | |
| Gordura animal | | | |
| Aporte total de gordura animal processada | <input type="text"/> | t gordura animal/ano | |
| Distância de transporte - gordura animal | <input type="text"/> | km | |
| | | Intensidade de Carbono média do óleo adquirido pela unidade produtora | <input type="text"/> g CO ₂ eq/kg óleo |

Figura 4.4: Planilha de RenovaCalc para a fase industrial (Processamento e rendimentos) na rota de biodiesel

Fonte: ANP (2019b)

Por outra parte, na planilha da RenovaCalc disponível atualmente, na fase agrícola (Figura 4.3) existe a limitação de trabalhar apenas com os dados da cultura da soja em unidades (t soja), o que indica que o programa ainda precisa melhorias para possibilitar uma elegibilidade maior da produção de biodiesel à base de outras alternativas oleaginosas.

Para a fase industrial não existe a opção de “perfil padrão”, serão sempre solicitados dados primários referentes ao processo de produção dos biocombustíveis, devendo ser declarada a quantidade total de biomassa processada e o rendimento total de todos os produtos, independentemente do atendimento aos critérios de elegibilidade (ANP, 2019b).

Para a rota do biodiesel, o produtor deverá preencher dados referentes a quantidade de matéria prima processada, processamento efetivo de óleo próprio, de óleo de fornecedores, aporte de biomassa residual (Figura 4.4), rota de produção (etílica ou metílica), rendimento de óleo, produção de biodiesel e coprodutos ao ano (glicerina, farelo), consumo de insumos industriais, consumo de biocombustíveis, combustíveis e eletricidade da rede (Figura 4.5)(ANP, 2019b).

| | | | |
|------------------------------------|--|------------------------------|---|
| Rota de produção | | | |
| Produção de Biodiesel | | m ³ /ano | |
| Produção de Glicerina purificada | | t/ano | |
| Produção de Glicerina bruta | | t/ano | |
| Insumos | | | |
| Metanol | | t/ano | |
| Metilato de sódio | | t/ano | |
| Etanol anidro | | t/ano | |
| Hidróxido de sódio | | t/ano | |
| Combustíveis e eletricidade | | | |
| Eletricidade da rede - mix médio | | MWh/ano | |
| Eletricidade - PCH | | MWh/ano | |
| Eletricidade - biomassa | | MWh/ano | |
| Eletricidade - eólica | | MWh/ano | |
| Eletricidade - solar | | MWh/ano | |
| Diesel - B8 | | m ³ /ano | |
| Diesel - B10 | | m ³ /ano | |
| Diesel - BX | | m ³ /ano | |
| Diesel - B20 | | m ³ /ano | |
| Diesel - B30 | | m ³ /ano | |
| Biodiesel - B100 | | m ³ /ano | |
| Óleo combustível | | m ³ /ano | |
| Biogás de terceiros | | Nm ³ /ano | |
| Biogás próprio | | Nm ³ /ano | |
| Gás natural | | Nm ³ /ano | |
| | | Teor de biodiesel na mistura | <input type="text"/> |
| | | PCI do biogás | <input type="text"/> MJ/Nm ³ |
| | | PCI do biogás | <input type="text"/> MJ/Nm ³ |

Figura 4.5: Planilha de RenovaCalc para a fase industrial (Processamento e rendimentos) na rota de biodiesel

Fonte:ANP (2019b)

Em relação à distribuição do biocombustível, a informação solicitada é obrigatória e exige evidências comprobatórias. Para cada biocombustível, uma distância média de distribuição da usina até o consumidor final foi determinada, sendo esta distância igual para todos os sistemas

logísticos: a) Rodoviário; b) Dutoviário; c) Ferroviário; d) Marítimo (apenas para o etanol de milho importado) e; e)fluvial (Figura 4.6) (MATSUURA et al., 2018). Caso não possua informações passíveis de comprovação sobre o sistema logístico utilizado, deverá ser utilizado o sistema logístico rodoviário (ANP, 2019b).

| Fase de distribuição | |
|----------------------|-------|
| Rodoviário | 0,00% |
| Fluvial | 0,00% |
| Ferroviário | 0,00% |

A soma das porcentagens de distribuição deve ser igual a 100%!

Figura 4.6: Planilha de RenovaCalc para a fase distribuição na rota de biodiesel
Fonte:ANP (2019b)

4.3.2 Estimativa de emissões e cálculo da Intensidade de Carbono das matérias-primas para a produção do biodiesel

Diversos estudos têm avaliado 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 renovável, ou seja, a entrada total de energia fóssil durante seu processo de produção deve ser menor que a energia renovável 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). Este indicador bate com os objetivos do programa RenovaBio sob a perspectiva de redução de CO₂ e eficiência energética.

Para Rocha et al. (2014), Cerri et al. (2017) e Matsuura et al. (2018) os estudos de ACV que avaliam os impactos ambientais de várias matérias-primas para a produção dos biocombustíveis, indicam que a fase agrícola contribui significativamente para as emissões de GEE. Essas emissões estão relacionadas principalmente à produção e uso de insumos (produtos químicos, fertilizantes e pelo consumo de combustíveis fósseis). Os GEE mais importantes gerados na atividade agrícola são metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) e óxido nitroso (N₂O).

Matsuura et al. (2018), mencionam que nesta fase as principais práticas que impactam as emissões de GEE são o uso de calcário, o uso de insumos nitrogenados, a queima de resíduos agrícolas e o consumo de combustível fóssil em operações mecanizadas, além da Mudança de Uso da Terra. As contribuições decorrentes da produção e do uso agrícola de agrotóxicos (herbicidas e

pesticidas) são pouco significativas para a categoria de impacto “Mudança do Clima” considerada no RenovaBio, e portanto estes insumos são considerados na contabilidade de intensidade de carbono dos biocombustíveis na forma de dados padrão (não penalizados) e não são pedidos ao usuário.

Por outro lado, a contribuição dos processos da fase industrial para o desempenho ambiental do ciclo de vida do biocombustível está associada majoritariamente ao rendimento de produto(s) e coproduto(s) e ao consumo de combustíveis fósseis e de energia elétrica (MATSUURA et al., 2018).

No trabalho de Cerri et al. (2017), as principais fontes de emissões de GEE avaliadas nos processos da fase industrial do biodiesel (extração de óleo vegetal, pré-tratamento da matéria-prima e transesterificação) incluem a combustão em geradores estacionários e caldeiras; eletricidade consumida em fábricas e silos; e emissões indiretas da produção e transporte de insumos industriais (por exemplo hexano, metanol, metilato de sódio usado como catalisador no processo, nitrogênio entre outros) e combustíveis.

Para a RenovaCalc, os insumos industriais podem contribuir significativamente para o cálculo de intensidade de carbono para a rota do biodiesel, e por isso encontram-se como parâmetros de entrada (MATSUURA et al., 2018). É bom lembrar que o mercado utiliza principalmente o metanol produzido a partir de gás natural como álcool reagente para a transesterificação do óleo, apesar da grande oferta de etanol no país. O uso do etanol como insumo no processo de transesterificação poderia significar menos emissões de GEE, uma vez que sua produção é feita a partir da cana-de-açúcar renovável e amplamente explorada em várias regiões do país (ARANDA; SOARES; TAPANES, 2014).

A quantificação total das entradas e saídas do processo é feita pela RenovaCal, que faz a estimativa das emissões de GEE levando em consideração não só a fase agrícola e industrial, mas também a montante da fase agrícola, como a fabricação de insumos, tendo como referência os Guias IPCC 2006 no que respeita ao v.4 “Agriculture, Forestry and Other Land Use” para a fase agrícola e o v.3 “Industrial Processes and Product Use” para a fase industrial segundo (MATSUURA et al., 2018). Com isso é analisado o desempenho energético-ambiental do biocombustível calculando a intensidade de carbono em “gCO_{2eq}/MJ”. O Processo de cálculo ocorre como é mostrado na Figura 4.7.



Figura 4.7: Passos para a geração da nota de eficiência energética ambiental da RenovaCalc
Fonte: Morandi (2019)

Considera-se importante compreender como é a estimativa das emissões de CO₂ nas diferentes fases contabilizadas da cadeia de produção do biodiesel na RenovaCalc, já que proporciona informação sobre quais devem ser as medidas a serem tomadas para obter um perfil energético-ambiental desejado. Isto vislumbra uma oportunidade para avaliar matérias-primas com os melhores resultados na pegada de carbono, visto que maior será a nota para o produtor que produzir maior quantidade de energia líquida com menores emissões de CO₂ no ciclo de vida.

Não obstante seja difícil fazer comparação dos resultados de estudos de ACV de diferentes fontes oleaginosas para a fabricação de biodiesel, pois cada estudo utiliza diferentes cenários, abordagens e unidades (CERRI et al., 2017), nesta seção são apresentados alguns resultados em termos de gCO_{2eq}/MJ de biodiesel na Tabela 4.2.

Observando de forma geral a Tabela 4.2, vê-se que a produção de biodiesel de cártamo e palma são os mais favoráveis ao meio ambiente, já que possuem as menores emissões de gCO_{2eq}/MJ. O biodiesel de óleo de mamona teve os maiores impactos ambientais no que se refere as emissões de gCO_{2eq}/MJ, quase 4 vezes mais do que o biodiesel de palma de óleo, seguido pelo biodiesel de girassol. Algumas matérias-primas em desenvolvimento como macaúba e babaçu estão ainda no seu estágio inicial, e a ACV dessas fontes não está disponível na literatura.

Tabela 4.2: Emissão total de GEE na produção de biodiesel para matérias-primas não convencionais

| Matéria-Prima | Emissões (gCO _{2eq} /MJ) | Etapas | Referência |
|----------------------|--------------------------------------|---|--------------------------------|
| Soja | ^a 23,1- ^b 25,8 | Agrícola, Extração, Produção e Distribuição | Cerri et al. (2017) |
| Algodão | 36,5 | Agrícola, Produção e Transporte | EPA (2015) |
| Girassol | 58,9 | Agrícola, Transporte, Secado, Extração, Produção, Transporte e Distribuição | Iriarte e Villalobos (2013) |
| Canola | 47,9 | Agrícola, Extração, Produção, Transporte e Distribuição | Uusitalo et al. (2014) |
| Amendoim | 53,4 | Agrícola, Extração, Produção de óleo | Schmidt (2015) |
| Mamona | 85 | Produção agrícola, Produção biodiesel | Nogueira (2011) |
| Cártamo | 20,50 | Agrícola, Extração, Produção e Distribuição | Liu e Benson (2011) |
| Pinhão | 24,7 | Agrícola, Extração, Produção, Transporte e Distribuição | Uusitalo et al. (2014) |
| Manso | | | |
| Palma de óleo | 22,3 | Produção agrícola, Produção biodiesel | Nogueira (2011) |
| Macaúba | 4,1 | Agrícola | Fernández-Coppel et al. (2018) |
| Babaçu | ND | ND | |

Fonte: Elaboração própria

^a Para Sistema integrado de produção; e

^b Não integrado de produção.

4.3.3 Procedimento para certificação da produção eficiente de biocombustíveis

Após da unidade produtora preencher todos os dados de entrada da RenovaCalc, eles serão auditados pela firma inspetora. O Certificado da Produção Eficiente de Biocombustíveis é emitido por firma inspetora credenciada no RenovaBio como resultado do processo de certificação de biocombustíveis aprovado pela ANP e tem validade de três anos (ANP, 2019b). O processo é constituído por várias etapas conforme a Figura 4.8.

Deste procedimento, obtém-se o fator para emissão de CBIO calculado automaticamente no formulário do Certificado da Produção Eficiente de Biocombustíveis, que é disponibilizado no site da ANP, de acordo com a Fórmula 4.1.

$$f = NEEA * \frac{f_{elegivel}}{100} * \rho * PCI * 10^{-6} \quad (4.1)$$

onde f é o fator para emissão de CBIO; $NEEA$ é a Nota de Eficiência Energético-Ambiental (em gCO_{2eq}/MJ); $f_{elegivel}$ é a fração do volume de biocombustível elegível (em %); ρ é a massa específica do biocombustível (t/m³); PCI é o poder calorífico inferior do biocombustível MJ/kg.

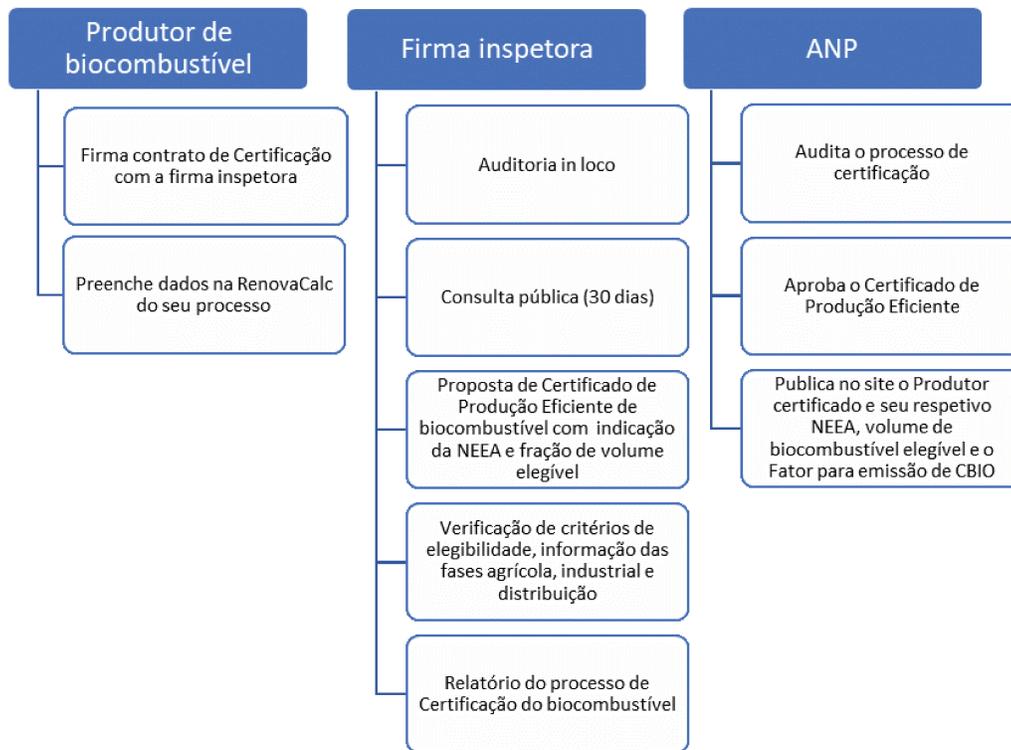


Figura 4.8: Processo de Certificação da produção eficiente de biocombustíveis
Fonte: Elaborado a partir de ANP (2019b)

O fator para emissão de CBIO poderá ser multiplicado pelo volume (em litros) comercializado pelo produtor de biocombustível de modo a obter-se a quantidade de CBIOs que cada nota fiscal dará direito a emitir (ANP, 2019b).

4.4 Crédito de Descarbonização por Biocombustíveis CBIO

Com as metas de descarbonização definidas e a Certificação de biocombustíveis no RenovaBio, a ligação desses dois instrumentos se dará com o CBIO. Ativo financeiro, registrado sob a forma escritural, é emitido pelo produtor de biocombustível para fins de comprovação da meta individual do distribuidor de combustíveis (MME, 2017a).

A criação do mercado dos CBIOs dentro do RenovaBio permite a internalização das externalidades ambientais positivas dos biocombustíveis e, por conseguinte, a remuneração do setor pelo novo serviço de abatimento de emissões de GEE, o que estimulará a expansão da oferta de biocombustíveis até o ótimo social (EPE, 2018a).

A quantidade de CBIOs variará de acordo com o volume de biocombustível comercia-

lizado pelas distribuidoras e a NEEA de cada emissor primário, como foi apresentado na seção anterior na Formula 4.1. Assim quanto menor a intensidade de carbono no ciclo de vida dos biocombustíveis, maior será a quantidade de CBIO a ser emitida para um determinado volume comercializado (EPE, 2018a).

O CBIO será negociado em bolsa também por outros agentes (pessoas físicas e jurídicas), e comprovará a compra de redução de emissão; ele não terá data de vencimento e será retirado de circulação somente quando for solicitada sua aposentadoria, como forma de trazer maior liquidez a esse mercado. O que vai gerar o valor desse papel após a oferta inicial será a mesma regra que comanda a comercialização de qualquer papel na bolsa: a relação entre a oferta e a demanda (MME, 2017a).

De fato, a partir de 27 de abril deste ano, o sistema de registro e negociação dos CBIOs já pode ser acessado pelos agentes do mercado na plataforma operada pela Brasil, Bolsa, Balcão (B3) única entidade a atuar como registradora dos títulos criados pelo RenovaBio (MME, 2020).

Após a conclusão da certificação pela ANP, a empresa produtora precisa firmar contrato com o Serviço Federal de Processamento de Dados (SERPRO) para enviar suas notas fiscais eletrônicas junto à receita federal para fins de utilização como lastro para emissão de CBIOs. Isto ocorre através da plataforma CBIO, ferramenta que calcula a quantidade de CBIOs a serem escriturados com base na NEEA. Um escriturador (banco ou instituição financeira), efetuará o processo de emissão e registro do crédito no ambiente da B3 (B3, 2020). Com isso, foram oficialmente concluídas todas as etapas para iniciar a Política Nacional de Biocombustíveis RenovaBio em 2020 como estava previsto.

Com as metas de descarbonização definidas, pretende-se, o mercado de créditos poderá movimentar até R\$ 13,9 bilhões em 2029 para o setor dos biocombustíveis e em particular R\$1,94 bilhões para o biodiesel, caso se confirme a projeção mais otimista do MME, que projetou que cada CBIO poderá ser negociado por R\$ 146,00 (MME, 2017a). Usando resultados de simulação do modelo de equilíbrio geral, projetado pela Unicamp, o valor de CBIO em 2029 seria R\$ 196,00 (RIBEIRO, 2019) e o faturamento da indústria de biodiesel seria R\$ 2,61 bilhões, caso todo o biodiesel seja certificado.

Nesse novo cenário, espera-se que os produtores de biodiesel aderidos ao programa com posse de CBIOs sejam mais competitivos nos leilões da ANP, uma vez que os preços do biodiesel que dependiam essencialmente do custo da matéria-prima e dos custos do processa-

mento industrial poderiam ter uma subtração correspondente à comercialização dos créditos de descarbonização CBIOS.

4.5 O carácter de sustentabilidade do programa **RenovaBio**

O conceito de desenvolvimento sustentável ainda não tem um consenso. De acordo com Marques, Skorupa e Ferraz (2003), Bellen (2004) e Hirakuri et al. (2014), as várias interpretações existentes ficam por conta dos diferentes interesses e ideologias. No entanto, a essência desse conceito está contida na definição pioneira gerada pela Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (CMMAD), que ainda está em uso e aponta que o desenvolvimento sustentável é aquele que satisfaz as necessidades da geração presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras.

As diversas definições de sustentabilidade, no geral, abrangem critérios referentes à equidade social, prudência ecológica e eficiência econômica, preservando em todos os seus três pilares - econômico, social e ambiental -, os direitos de todos à qualidade de vida (MARQUES; SKORUPA; FERRAZ, 2003), porém ela pode ser trasladada a diferentes dimensões.

A sustentabilidade do setor energético tem um significado importante no debate da questão ambiental, visto que muitos dos impactos ambientais que advêm das atividades humanas são provenientes da geração, manuseio e uso da energia (CORREIA, 2011).

Os biocombustíveis, como outras fontes de energia renováveis, tomaram relevância porque, além de proporcionarem benefícios ambientais quando comparadas às fontes convencionais de energia (fosséis), contribuem para uma maior segurança no suprimento energético e consequentemente ajudam a sustentar o crescimento econômico e o desenvolvimento social (CORREIA, 2011).

Porém, a sustentabilidade dos biocombustíveis tem sido amplamente questionada, e isso em parte deve-se a que não existe consenso sobre como medir a sustentabilidade do setor. Apesar de contribuir para a redução das emissões de GEE, os benefícios dos biocombustíveis tem sido contestados pelos diferentes impactos no uso da terra, dos recursos hídricos e na competição com a produção alimentar, dado que é impossível desligar atualmente a produção do biodiesel com a produção agrícola (CORREIA, 2011).

Assim o **RenovaBio**, programa que tem um carácter de pluralidade, previsibilidade e sus-

tentabilidade, entre outras ações, deverá viabilizar a oferta de energia cada vez mais sustentável, competitiva e segura.

O RenovaBio se constitui então como um importante vetor para a promoção sustentável dos biocombustíveis no Brasil, evitando o uso de biomassa proveniente de áreas de desmatamento e otimizando os processos para uma produção energeticamente eficiente.

Capítulo 5

Metodologia

Neste capítulo é apresentada a metodologia desenvolvida que teve como objetivo principal o estabelecimento de aspectos e indicadores para fazer a avaliação de algumas oleaginosas, a partir da análise de diferentes aspectos em três dimensões: técnica, econômica e ambiental. A seguir descreve-se o sistema de pontuação e se caracteriza quem são os tomadores de decisão que podem ter diferentes pontos de vista quanto à pontuação e podem atribuir diferentes pesos para obter a classificação das fontes de origem vegetal para cada dimensão, visando o desenvolvimento sustentável do biodiesel no Brasil.

5.1 Estabelecimento de aspectos e indicadores para avaliar as matérias-primas de origem vegetal não convencionais

Brasil, por ser um dos maiores produtores globais de biocombustíveis e particularmente por ser o segundo maior produtor mundial do biodiesel, desperta interesse particular em aspectos relacionados com a produção efetivamente sustentável de biocombustíveis, em especial no que se refere a questões ambientais, segurança energética e assuntos socioeconômicos (WALTER, 2007).

Vale a pena ressaltar que muitos fatores afetam a sustentabilidade de um sistema. Porém no que tange à produção de biodiesel, promover a produção de óleos vegetais com foco na diversificação da cadeia produtiva é um aspecto importante para o seu desenvolvimento sustentável. Por um lado, ajudaria a não depender apenas de uma única matéria prima como é a soja num mercado crescente como o do biodiesel, por outro, de acordo com Kamiyama (2014)

a diversificação biológica é um dos pilares da sustentabilidade em sistemas agrícolas, ao ajudar na conservação do solo, da água e dos recursos naturais.

A criação de indicadores ajuda a responder diferentes questões que auxiliam aos tomadores de decisões para avaliar um sistema e determinar o nível ou a condição em que este sistema deve ser mantido para que seja sustentável, incorporando os mais variados tipos de dimensões: aspectos econômicos, fatores sociais, desenvolvimento ambiental, evolução do conhecimento, diversidade cultural, influência política, etc (HIRAKURI et al., 2014)

Indicadores de sustentabilidade encaminhados à bioenergia e biocombustíveis já foram propostos por muitas instituições e pesquisadores, por exemplo, *Global Bioenergy Partnership* (GBEP, 2011), *Roundtable on Sustainable Biomaterials* (RSB, 2016), (MCBRIDE et al., 2011), (DIAZ-CHAVEZ, 2014), (RIMPPI et al., 2016). Os resultados dessas iniciativas são diversos. A literatura mostra que não existem indicadores definitivos o que justifica a existência dos diversos sistemas de indicadores, porém é necessário ter clareza do conceito de indicador.

Os indicadores são ferramentas com muitas funções. São úteis para medir, comunicar ideias, avaliar condições e tendências, efetuar comparações e prover informações. O objetivo principal dos indicadores é o de agregar e quantificar informações de uma maneira que sua significância fique mais aparente, resumindo ou simplificando as informações relevantes de determinado sistema (BELLEN, 2004; HIRAKURI et al., 2014).

Em conformidade com Bellen (2004), os indicadores como ferramentas de avaliação ajudam aos tomadores de decisão, na medida em que podem ser utilizados para o desenvolvimento de políticas, na função de planejamento e para familiarizar-se com conceitos ou aspectos envolvidos na sustentabilidade.

Sob esse enfoque nesta metodologia, buscou-se construir um quadro de indicadores adaptáveis para avaliar a viabilidade das diferentes oleaginosas a serem utilizadas como matéria-prima em direção a uma produção sustentável do biodiesel. Os indicadores propostos consideram aspectos inseridos em três dimensões distintas: técnica, econômica e ambiental. Os indicadores trazem aspectos relevantes na produção das oleaginosas, que influem na escolha das pessoas que vão decidir qual alternativa é a melhor para diversificar o *mix* de matérias-primas na cadeia produtiva deste biocombustível.

A metodologia é estruturada na ordem apresentada a seguir:

- Estabelecimento dos aspectos e indicadores para avaliar a viabilidade das diferentes al-

ternativas de origem vegetal a serem utilizadas como matéria-prima em direção a uma produção sustentável do biodiesel nas três dimensões abordadas.

- Aplicação dos indicadores para o caso particular de avaliação das oleaginosas. As alternativas e dados utilizados nesta análise correspondem às dez oleaginosas não convencionais discutidas na seção 3.4 do Capítulo 3. A soja é incluída com fins comparativos tendo em conta sua relevância na cadeia produtiva do biodiesel no Brasil.
- Definição do sistema de pontuação para cada indicador, sendo atribuída uma nota de 1 a 4 segundo o valor ou atributo de cada oleaginosa.
- Caracterização dos tomadores de decisão, ou seja, os agentes econômicos definidos pelo grau de verticalização das usinas produtoras do biodiesel e sob a ótica dos gestores de políticas públicas, que vão escolher as melhores candidatas para a diversificação da matéria-prima para a produção do biodiesel.

5.1.1 Aspectos e indicadores na dimensão técnica

O referencial teórico mostrou que aspectos conceituais e técnicos são importantes para a escolha das diferentes alternativas de oleaginosas disponíveis para a produção do biodiesel no Brasil. Isso ocorre porque ainda quando existem muitas matérias-primas de origem vegetal para a fabricação do biocombustível não é fácil usar todas aquelas para tal fim. A viabilidade de uma matéria-prima depende de sua competitividade tanto técnica quanto econômica e socioambiental (MOSER, 2009; RAMOS et al., 2017).

Aspectos desejáveis de matérias-primas alternativas de sementes oleaginosas para a produção de biodiesel incluem o desenvolvimento tanto da parte agrícola quanto da parte industrial, precisando de uma cadeia produtiva organizada que utilize de forma racional e eficiente os recursos naturais.

Por outra parte, aspectos físico-químicos são importantes para a obtenção de um produto que atenda às especificações de qualidade do biodiesel dado que muitas das características dos óleos vegetais são transferidas diretamente para o biodiesel (RAMOS et al., 2017).

Aspecto 5.1.1. *Desenvolvimento agrícola*

Indicador 5.1.1.1. *Produtividade esperada do óleo por área de terra usada*

A produtividade esperada do óleo é um importante indicador para a escolha da matéria-prima, dado que relaciona a produção de óleo da biomassa pelo uso de terra em unidades de (kg/ha). A produtividade é uma medida de saída de um processo de produção por unidade de entrada e pode ser usada para medir a eficiência com a qual os insumos são transformados em produtos finais (SOUZA, 2015). Nesse contexto, a obtenção de elevados níveis de produtividade de óleo além de propiciar a viabilidade agrícola e econômica de uma cultura, ao fazer mais utilizando cada vez menos recursos, também tem relevância ambiental. Maiores rendimentos também significam menor pressão por aberturas de novas áreas, o que se traduz como intensificação da agricultura, porém uma intensificação sustentável.

O indicador é baseado na média mundial (kg/ha) de óleo encontrada na revisão bibliográfica para cada espécie. Culturas com maior rendimento de óleo são preferíveis na produção do biodiesel.

Indicador 5.1.1.2. *Nível de domínio tecnológico na parte agrícola*

O indicador denota o grau de conhecimento na utilização de tecnologias apropriadas para manter a produção através do tempo, incluindo conhecimento em sementes selecionadas, pragas e doenças, volume de produção, área plantada e colhida, e grau de mecanização entre outras. Essa medida é realizada na escala (1 a 10) segundo (CSOB/MAPA, 2019) e permite verificar a escalabilidade da cultura .

Aspecto 5.1.2. *Desenvolvimento industrial*

Indicador 5.1.2.1. *Nível de domínio tecnológico na parte industrial*

O indicador evidencia o grau de aperfeiçoamento tecnológico para a transformação industrial das oleaginosas, existência de infraestrutura de produção, rodoviárias, conhecimento em processos, validação de equipamento e divulgação de material técnico para suportar o processamento e aproveitamento das culturas, ou seja, transferência eficiente de tecnologia na cultura. Considera-se uma escala numérica de 1 a 10 para essa medida (CSOB/MAPA, 2019).

Indicador 5.1.2.2. *Existência de apoio técnico por entidades de PD&I para a produção do biodiesel*

Para produzir a matéria-prima mais adequada em cada região e suficiente para atender à indústria de biodiesel, precisa-se suporte, apoio técnico e pesquisa pelas instituições públicas

e/ou privadas para o desenvolvimento tecnológico das opções mais viáveis. A Agenda de Inovação para a Cadeia Produtiva do biodiesel (CSOB/MAPA, 2019), oferece ações e investimento voltadas à PD&I de forma a contribuir na superação dos desafios tecnológicos identificados na área de biodiesel. O indicador mede a priorização das oleaginosas consideradas no médio e longo prazo para seu uso na produção industrial de biodiesel.

Aspecto 5.1.3. *Qualidade do biodiesel*

Indicador 5.1.3.1. *Perfil de ácidos graxos*

As características físico-químicas tornam favorável uma matéria-prima na indústria do biodiesel, visto que aqueles variados perfis são os principais parâmetros que podem alterar as propriedades do biocombustível (KNOTHE, 2010). Os óleos vegetais que contêm principalmente ácidos graxos monoinsaturados e diminuição de poli-insaturados, conferem melhores propriedades de qualidade ao biocombustível ao possuir maior número de cetano quanto melhor estabilidade oxidativa e melhor comportamento a seu uso em baixas temperaturas (BELTRÃO; OLIVEIRA, 2008; USDOE, 2016; MAHMUDUL et al., 2017). O aproveitamento de óleos vegetais que gerem um biodiesel de boa qualidade, de modo que seja um produto mais competitivo sem prejudicar a qualidade das emissões da queima, bem como o desempenho, a integridade do motor e a segurança do consumidor, são elementos norteadores para a escolha das matérias-primas oleaginosas.

Indicador 5.1.3.2. *Cumpra com a especificação de qualidade do biodiesel pela ANP*

Indicador determinante para a escolha da matéria-prima, pois é fundamental que a fonte de óleo vegetal confira as características adequadas para a utilização de biodiesel e a sua mistura com o diesel, lembrando que a qualidade sempre tem que ser garantida, com o objetivo de proteger o mercado consumidor.

Mesmo quando esse indicador é um critério de corte para a seleção da matéria-prima, não pretende criar obstáculos à utilização de algumas fontes de óleo vegetal como a mamona cuja alta viscosidade a deixa fora da especificação, pois essa matéria-prima pode ser usada em teores baixos misturada com outros óleos vegetais.

A Tabela 5.1 apresenta um resumo dos aspectos e indicadores estabelecidos na dimensão técnica.

Tabela 5.1: Síntese geral dos aspectos e indicadores na dimensão técnica para avaliar as matérias-primas

| Dimensão Técnica | |
|----------------------------|---|
| Aspecto | Indicador |
| Desenvolvimento agrícola | 1. Produtividade esperada do óleo 2. Nível de domínio tecnológico agrícola |
| Desenvolvimento industrial | 3. Nível de domínio tecnológico industrial 4. Existência de apoio técnico por entidades de PD&I para a produção do biodiesel |
| Qualidade do Biodiesel | 5. Perfil de ácidos graxos favorável 6. Cumpre com a especificação de qualidade do biodiesel pela ANP |

Fonte: Elaboração própria

5.1.2 Aspectos e indicadores na dimensão econômica

Com base na pesquisa bibliográfica, a parte econômica é bastante relevante na produção das oleaginosas selecionadas que influenciam direta e indiretamente o custo de produção do biodiesel. A escolha de alternativas que permitam a economicidade do produto para ser competitivo com o preço do diesel fóssil ao tempo que gera rentabilidade ao setor é primordial. Os aspectos observados nessa dimensão são a precificação do mercado, a segurança alimentar e a capacidade de comercialização e logística da produção.

Aspecto 5.1.4. *Precificação do mercado*

Indicador 5.1.4.1. *Preço da oleaginosa*

O preço do biodiesel depende em grande parte do mercado das *commodities* agrícolas e dos óleos vegetais, mercado caracterizado pelas flutuações nas cotações. O preço é um fator preponderante para a escolha da matéria-prima conforme foi visto na seção 3.2.1. Visto que a matéria-prima representa o maior custo de produção do biodiesel, aproximadamente 80%, o produtor necessita otimizar seus custos para ser competitivo. Quanto ao preço da oleaginosa, esse indicador foi selecionado pela sua relevância na verticalização das usinas de biodiesel, no caso das empresas que plantam, ou seja as totalmente integradas a matéria-prima será obtida a preço de custo, no caso das parcialmente integradas (esmagadoras) quanto menor for o valor desse preço, melhor será a alternativa

Indicador 5.1.4.2. Preço do óleo vegetal

Da mesma maneira que no indicador anterior, conforme ao grau de verticalização das usinas este indicador é de muita relevância uma vez que as usinas não integradas se vem afetadas pela variação do preço de óleo vegetal, preferindo os preços de óleos mais baratos para diminuir o custo de produção do biocombustível. O interesse é reduzir os custos da matéria-prima para a produção do biodiesel.

Aspecto 5.1.5. Segurança alimentar**Indicador 5.1.5.1. Existe concorrência com a produção alimentar?**

A seleção desse indicador é motivada pela importância de assegurar o direito humano a alimentos adequados, conforme conceituam o GBEP (2011), RSB (2016) e Souza (2015). Portanto, deve-se garantir que a produção de matéria-prima para biocombustíveis não agrave diretamente a segurança alimentar no país ou região onde ocorre o cultivo da biomassa.

Na utilização de oleaginosas destinadas a gerar biodiesel, identificar alternativas que não compitam com o setor alimentar seja no uso, no preço ou no uso de terras agrícolas, e seja dirigida estritamente para o uso energético evitaria ou minimizaria qualquer possibilidade de a produção de biodiesel afetar de alguma forma os preços das oleaginosas ou óleos vegetais utilizados como alimento, que é uma das críticas mais fortes ao setor. Assim, deve prevalecer a escolha de matéria-prima que não seja comestível.

Aspecto 5.1.6. Comercialização e logística de produção**Indicador 5.1.6.1. Ciclo de cultivar**

De acordo com Embrapa (2020a), de modo geral, a cultivar é responsável por 50% do rendimento final de uma lavoura e seu ciclo é um aspecto importante pois expõe o tempo que a planta tarda em se desenvolver e produzir da semente até o pendoamento, até a maturação fisiológica ou até a colheita, sendo esse indicador importante para a escolha correta da semente, já que pode ser a razão de sucesso ou insucesso da lavoura.

Nesse sentido, o ciclo produtivo esta relacionado com o tempo de retorno do investimento da cultura (PINHO, 2015). O indicador foi selecionado e usado para todas as oleaginosas, no entanto devido à heterogeneidade desse ciclo, as oleaginosas de tipo anual são comparadas

entre si e o ciclo produtivo é medido em dias, quanto mais curto melhor. De forma semelhantemente, se a decisão é usar culturas perenes, aquelas são comparadas entre as espécies permanentes e o ciclo é medido em anos. Salienta-se que a escolha do cultivar de ciclo adequado é para aquelas que é mais curto, o que permite uma colheita mais cedo. No caso das perenes a melhor alternativa é aquela que além de começar cedo sua produção é a mais prolongada.

Indicador 5.1.6.2. *Regiões produtoras e potenciais para produção*

O indicador busca ressaltar a quantidade de regiões onde pode ocorrer o desenvolvimento das oleaginosas não convencionais. Segundo Bergmann et al. (2013), idealmente cada região do país deveria ter sua própria matéria-prima para produzir biodiesel em indústrias locais. Ter uma oferta descentralizada de óleos vegetais oriundos de espécies anuais e/ou perenes complementares ao óleo de soja, aumenta a competitividade e melhora os preços e o escoamento do biodiesel no território nacional, pelo que é desejável oleaginosas capazes de produzir em diferentes regiões.

Indicador 5.1.6.3. *Capacidade de comercialização de produtos, coprodutos e uso eficiente dos recursos secundários*

De acordo com Bomfim, Silva e Santos (2007), o processamento das matérias-primas de origem vegetal gera vários coprodutos como o glicerol, os farelos obtidos com solventes e as tortas por prensagem após do processo de extração física do óleo. Os coprodutos resultantes da produção do biodiesel são de grande potencial para a geração de renda adicional na cadeia produtiva, assim como também para ajudar na competitividade do preço do biodiesel frente ao diesel.

O glicerol é um coproduto da cadeia do biodiesel, que corresponde a aproximadamente 10% em massa do biocombustível produzido e pode ser vendido bruto ou refinado visando melhores receitas aos produtores (EPE, 2020a). Para o setor de alimentação são disponibilizadas a torta, ou o farelo. Também, há possibilidade de se utilizar as tortas como fertilizantes nitrogenados (adubos orgânicos) ou podem ainda ficar disponíveis as cascas das amêndoas, para ser comercializadas separadamente (BOMFIM; SILVA; SANTOS, 2007).

Por outra parte, na produção de biomassa para a geração de biocombustíveis também se produzem outros subprodutos e resíduos agrícolas, que podem ser colhidos e processados para outros fins (FRITSCHÉ et al., 2012). A eficiência em converter esses recursos "secundários" em

produtos energéticos úteis para a fábrica é importante para melhorar a economicidade das operações. Por exemplo, o uso de fibras, endocarpo e efluentes sólidos como combustíveis na caldeira das usinas indicam otimização dos processos e uso sustentável dos recursos (RAMALHO FILHO et al., 2010).

Assim quanto mais alternativas para a utilização e comercialização dos coprodutos das oleaginosas, maiores as chances de sucesso da cultura na cadeia produtiva do biodiesel. O indicador visa medir o número de coprodutos, suas aplicações, se a torta/farelo é usada como alimento e se os recursos secundários podem ser usados como produtos energéticos na própria fábrica.

Na Tabela 5.2 estão condensados os aspectos abordados e os indicadores estabelecidos para a dimensão econômica.

Tabela 5.2: Síntese geral dos aspectos e indicadores na dimensão econômica para avaliar as matérias-primas

| Dimensão Econômica | |
|---|--|
| Aspecto | Indicador |
| Precificação do mercado | 1. Preço da oleaginosa 2. Preço do óleo vegetal |
| Segurança alimentar | 3. Existe concorrência com a produção alimentar |
| Capacidade de comercialização e logística da produção | 4. Ciclo do cultivar 5. Regiões produtoras e potenciais para produção 6. Capacidade de comercialização de produtos, co-produtos e uso eficiente dos recursos secundários |

Fonte: Elaboração própria

5.1.3 Aspectos e indicadores na dimensão ambiental

A literatura mostra que existem muitas preocupações ambientais associadas com os biocombustíveis como fontes de energia renováveis. Isso pela relevância que tomaram devido ao esperado benefício ambiental da redução das emissões de GEE na atmosfera quando comparados aos combustíveis derivados do petróleo, porém a produção sustentável do biocombustível envolve aspectos relacionados aos impactos sobre o uso da terra, sobre a qualidade do solo e sobre os

recursos hídricos (CORREIA, 2011). Aspectos considerados neste trabalho como se descreve a seguir.

Aspecto 5.1.7. *Potencial de Mitigação de GEE*

Indicador 5.1.7.1. *Fator de emissões de gCO_{2eq}/ MJ*

Como foi descrito na seção 2.3.4, quando o biodiesel substitui o diesel, está reduzindo significativamente tanto as emissões de GEE quanto outras substâncias nocivas à saúde humana no seu ciclo de vida. Melhores ou piores resultados irão depender da matéria-prima, da rota tecnológica de produção e do teor de mistura com o diesel fóssil (LUQUE, 2012).

Esse indicador busca medir a contribuição de cada candidata oleaginosa para reduzir as emissões de GEE durante todo o ciclo de vida na produção de biodiesel em unidades de gCO_{2eq}/MJ, comparando o fator de emissões das oleaginosas com o fator de emissões do diesel estabelecido em 86 gCO_{2eq}/MJ (MME, 2017b).

Aspecto 5.1.8. *Uso da terra*

Indicador 5.1.8.1. *Existência do zoneamento agroecológico (ZAE) ou agrícola de risco climático (ZARC)*

Atualmente, é impossível desligar a produção do biodiesel com a produção agrícola como foi visto no Capítulo 3 na seção 3.1 de matérias-primas tradicionais para sua fabricação. Por conseguinte, as atividades no campo devem evitar alterações drásticas sobre a exploração dos recursos naturais e ocupação de áreas impróprias. É importante considerar alternativas que podem ser produzidas sobre uma região que já tem certos estudos mostrando que essa atividade darão um impacto menor sobre a questão ambiental.

A seleção deste indicador é motivada pela importância que tem para os produtores agrícolas a existência do zoneamento agroecológico (ZAE) para certas oleaginosas. Este instrumento técnico-científico, construído a partir do conhecimento das potencialidades e vulnerabilidades ambientais de dada região, visa determinar o ordenamento do espaço da produção agrícola e orientar as políticas públicas e ao tomador de decisão do agronegócio por atividades de produção de forma sustentável (EMBRAPA, 2020). Sob a perspectiva ambiental do RenovaBio esse indicador tem alto impacto, já que para mitigar o risco de desmatamento, o ZAE é um dos critérios de elegibilidade da biomassa.

O Zoneamento agrícola de riscos climáticos (ZARC), por sua parte, orienta o produtor rural sobre a melhor época de plantio e semeadura das culturas, baseia-se na análise de variáveis como clima, solo e planta, visando reduzir perdas agrícolas. O ZARC também serve de apoio para a concessão de crédito de custeio agrícola e seguro, além da orientação aos produtores (SEMBRAE, 2007; EMBRAPA, 2020).

Aspecto 5.1.9. *Qualidade do solo*

Indicador 5.1.9.1. *Capacidade de proteção de solo conforme tipo de cultivar*

De acordo com ISGA (2010), Comin e Lovato (2014), os solos são a base literal dos cultivos para a produção de alimentos e biocombustíveis. A proteção do solo garante maior sustentabilidade ao sistema agrícola, estando relacionada com a estabilidade, a adaptabilidade e a manutenção da produtividade ao longo do tempo (DAPONTI, 2001).

O indicador visa mostrar qual tipo de cultivar apresenta uma melhor capacidade de proteção do solo, podendo ser perene ou anual. Para Souza (2015), culturas perenes ou semi perenes como matéria-prima para biocombustíveis oferecerem maior proteção do solo contendo a erosão, visto que não se realiza um preparo do solo intensivo e frequente como nas oleaginosas de tipo anual. Além disso, essas espécies incrementam o sequestro de carbono no solo, requerem menos aplicação de produtos químicos melhorando as condições do solo e da água.

As espécies perenes também podem ser usadas como estratégia de reflorestamento para aumentar a resistência do solo, uma vez que a quantidade de resíduos dessas espécies (palha, folhas, talos, raízes) é maior. Características que permitem a recomposição natural da vegetação, aumentam o teor de matéria orgânica do solo, causando menor impacto ao ambiente na degradação química e biológica do solo (ISGA, 2010).

Por outra parte, as culturas anuais usadas para bioenergia, como soja, colza e girassol, são cultivos que apresentam frequente remoção de biomassa e podem levar a um baixo teor de matéria orgânica do solo, perda de nutrientes e características físicas do solo pobres, sem falar na emissão de GEE (SOUZA, 2015).

Indicador 5.1.9.2. *Capacidade da cultura de atuar como planta de cobertura em rotação, sucessão ou em consórcio.*

O uso de plantas de cobertura, chamadas de adubos verdes, em rotação, sucessão ou em consórcio protege a camada superficial, bem como mantém e/ou melhora as propriedades

físicas, químicas e biológicas do solo (ISGA, 2010). Algumas oleaginosas anuais são desejáveis para essa função, além de ser usadas como culturas de tipo principal podem ser usadas como safrinha de cultivos mais intensivos por seus atributos como grande produção de massa seca, elevada taxa de crescimento e tolerâncias às condições climáticas extremas (frio e seco).

O indicador foi selecionado porque o cultivo consorciado e a rotação de culturas têm sido práticas de manutenção da qualidade do solo e de redução nos custos de adubação e de suprimentos de alimentos. Os cultivos consorciados das oleaginosas indicadas para o biodiesel auxiliam na superação de problemas de retorno econômico das culturas de ciclo longo, oscilações de preços e permitem a combinação da produção de alimentos, bioenergia e plantas para outros fins (SEMBRAE, 2007; SOUZA, 2015).

Aspecto 5.1.10. *Redução do consumo de água na produção da oleaginosa*

Indicador 5.1.10.1. *Pegada hídrica*

Um dos grandes impactos ambientais na produção de biodiesel é grande volume de água envolvido ao longo da sua cadeia produtiva. A pegada hídrica (PH) é um indicador para medir o impacto do consumo de água doce (volume) utilizada para a produção de bens e serviços no local onde foi efetivamente produzida (m^3/t). A pegada hídrica para culturas agrícolas inclui a somatória de três componentes: a PH verde, azul e cinza. A PH verde refere-se à água da chuva ou umidade do solo, representa o total de água que evaporou durante a produção (crescimento das culturas). A PH azul é constituída pelas águas superficiais e subterrâneas. Na agricultura inclui a evaporação da água de irrigação dos campos. O PH cinza refere-se ao volume de água necessário para diluir carga de poluentes a níveis aceitáveis. (GERBENS-LEENES; HOEKSTRA; MEER, 2009; SANDEFUR et al., 2017). Nesse cenário, são desejáveis matérias-primas que apresentem maior capacidade de adaptação à escassez hídrica ou otimizem o uso de água na produção para a geração de biodiesel, ou seja, culturas cujo índice de PH seja menor.

É de ressaltar que a PH deve ser analisada com relação ao contexto socioeconômico, geográfico e escala temporal (MEKONNEN; HOEKSTRA, 2011)

Na Tabela 5.3, são mostrados os aspectos e indicadores definidos sob a dimensão ambiental.

Tabela 5.3: Síntese geral dos aspectos e indicadores na dimensão ambiental para avaliar as matérias-primas

| Dimensão Ambiental | |
|--|--|
| Aspecto | Indicador |
| Potencial de mitigação de GEE | 1. Fator de emissão de $\text{gCO}_{2\text{eq}}/\text{MJ}$ |
| Uso da terra | 2. Existência do zoneamento agroecológico (ZAE) ou agrícola de risco climático (ZARC) |
| Qualidade do solo | 3. Capacidade de proteção de solo conforme tipo de cultivar 4. Capacidade da cultura de atuar como planta de cobertura em rotação, sucessão ou em consórcio |
| Redução do consumo de água na produção da oleaginosa | 5. Pegada hídrica parte agrícola |

Fonte: Elaboração própria.

5.2 Aplicação dos indicadores para avaliar as dez oleaginosas discutidas

Os dados para a construção das tabelas comparativas das oleaginosas do presente trabalho foram obtidos a partir do levantamento bibliográfico e sites da internet, nos quais se buscou informações a respeito de cada matéria-prima de origem vegetal e da cadeia de produção do biodiesel. Salienta-se que a soja foi incluída nos resultados com fins comparativos.

Cabe mencionar que para as culturas mais tradicionais na fabricação de biodiesel os dados são mais bem estabelecidos e consensuais, mas quando são revisadas culturas que ainda tem pouca expressão econômica no Brasil, tais como as promissoras cártamo, pinhão manso, macaúba e babaçu, as informações geram um grau de incerteza grande que podem terminar afetando o desempenho delas.

Em seguida se apresenta a aplicação de cada indicador às oleaginosas revisadas no Capítulo 3, na seção 3.3, de modo que é possível fazer um comparativo dos atributos de cada cultura nas três dimensões. Na Tabela 5.4 da dimensão técnica, os valores dos quatro primeiros indicadores foram encontrados no CSOB/MAPA (2019) para o ano de 2018. A produtividade esperada do óleo para o pinhão manso e para o babaçu apresentam certo grau de incerteza e foi

utilizado o de Laviola e Rodrigues (2019) e CadernosNAE (2005).

Na Tabela 5.5 da dimensão econômica, os preços das oleaginosas e dos óleos vegetais que já tem uma vida comercial mais conhecidas no Brasil foram encontrados na CONAB (2020), IBGE (2018) e ABIOVE (2020), enquanto para as oleaginosas que não são usuais como o cártamo e o pinhão manso, usou-se fontes com maior grau de insegurança.

Finalmente na Tabela 5.6 da dimensão ambiental, os dados do fator de emissões e da pegada hídrica foram encontrados em diferentes pesquisas. As informações usadas para o cálculo das emissões de GEE compilam as etapas agrícola, de extração, produção e distribuição do biocombustível nos estudos de ACV para matérias-primas utilizadas no biodiesel como foi apresentado na seção 4.3.2, porém não existe uma uniformização das abordagens. Para a macaúba esse dado só apresenta a análise da parte agrícola, enquanto para o babaçu não foi encontrada a informação.

No caso da pegada hídrica a maioria dos dados são obtidos de uma média global para a fase agrícola de diferentes oleaginosas, no entanto, existe problema de heterogeneidade no tratamento dessas informações. Nesta avaliação esses indicadores são suscetíveis a certa variabilidade e isso pode afetar o desempenho da avaliação das oleaginosas.

Tabela 5.4: Indicadores técnicos aplicados as dez matérias-primas em discussão

| Indicadores | Unidades | Soja | Algodão | Girassol | Canola | Amendoim | Mamona | Cártamo | Pinhão Manso | Palma de óleo | Macaúba | Babaçu |
|--|----------|------|---------|----------|--------|----------|--------|---------|-------------------|------------------|---------|------------------|
| 1. Produtividade esperada do óleo ^a | kg/ha | 600 | 500 | 680 | 1000 | 1500 | 1000 | 1750 | 1500 ^b | 4000-6000 | 4000 | 600 ^c |
| 2. Nível de domínio tecnológico agrícola ^a | | 10 | 10 | 8 | 6 | 7 | 6 | 5 | 5 | 7 | 3 | 3 |
| 3. Nível de domínio tecnológico industrial ^a | | 10 | 10 | 10 | 10 | 9 | 7 | 5 | 5 | 8 | 4 | 3 |
| 4. Existência de apoio técnico por entidades de PD&I para a produção do biodiesel ^a | | Sim | Não | Sim | Sim | Não | Não | Sim | Não | Sim | Sim | Não |
| 5. Perfil de ácidos graxos | sat % | 14 | 29 | 8 | 8 | 14 | 3 | 7 | 19 | 47 | 27 | 79 |
| | mono % | 24 | 18 | 29 | 29 | 58 | 91 | 19 | 43 | 42 | 64 | 18 |
| | poli% | 62 | 53 | 62 | 35 | 28 | 6 | 74 | 38 | 11 | 10 | 4 |
| 6. Atende especificação do biodiesel ANP | | Sim | Sim | Sim | Sim | Sim | Não | Sim | Sim | Sim | Sim | Sim |

^a CSOB/MAPA (2019).

^b Laviola e Rodrigues (2019).

^c CadernosNAE (2005).

Tabela 5.5: Indicadores econômicos aplicados as dez matérias-primas em discussão

| Indicadores | Unidades | Soja | Algodão | Girassol | Canola | Amendoim | Mamona | Cártamo | Pinhão Manso | Palma de óleo | Macaúba | Babaçu |
|---|---|--|--|---|---|---|---|--|--|--|---|--|
| 1. Preço da oleaginosa ^a | \$R/t | 1127 | 2067 (caroço) | 1167 | 1185 | 1569 | 2407 | 404 ^b | 500 ^c | 256 ^d (fruto) | 570 (fruto) | 3040 (amêndoa) |
| 2. Preço do óleo ^e | \$R/m ³ | 2410 ^f | 2443 | 4000 | 2840 | 4917 | 6800 | 3505 ^b | 2300 ^c | 2177 | 3850 | 5250 |
| 3. Existe concorrência com a produção alimentar | Sim | Sim | Sim | Sim | Sim | Sim | Não | Sim | Não | Sim | Não | Não |
| 4. Regiões produtoras e potenciais para produção ^e | regiões | N, NE, CO, SE, S | NE, CO, SE | N, NE, CO, SE, S | CO, SE, S | NE, CO, SE, S | NE, CO, NE, CO, S | NE, CO | N, NE, CO, SE | N | N, NE, CO, SE | N, NE, CO |
| 5. Ciclo do cultivar ^g | (dias) | 120-180 | 120-180 | 90-140 | 110-130 | 90-120 | 180 | 110-160 | 3 - 20 | 3 - 35 | 5 - 35 | 8 - 35 |
| 6. Capacidade de comercialização de produtos, coprodutos e uso eficiente dos recursos secundários | <i>grão</i> co- <i>me</i> stível, <i>farelo</i> proteico para ração animal, <i>óleo</i> com aplicação nos setores alimentício em lubrificantes, biodiesel | <i>fibra</i> têxtil, <i>caroço</i> in natura alimentaria, <i>óleo</i> para alimentação animal, <i>farelo</i> animal, <i>caroço</i> animal, <i>óleo</i> para alimentação humana, <i>farelo</i> animal, <i>caroço</i> animal | <i>óleo</i> co- <i>me</i> stível, biodiesel <i>farelo</i> - <i>caroço</i> , <i>torta</i> - <i>caroço</i> animal, <i>óleo</i> para alimentação humana, <i>farelo</i> - <i>caroço</i> animal, <i>caroço</i> animal | <i>óleo</i> co- <i>me</i> stível, biodiesel <i>farelo</i> - <i>caroço</i> , <i>torta</i> - <i>caroço</i> animal, <i>caroço</i> animal, <i>caroço</i> animal | <i>óleo</i> co- <i>me</i> stível, iluminação, uso industrial, cosmético, biodiesel, <i>torta</i> ração animal, <i>caroço</i> animal, <i>caroço</i> animal | <i>óleo</i> co- <i>me</i> stível, iluminação, uso industrial, cosmético, biodiesel, <i>torta</i> ração animal, <i>caroço</i> animal, <i>caroço</i> animal | <i>óleo</i> de rícino é usado na indústria química: para tintas, vernizes, lubrificantes e uso cosmético, <i>torta</i> - ração animal | <i>óleo</i> para farmácia, cosméticos, biodiesel, <i>caroço</i> animal, <i>caroço</i> animal, <i>caroço</i> animal | <i>óleo</i> para cozinha e biodiesel, <i>caroço</i> animal, <i>caroço</i> animal, <i>caroço</i> animal | <i>óleo</i> comestível, <i>caroço</i> animal, <i>caroço</i> animal, <i>caroço</i> animal | <i>óleo</i> para fabricação de cosméticos e uso químico, <i>caroço</i> animal, <i>caroço</i> animal, <i>caroço</i> animal | <i>óleo</i> comestível, <i>caroço</i> animal, <i>caroço</i> animal, <i>caroço</i> animal |

^a CONAB (2020).

^b TRIDGE (2020).

^c Laviola e Rodrigues (2019).

^d CSOB/MAPA (2019).

^e IBGE (2018).

^f ABIOVE (2020).

^g Nas espécies perenes o limite inferior do ciclo indica o ano da primeira colheita e o limite superior indica o ano ao que pode chegar.

Tabela 5.6: Indicadores ambientais aplicados as dez matérias-primas em discussão

| Indicadores | Unidades | Soja | Algodão | Girassol | Canola | Amendoim | Mamona | Cártamo | Pinhão Manso | Palma de óleo | Macaúba | Babaçu |
|--|------------------------|-------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 1. Fator de emissão | gCO _{2eq} /MJ | 23,1 -25,8 ^a | 36,5 ^b | 58,9 ^c | 47,9 ^d | 53,4 ^e | 85,0 ^f | 20,5 ^g | 24,7 ^d | 22,3 ^f | 4,1 ^h | ND* |
| 2. Existência do zoneamento agroecológico ou agrícola de risco climático | | Sim | Sim | Sim | Sim, parcial | Sim | Sim | Não | Não | Sim | Não | Não |
| 3. Capacidade de proteção de Solo conforme tipo de cultivar | | Anual | Anual | Anual | Anual | Anual | Anual | Anual | Perene | Perene | Perene | Perene |
| 4. Capacidade da cultura de atuar como planta de cobertura em rotação, sucessão ou em consórcio. | | Principal | Principal e safrinha e sucessão | Principal e safrinha e sucessão | Safrinha e sucessão | Principal e sucessão | Principal e sucessão | Principal e sucessão | Principal e safrinha e sucessão | Principal e sucessão | Principal e sucessão | Principal e sucessão |
| 5. Pegada hídrica parte agrícola ⁱ | m ³ /t | 2145 | 4029 | 6792 | 2271 | 4381 ^j | 9896 | 7221 | 9001 ^k | 1098 | ND* | ND* |

^a Cerri et al. (2017) Para sistema integrado e não integrado de produção

^b EPA (2015).

^c Iriarte e Villalobos (2013).

^d Uusitalo et al. (2014).

^e Schmidt (2015).

^f Souza, Seabra e Nogueira (2017).

^g Liu e Benson (2011).

^h Fernández-Coppel et al. (2018).

ⁱ Mekonnen e Hoekstra (2011) Média global.

^j Sandefur et al. (2017) Média global.

^k Jongschaap et al. (2009).

* ND: Não Disponível.

5.3 Sistema de pontuação

Para a avaliação dos indicadores foi definido um sistema de pontuação, onde será atribuída uma nota de 1 a 4, segundo o valor ou estado da variável relacionada de cada matéria-prima conforme a tabela 5.7. Cabe ressaltar que a literatura foi consultada para o estabelecimento das notas.

Tabela 5.7: Pontuação para os indicadores

| Pontos | Nota |
|--------|-------------|
| 4 | Excelente |
| 3 | Boa |
| 2 | Baixa |
| 1 | Muito baixa |

Para alguns dos indicadores, precisou-se designar intervalos de pontos usando o diagrama de extremos e quartis (DEQ), tipo particular de representação estatística de dados, que divide um conjunto de elementos ordenados em quatro partes iguais (25%), utilizadas para a tomada de decisão. A construção dos DEQs está disposta no Apêndice A.

Os valores das variáveis relacionadas aos indicadores contidos entre cada quartil (Q1, Q2 e Q3), receberam notas entre 1 e 4 permitindo a avaliação da matéria-prima conforme se detalha nas Tabelas 5.8 , 5.9 e 5.10 para cada dimensão.

Tabela 5.8: Sistema de pontuação dos indicadores na dimensão técnica

| Indicador | Variável relacionada ao indicador | Pontuação |
|--|---|-----------|
| Máxima pontuação | | 24 |
| Desenvolvimento agrícola | | |
| 1. Produtividade esperada do óleo (PO) (kg/ha) | $PO \leq Q1$ | 1 |
| | $Q1 < PO \leq Q2$ | 2 |
| | $Q2 < PO \leq Q3$ | 3 |
| | $PO > Q3$ | 4 |
| 2. Nível de domínio tecnológico agrícola (NTA) | $NTA \leq Q1$ | 1 |
| | $Q1 < NTA \leq Q2$ | 2 |
| | $Q2 < NTA \leq Q3$ | 3 |
| | $NTA > Q3$ | 4 |
| Desenvolvimento industrial | | |
| 3. Nível de domínio tecnológico industrial (NTI) | $NTI \leq Q1$ | 1 |
| | $Q1 < NTI \leq Q2$ | 2 |
| | $Q2 < NTI \leq Q3$ | 3 |
| | $NTI > Q3$ | 4 |
| 4. Existência de apoio técnico por entidades de PD&I para a produção do biodiesel | Sim | 4 |
| | Não | 1 |
| Qualidade do biodiesel | | |
| 5. Perfil de ácido graxo favorável (%) * | $sat \leq Q1$ e $mono \leq Q1$ e $poli > Q3$ | 1 |
| | $Q1 < sat \leq Q2$ e $Q1 < mono \leq Q2$ e $Q2 < poli \leq Q3$ | 2 |
| | $Q2 < sat \leq Q3$ e $Q2 < mono \leq Q3$ e $Q1 < poli \leq Q2$ | 3 |
| | $sat > Q3$ e $mono > Q3$ e $poli \leq Q3$ | 4 |
| 6. Cumpre com a especificação de biodiesel da ANP | Sim | 4 |
| | Não | 1 |

Fonte: Elaboração própria

* *sat*=saturados, *mono*=monoinsaturados, *poli*=poli-insaturados

Tabela 5.9: Sistema de pontuação dos indicadores na dimensão econômica

| Indicador | Variável relacionada ao indicador | Pontuação |
|---|---|-----------|
| Máxima pontuação | | 24 |
| Precificação do mercado | | |
| 1. Preço da oleaginosa (PRCO) (\$R/t) | $PRCO \leq Q1$ | 4 |
| | $Q1 < PRCO \leq Q2$ | 3 |
| | $Q2 < PRCO \leq Q3$ | 2 |
| | $PRCO > Q3$ | 1 |
| 2. Preço do óleo vegetal (PRCOV) (\$R/t) | $PRCOV \leq Q1$ | 4 |
| | $Q1 < PRCOV \leq Q2$ | 3 |
| | $Q2 < PRCOV \leq Q3$ | 2 |
| | $PRCOV > Q3$ | 1 |
| Segurança alimentar | | |
| 3. Existe concorrência com a produção alimentar | Óleo e grão compete com alimento | 1 |
| | Óleo compete com alimento | 2 |
| | Não compete com alimento nem o óleo nem o grão | 4 |
| Capacidade de comercialização e logística da produção | | |
| 4. Ciclo de cultivar da oleaginosa Espécies anuais (CCA) (dias) | $CCA \leq Q1$ | 4 |
| | $Q1 < CCA \leq Q2$ | 3 |
| | $Q2 < CCA \leq Q3$ | 2 |
| | $CCA > Q3$ | 1 |
| Espécies perenes (CCP) (anos) | Ano colheita final - ano colheita inicial $\leq Q1$ | 1 |
| | $Q1 < \text{Colheita final} - \text{colheita inicial} \leq Q2$ | 2 |
| | $Q2 < \text{Ano colheita final} - \text{ano colheita inicial} \leq Q3$ | 3 |
| | Ano colheita final - ano colheita inicial $> Q3$ | 4 |
| 5. Regiões produtoras e potenciais para produção (RP) | $RP \leq Q1$ | 1 |
| | $Q1 < RP \leq Q2$ | 2 |
| | $Q2 < RP \leq Q3$ | 3 |
| | $RP > Q3$ | 4 |
| 6. Capacidade de comercialização de produtos, coprodutos e uso eficiente dos recursos secundários | Torta ou farelo não é usada com fins alimentares e os resíduos agrícolas não tem fins energéticos | 1 |
| | Torta ou farelo é usada para adubação | 2 |
| | Torta ou farelo é usada com fins alimentares | 3 |
| | Torta ou farelo é usada com fins alimentares e resíduos agrícolas para fins energéticos | 4 |

Fonte: Elaboração própria

Tabela 5.10: Sistema de pontuação dos indicadores na dimensão ambiental

| Indicador | Variável relacionada ao indicador | Pontuação |
|--|--|-----------|
| Máxima pontuação | | 20 |
| Potencial de mitigação de GEE | | |
| 1. Fator de emissão (FE) (gCO _{2eq} /MJ) | $FE \leq Q1$ | 4 |
| | $Q1 < FE \leq Q2$ | 3 |
| | $Q2 < FE \leq Q3$ | 2 |
| | $FE > Q3$ | 1 |
| Uso da terra | | |
| 2. Existência de zoneamento agroecológico (ZAE) ou agrícola de risco climático (ZARC) | ZAE | 4 |
| | ZARC | 3 |
| | ZARC, parcial | 2 |
| | Não | 1 |
| Qualidade do solo | | |
| 3. Capacidade de proteção do solo conforme tipo de cultivar | Tipo de cultivar perene | 4 |
| | Tipo de cultivar anual | 1 |
| 4. Capacidade da cultura de atuar como planta de cobertura em rotação, sucessão ou em consórcio. | Cultivar de uso principal e/ou safrinha usado como cobertura e adubo vegetal | 4 |
| | Cultivar de tipo safrinha, usada como planta de cobertura e adubo vegetal | 3 |
| | Cultivar de uso principal, não de safrinha e potencial de adubo vegetal | 2 |
| | Cultivar só de uso principal e consórcio | 1 |
| Redução do consumo de água na produção da oleaginosa | | |
| 5. Pegada hídrica parte agrícola (PH) (m ³ /t) | $PH \leq Q1$ | 4 |
| | $Q1 < PH \leq Q2$ | 3 |
| | $Q2 < PH \leq Q3$ | 2 |
| | $PH > Q3$ | 1 |

Fonte: Elaboração própria

5.4 Caracterização dos tomadores de decisão

Segundo Bellen (2004) e Souza (2015), quando são considerados indicadores econômicos, sociais, ambientais e técnicos, a relevância de cada indicador é estabelecida de acordo com a visão do tomador de decisão.

Neste trabalho, os tomadores de decisão são os diferentes agentes econômicos definidos pelo grau de verticalização das usinas produtoras de biodiesel como foi visto na seção 2.2 e sob a visão dos gestores de políticas públicas que buscam estimular a diversificação das matérias-primas para o biodiesel e inseri-las no programa RenovaBio, por exemplo, cujo interesse é gerenciar os riscos da insegurança energética, alimentar e mudanças climáticas.

A seguir apresenta-se algumas características dos agentes econômicos com o objetivo de entender seus interesses e tentar refletir nesta análise sua posição na hora da escolha da melhor alternativa para a diversificação das matérias-primas na cadeia de produção do biodiesel.

Tabela 5.11: Características dos agentes econômicos

| Agente econômico | Usina integrada | Usina parcialmente integrada | Usina não integrada |
|------------------------------------|--|------------------------------------|---------------------|
| Atividade econômica | Plantio Esmagamento Transformação | Esmagamento Transformação | Transformação |
| Produção | Grão Óleo vegetal Biodiesel | Óleo vegetal Biodiesel | Biodiesel |
| Coprodutos | Glicerina/glicerol Torta/farelo Casca, fibras, folhas | Glicerina/glicerol Torta/farelo | Glicerina/glicerol |
| Adquirem oleaginosa (grão/amêndoa) | Preço de custo | Preço do mercado | Não adquirem |
| Adquirem óleo vegetal | Preço de custo | Preço de custo | Preço de mercado |
| Competitividade nos leilões | Alta | Média | Baixa |
| Ganhos na renda | 25% acima da base | 15% acima da base | Base |

Fonte: Elaboração própria a partir de Biodieselbr (2007)

Resultados

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos da metodologia desenvolvida e detalhada no capítulo anterior. Os resultados são apresentados por dimensão, considerando cinco cenários: um cenário base considerando que os indicadores têm a mesma importância e quatro cenários de atribuição de pesos, com o intuito de mostrar como os indicadores podem sinalizar aspectos relevantes na observação das oleaginosas, conforme a interpretação do tipo de agente econômico. Obteve-se em cada cenário uma classificação das matérias-primas oleaginosas que são mais viáveis tanto na dimensão técnica, quanto econômica e ambiental para a produção de biodiesel.

6.1 Cenário base - Avaliação das matérias-primas onde os indicadores têm a mesma importância

Em um primeiro cenário foram avaliadas as dez oleaginosas de acordo com o sistema de pontuação estabelecido para cada dimensão, considera-se que todos os indicadores tem a mesma importância. Os resultados obtidos foram normalizados e são apresentados nas subseções a seguir.

6.1.1 Avaliação na dimensão técnica

Na dimensão técnica foram definidos 6 indicadores pontuados conforme a Tabela 6.1. Observa-se na Tabela 6.2, que as matérias-primas não convencionais melhor pontuadas nessa dimensão para ser utilizadas na produção de biodiesel são a palma de óleo com 21 pontos,

o girassol com 20 pontos e a canola com 18 de 24 pontos. Enquanto as oleaginosas com a pontuação mais baixa foram a mamona e o babaçu empatadas com 9 pontos.

Tabela 6.1: Cenário base - Sistema de pontuação dos indicadores na dimensão técnica

| Indicador | Variável relacionada ao indicador | Pontuação |
|--|---|-----------|
| Máxima pontuação | | 24 |
| Desenvolvimento agrícola | | |
| 1. Produtividade esperada do óleo (PO) (kg/ha) | $PO \leq 600$ | 1 |
| | $600 < PO \leq 1000$ | 2 |
| | $1000 < PO \leq 1750$ | 3 |
| | $PO > 1750$ | 4 |
| 2. Nível de domínio tecnológico agrícola (NTA) | $NTA \leq 5$ | 1 |
| | $5 < NTA \leq 6$ | 2 |
| | $6 < NTA \leq 8$ | 3 |
| | $NTA > 8$ | 4 |
| Desenvolvimento industrial | | |
| 3. Nível de domínio tecnológico industrial (NTI) | $NTI \leq 5$ | 1 |
| | $5 < NTI \leq 8$ | 2 |
| | $8 < NTI \leq 10$ | 3 |
| | $NTI > 10$ | 4 |
| 4. Existência de apoio técnico por entidades de PD&I para a produção do biodiesel | Sim | 4 |
| | Não | 1 |
| Qualidade do biodiesel | | |
| 5. Perfil de ácido graxo favorável (%) | $sat \leq 14$ e $mono \leq 22$ e $poli > 57$ | 1 |
| | $14 < sat \leq 28$ e $22 < mono \leq 42$ e $35 < poli \leq 57$ | 2 |
| | $28 < sat \leq 79$ e $42 < mono \leq 57$ e $10 < poli \leq 35$ | 3 |
| | $sat > 79$ e $mono > 57$ e $poli \leq 10$ | 4 |
| | | |
| 6. Cumpre com a especificação de biodiesel da ANP | Sim | 4 |
| | Não | 1 |

Fonte: Elaboração própria

Tabela 6.2: Cenário base- Pontuação dimensão técnica

| Indicador | Soja | Algodão | Girassol | Canola | Amendoim | Mamona | Cártamo | Pinhão Manso | Palma de óleo | Macaúba | Babaçu | Máxima Pontuação |
|---|------|---------|----------|--------|----------|--------|---------|-----------------|------------------|---------|--------|---------------------|
| 1. Produtividade esperada do óleo (kg de óleo/ha) | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 | 1 | 4 |
| 2. Nível de domínio tecnológico agrícola | 4 | 4 | 3 | 2 | 3 | 2 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 4 |
| 3. Nível de domínio tecnológico industrial | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 2 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 4 |
| 4. Existência de apoio técnico por entidades de PD&I para a produção do biodiesel | 1 | 1 | 4 | 4 | 1 | 1 | 4 | 1 | 4 | 4 | 1 | 4 |
| 5. Perfil de ácido graxo favorável | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | 1 | 1 | 4 | 3 | 3 | 1 | 4 |
| 6. Cumpre com a especificação de biodiesel da ANP | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Total Absoluto | 17 | 17 | 20 | 18 | 17 | 9 | 14 | 14 | 21 | 17 | 9 | 24 |
| Total Normalizado | 0,71 | 0,71 | 0,83 | 0,75 | 0,71 | 0,38 | 0,58 | 0,58 | 0,88 | 0,71 | 0,38 | |

Fonte: Elaboração própria

Para obter uma avaliação das dez oleaginosas selecionadas utilizou-se os gráficos tipo radar. Com esses gráficos é possível visualizar a situação do conjunto dos indicadores em nível micro, identificando as forças e fraquezas das dez oleaginosas, fazendo uma comparação simples entre elas, além da soja. Quanto mais distante do centro do radar a pontuação estiver significa que as matérias-primas estão mais próximas a um melhor desempenho (nota 4) em direção á sustentabilidade.

Na Figura 6.1, apresenta-se em ordem de maior a menor as culturas objeto de estudo, conforme a pontuação recebida na dimensão técnica (Tabela 6.2). Observa-se, que a palma de óleo obteve no geral excelente e boa pontuação nos indicadores avaliados, destacando por sua alta produtividade; porque é priorizada pela agenda de inovação de matéria-prima para o biodiesel e porque cumpre com as especificações da ANP.

O girassol alcançou excelente pontuação nos indicadores (3, 4 e 6), o grau de aperfeiçoamento tecnológico para a transformação industrial dessa oleaginosas no país é alto, faz parte da priorização em PD&I e o seu óleo produzido cumpre com as especificações da ANP para o biodiesel.

A canola, se apresenta como uma fonte com excelente resultado para o indicador (3, 4 e 6), dado que é uma fonte tradicional para a produção do biodiesel mundial, com um alto nível de desenvolvimento tecnológico na indústria, é uma alternativa muito interessante para a região sul pelo que é priorizada na Agenda de inovação das oleaginosas e cumpre com as especificações da ANP.

O algodão recebeu excelente pontuação nos indicadores (2, 3 e 6), já que é uma matéria-prima com ampla produção existente no país, devido a seu principal mercado, a indústria têxtil baseada na fibra do algodão. Porém tem uma produtividade de óleo muito baixa e não tem apoio da CSOB no PD&I para produção do biodiesel nesse momento (indicadores 1, 4).

O amendoim, em média tem boa nota para todos seus indicadores, dado que é uma cultura com ampla produção e desenvolvimento no país, no entanto, atualmente essa espécie não é alvo de PD&I para produção do biodiesel pela CSOB recebendo nota muito baixa nesse indicador (indicador 4).

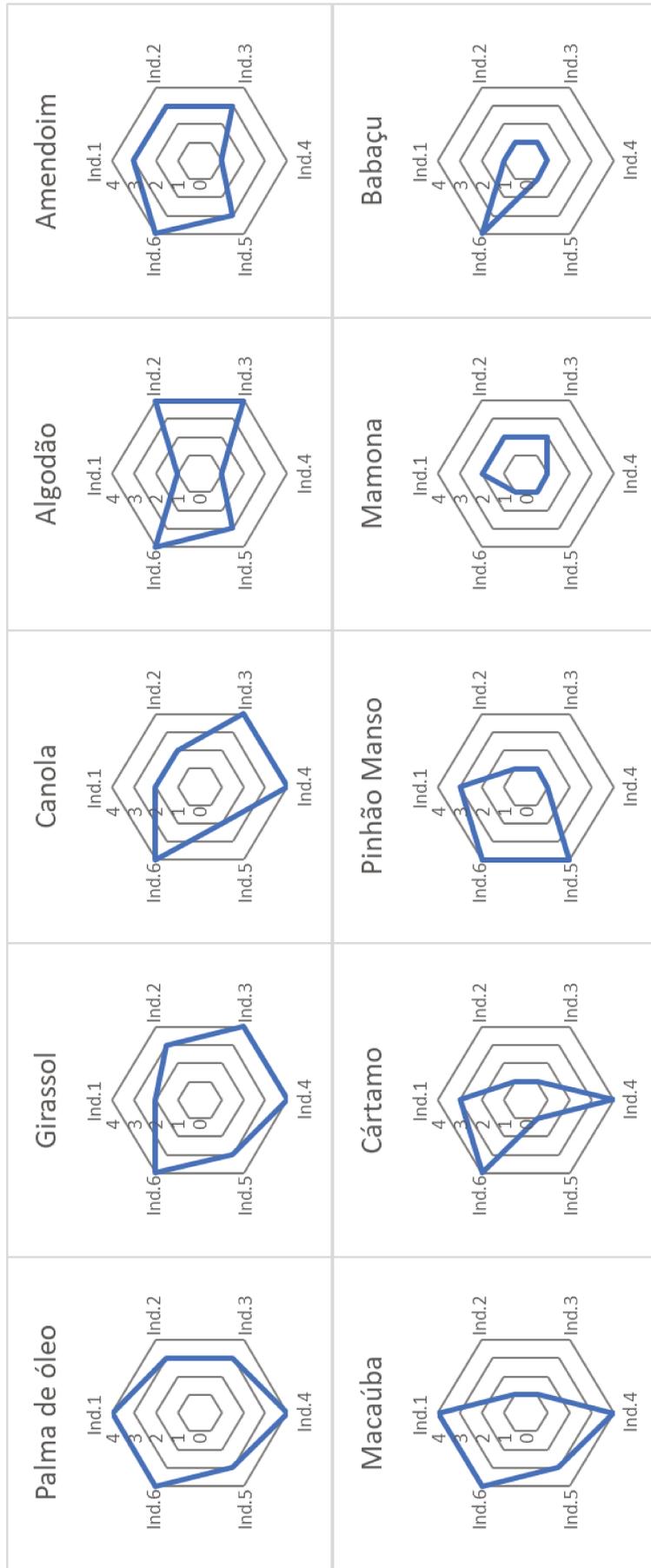
A macaúba merece destaque, já que é uma oleaginosa promissória que ainda está em desenvolvimento, colocando-se nos primeiros lugares desta avaliação devido a sua excelente pontuação nos indicadores (1, 4 e 6). Ressalta sua alta produtividade de óleo sendo comparável com

a palma de óleo. Neste momento existem muitos trabalhos de pesquisa detrás dessa oleaginosa, o que deixa perceber o grande potencial da macaúba para a produção do biodiesel.

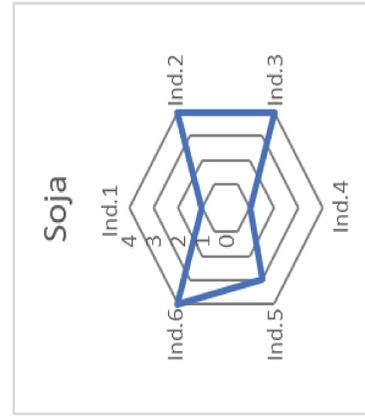
O cártamo é uma fonte que está sendo considerada na agenda de inovação da CSOB para o semiárido brasileiro e o biodiesel dessa fonte cumpre com as especificações da ANP (indicadores 4 e 6), no entanto, a média para o resto de indicadores ficou abaixo ou próxima da nota 2, não apresenta boa produtividade e seu perfil de ácidos graxos é o menos desejável entre suas concorrentes, exibindo que é uma cultura pouco viável nesta dimensão para ser inserida na produção do biodiesel.

O pinhão manso obteve melhor pontuação nos indicadores (1, 5, e 6), destacando a produtividade de óleo, e do perfil graxo do óleo dessa fonte. Apesar disso, os indicadores restantes receberam notas muito baixas, o que mostra que essa oleaginosa tem mais fraquezas nesta dimensão.

Finalmente, a menor pontuação foi para a mamona e o babaçu, culturas cujas notas estão mais próximos do centro do gráfico (nota 1). Por conseguinte, considera-se que são as alternativas menos viáveis na avaliação da dimensão técnica para ser inseridas na cadeia produtiva do biodiesel, particularmente a mamona, única fonte que obteve pontuação muito baixa no (indicador 6) colocando seu óleo fora dos limites permitidos pela especificação de qualidade de biodiesel da ANP. Porém, considerou-se na avaliação que este óleo pode ser misturado ao óleo de outras matérias-primas para a fabricação do biodiesel.



(a) Avaliação das dez oleaginosas de uso não convencional



(b) Soja como fonte de comparação

Figura 6.1: Resultados da avaliação das oleaginosas no cenário base por meio dos indicadores técnicos

6.1.2 Avaliação na dimensão econômica

Na dimensão econômica foram definidos 6 indicadores e pontuados segundo o sistema de pontuação da Tabela 6.3. Na Tabela 6.4 mostra-se os resultados das notas recebidas por todas as oleaginosas, sendo as melhor pontuadas a palma de óleo com 19 pontos, o girassol e a macaúba empatadas com 17 de um total de 24 pontos. Por outra parte as oleaginosas com a pontuação mais baixa foram o amendoim, a mamona e o cártamo empatadas com 12 pontos.

Tabela 6.3: Cenário base - Sistema de pontuação dos indicadores na dimensão econômica

| Indicador | Variável relacionada ao indicador | Pontuação |
|---|---|-----------|
| Máxima pontuação | | 24 |
| Precificação do mercado | | |
| 1. Preço da oleaginosa (PRCO) (\$R/t) | $PRCO \leq 500$ | 4 |
| | $500 < PRCO \leq 1167$ | 3 |
| | $1167 < PRCO \leq 2067$ | 2 |
| | $PRCO > 2067$ | 1 |
| 2. Preço do óleo vegetal (PRCOV) (\$R/t) | $PRCOV \leq 2427$ | 4 |
| | $2427 < PRCOV \leq 3505$ | 3 |
| | $3505 < PRCOV \leq 4459$ | 2 |
| | $PRCOV > 4459$ | 1 |
| Segurança Alimentar | | |
| 3. Existe concorrência com a produção alimentar | Óleo e grão compete com alimento | 1 |
| | Óleo compete com alimento | 2 |
| | Não compete com alimento nem o óleo nem o grão | 4 |
| | | |
| Capacidade de comercialização e logística da produção | | |
| 4. Ciclo de cultivar da oleaginosa Espécies anuais (CCA) (dias) | $CCA \leq 115$ | 4 |
| | $115 < CCA \leq 135$ | 3 |
| | $135 < CCA \leq 150$ | 2 |
| | $CCA > 150$ | 1 |
| Espécies perenes (CCP) (anos) | Ano colheita final - ano colheita inicial $\leq 19,5$ | 1 |
| | $19,5 < \text{Colheita final} - \text{colheita inicial} \leq 28,5$ | 2 |
| | $28,5 < \text{Ano colheita final} - \text{ano colheita inicial} \leq 31,5$ | 3 |
| | Ano colheita final - ano colheita inicial $> 31,5$ | 4 |
| 5. Regiões produtoras e potenciais para produção (RP) | $RP \leq 1$ | 1 |
| | $1 < RP \leq 2$ | 2 |
| | $2 < RP \leq 4$ | 3 |
| | $RP > 4$ | 4 |
| 6. Capacidade de comercialização de produtos, coprodutos e uso eficiente dos recursos secundários | Torta ou farelo não é usada com fins alimentares e os resíduos agrícolas não tem fins energéticos | 1 |
| | Torta ou farelo é usada para adubação | 2 |
| | Torta ou farelo é usada com fins alimentares | 3 |
| | Torta ou farelo é usada com fins alimentares e resíduos agrícolas para fins energéticos | 4 |

Fonte: Elaboração própria

Tabela 6.4: Cenário base - Pontuação dimensão econômica

| Indicador | Soja | Algodão | Girassol | Canola | Amendoim | Mamona | Cártamo | Pinhão Manso | Palma de óleo | Macaúba | Babaçu | Máxima Pontuação |
|---|------|---------|----------|--------|----------|--------|---------|-----------------|------------------|---------|--------|---------------------|
| 1. Preço da oleaginosa (\$R/t) | 3 | 2 | 3 | 2 | 2 | 1 | 3 | 3 | 4 | 3 | 1 | 4 |
| 2. Preço do óleo vegetal (\$R/m3) | 4 | 3 | 2 | 3 | 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 2 | 1 | 4 |
| 3. Existe concorrência com a produção alimentar | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 4 | 2 | 4 | 2 | 4 | 4 | 4 |
| 4. Ciclo do cultivar | 2 | 2 | 4 | 3 | 4 | 1 | 3 | 1 | 4 | 3 | 2 | 4 |
| 5.Regões Potenciais para a produção | 4 | 2 | 4 | 2 | 3 | 2 | 1 | 3 | 1 | 3 | 2 | 4 |
| 6. Capacidade de comercialização de produtos, coprodutos e uso eficiente dos recursos secundários | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 4 | 2 | 3 | 4 |
| Total Absoluto | 15 | 13 | 17 | 13 | 12 | 12 | 12 | 15 | 19 | 17 | 13 | 24 |
| Total Normalizado | 0,63 | 0,54 | 0,71 | 0,54 | 0,50 | 0,50 | 0,50 | 0,63 | 0,79 | 0,71 | 0,54 | |

Fonte: Elaboração própria

Na Figura 6.2, apresenta-se os diagramas tipo radar das dez oleaginosas, conforme a pontuação recebida nessa dimensão (Tabela 6.4).

Observa-se que a palma de óleo obteve excelente pontuação nos indicadores (1, 2, 4 e 6), os dois primeiros inseridos no aspecto de precificação do mercado, uma vez que o preço da oleaginosa e do óleo dessa fonte são bem competitivos para ser inserida na cadeia produtiva do biodiesel. O ciclo de cultivar dessa espécie perene é prolongado e sua primeira colheita começa aos 3 anos, porém é tipicamente mais produtiva podendo chegar até os 35 anos (17 anos de colheita) o que deu uma excelente pontuação para o indicador 4 quando comparado entre as culturas perenes. Além disso, a palmácea tem um grande potencial para produzir e comercializar uma variedade de produtos e coprodutos, fazendo uso eficiente dos seus recursos secundários (torta, cachos, cascas, fibras e efluentes).

Nessa avaliação o girassol destaca pela pontuação nos indicadores (1, 4 e 5), visto que o preço do caroço da oleaginosa utilizado para gerar óleo é bom, entre as espécies anuais possui um ciclo de cultivar curto desejável e é das poucas espécies avaliadas que podem se desenvolver em todas as regiões do país. Entretanto, os indicadores de baixo desempenho são o preço do óleo (indicador 2), devido ao fato que é amplamente destinado ao setor alimentar e tem um preço alto em função de seu excelente valor nutricional o que coloca essa espécie em desvantagem.

A macaúba alcançou boa pontuação nos indicadores (1, 3, 4 e 5). Ainda quando a exploração da espécie é efetuada de forma extrativista, o preço da oleaginosa é baixo. Por outro lado, o óleo dessa espécie não é comestível e não compete com a produção alimentar na geração do biodiesel, o que é desejável. Também tem potencial para se desenvolver em quase todo o território brasileiro e permite fazer uso integral dos seus recursos secundários como fonte de cogeração de energia, ou produtos de alto valor agregado. Devido a isso é uma alternativa com bom desempenho nesta dimensão.

O pinhão manso é uma cultura que obteve bom desempenho nos indicadores (1,2,3 e 5), mesmo sendo uma cultura cujos dados apresentam um alto grau de incerteza devido à não existência de produção comercial ainda no Brasil. A oleaginosa tem um preço baixo no mercado, não é comestível e tem potencial para se desenvolver em quase todas as regiões do país.

O algodão em geral obteve uma pontuação baixa em todos os indicadores ao contrário do indicador 2. O óleo vegetal dessa espécie apresenta um preço competitivo para a produção de biodiesel.

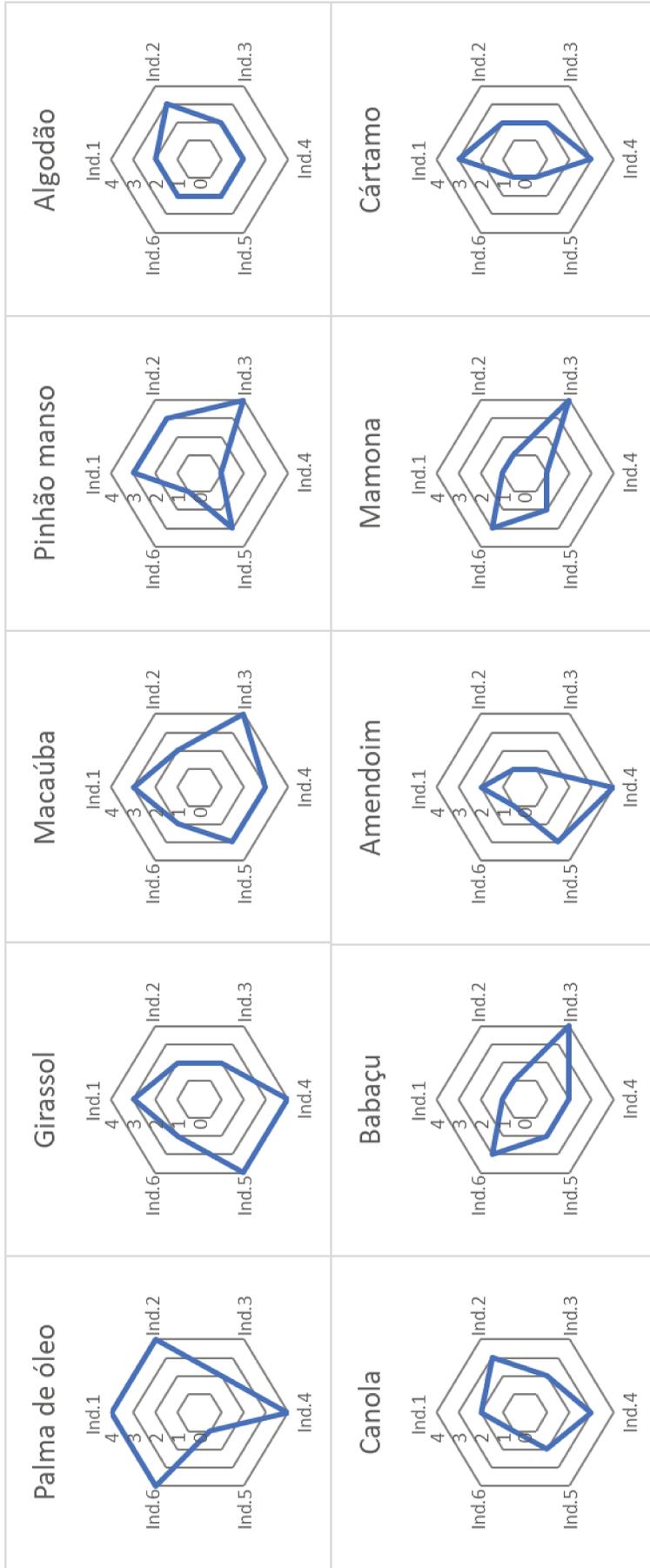
A canola é uma boa alternativa, no que respeita aos indicadores (2, 3, 5 e 7) relacionados com o preço do óleo e a capacidade de se distribuir nas regiões do país. Contudo, a pontuação nos outros indicadores é baixa, indicando que não é uma fonte tão viável economicamente para a cadeia produtiva do biodiesel.

O babaçu teve sua melhor pontuação nos indicadores (3, e 6), relacionados com a segurança alimentar, distribuição no território nacional, não obstante, a pontuação do resto de indicadores ficou baixa e muito baixa, indicando que é uma cultura com potencial mas precisa ser trabalhada nas suas fraquezas nesta dimensão.

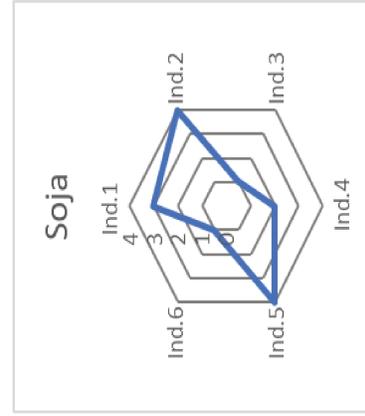
O amendoim nessa dimensão recebeu boa pontuação nos indicadores (4 e 5), devido ao fato que seu ciclo de cultivar é curto e é uma oleaginosa com capacidade de se desenvolver em diferentes regiões do Brasil. No entanto, em questão da precificação do mercado essa fonte não é competitiva. Além disso, é comestível como grão, e seu óleo compete com a produção alimentar pelo que seu desempenho não é dos melhores.

A mamona apresenta melhor desempenho nos indicadores (3 e 6), já que não é uma cultura comestível e tem boa comercialização de produtos e coprodutos, porém o resto de indicadores ficaram com nota baixa e muito baixa. As maiores fraquezas dessa oleaginosa nessa dimensão estão relacionadas com seu elevado preço no mercado, sendo pouco competitiva para a produção do biodiesel.

Por último, a espécie promissória cártamo, que até então tem pouca expressão econômica no Brasil, obteve boa pontuação nos indicadores (1 e 4) mesmo sendo penalizada com menos um ponto nos indicadores (1, 2) de preço da oleaginosa e do seu óleo, valores estimados com os preços médios internacionais. Em geral essa espécie é pouco viável nessa dimensão.



(a) Avaliação das dez oleaginosas de uso não convencional



(b) Soja como fonte de comparação

Figura 6.2: Resultados da avaliação das oleaginosas para o cenário base por meio dos indicadores econômicos

6.1.3 Avaliação na dimensão ambiental

Na dimensão ambiental foram definidos 5 indicadores os quais foram pontuados conforme mostra a Tabela 6.5, logo na Tabela 6.6, vê-se a pontuação de todas as oleaginosas. As melhor pontuadas são a palma de óleo com 16 pontos, o algodão com 13 pontos e o cártamo com 12 pontos de um total de 20 pontos. As oleaginosas com a pontuação mais baixa nessa dimensão foram, a mamona com 9 pontos, a macaúba e o babaçu empatadas com 8 pontos.

Tabela 6.5: Cenário base - Sistema de pontuação dos indicadores na dimensão ambiental

| Indicador | Variável relacionada ao indicador | Pontuação |
|--|--|-----------|
| Máxima pontuação | | 20 |
| Potencial de Mitigação de GEE | | |
| 1. Fator de emissão (FE) (gCO _{2eq} /MJ) | $FE \leq 21,8$ | 4 |
| | $21,8 < FE \leq 30,6$ | 3 |
| | $30,6 < FE \leq 54,7$ | 2 |
| | $FE > 54,7$ | 1 |
| Uso da terra | | |
| 2. Existência de zoneamento agroecológico (ZAE) ou agrícola de risco climático (ZARC) | ZAE | 4 |
| | ZARC | 3 |
| | ZARC, parcial | 2 |
| | Não | 1 |
| Qualidade do solo | | |
| 3. Capacidade de proteção do solo conforme tipo de cultivar | Tipo de cultivar perene | 4 |
| | Tipo de cultivar anual | 1 |
| 4. Capacidade da cultura de atuar como planta de cobertura em rotação, sucessão ou em consórcio. | Cultivar de uso principal e/ou safrinha usado como cobertura e adubo vegetal | 4 |
| | Cultivar de tipo safrinha, usada como planta de cobertura e adubo vegetal | 3 |
| | Cultivar de uso principal, não de safrinha e potencial de adubo vegetal | 2 |
| | Cultivar só de uso principal e consórcio | 1 |
| Redução do consumo de água na produção da oleaginosa | | |
| 5. Pegada hídrica parte agrícola (PH) (m ³ /t) | $PH \leq 2177$ | 4 |
| | $2177 < PH \leq 4087$ | 3 |
| | $4087 < PH \leq 7114$ | 2 |
| | $PH > 7114$ | 1 |

Fonte: Elaboração própria

Tabela 6.6: Cenário base - Pontuação dimensão ambiental

| Indicador | Soja | Algodão | Girassol | Canola | Amendoim | Mamona | Cártamo | Pinhão Manso | Palma de óleo | Macaúba | Babaçu | Máxima Pontuação |
|--|------|---------|----------|--------|----------|--------|---------|--------------|---------------|---------|--------|------------------|
| 1. Fator de emissão de $\text{gCO}_{2\text{eq}}/\text{MJ}$ | 3 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 4 | 3 | 3 | 2 | 1 | 4 |
| 2. Existência de zoneamento agroecológico ou agrícola de risco climático | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | 4 | 1 | 1 | 4 |
| 3. Capacidade de proteção do solo conforme tipo de cultivar | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| 4. Capacidade da cultura de atuar como planta de cobertura em rotação, sucessão ou em consórcio. | 2 | 4 | 3 | 3 | 2 | 2 | 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 4 |
| 5. Pegada hídrica parte agrícola (m^3/t) | 4 | 3 | 2 | 3 | 1 | 1 | 2 | 1 | 4 | 1 | 1 | 4 |
| Total Absoluto | 13 | 13 | 10 | 11 | 9 | 8 | 12 | 10 | 16 | 9 | 8 | 20 |
| Total Normalizado | 0,65 | 0,65 | 0,5 | 0,55 | 0,45 | 0,4 | 0,6 | 0,5 | 0,8 | 0,45 | 0,4 | |

Fonte: Elaboração própria

Observa-se na Figura 6.2, as oleaginosas ordenadas de maior a menor, conforme a pontuação recebida e definida pela Tabela 6.6.

Nota-se que a palma de óleo, alternativa que obteve a maior pontuação em relação a suas concorrentes, recebeu nota excelente e boa nota nos indicadores (1, 2, 3 e 5). A palma cultivada sustentavelmente pode ajudar na mitigação de GEE devido a seu fator de emissões baixo. É uma cultura que foi considerada no ZAE, instrumento que determina o ordenamento do espaço da produção agrícola de forma sustentável. Além disso a oleaginosa ao ser uma espécie de tipo perene ocupa a terra por mais tempo, mas oferece maior proteção do solo contendo a erosão e preservando mais os estoques de carbono. Por último, a pegada hídrica na parte agrícola dessa oleaginosa na média mundial é baixa.

Os resultados para o algodão, espécie anual que destaca por sua pontuação nos indicadores (2, 4 e 5) dado que é uma alternativa com o ZARC, é desejável para fazer safrinha prática de manutenção da qualidade do solo, provê cobertura vegetal mitigando os impactos sobre o solo e reduzindo o consumo de água na sua produção agrícola.

O cártamo ressalta por sua pontuação no indicador (1 e 4), é a fonte com menores emissões de $\text{gCO}_{2\text{eq}}/\text{MJ}$ do biodiesel produzido no ciclo de vida segundo os dados da pesquisa de referência. A cultura contribui com o aumento do conteúdo de matéria orgânica do solo e pode ser usadas em sucessão à culturas tradicionais como a soja, melhorando a qualidade do solo. Contudo, chama a atenção em outros indicadores onde apresenta desempenho baixo.

A canola, obteve boa pontuação nos indicadores (4 e 5), é uma espécie que pode fazer cobertura vegetal contribuindo na redução da erosão do solo aumentando o conteúdo de matéria orgânica do solo, além de ser uma cultura com baixo consumo de água na sua produção. Os demais indicadores não são bons e constituem os pontos fracos desta oleaginosa.

O girassol é uma fonte com boa pontuação nos indicadores (2 e 4), já é considerada no ZARC e tem boa capacidade para atuar como planta de cobertura contribuindo com o solo. Entretanto, tem o desempenho mais baixo para o indicador 1 de fator de emissões.

O pinhão manso foi bem pontuado nos indicadores (1 e 3), quer dizer, que é uma boa alternativa para mitigar as emissões de GEE e contribuir com a qualidade do solo ao ser uma espécie perene, contudo, algumas das fraquezas dessa oleaginosa é que não tem ZARC e é a espécie que precisa maior consumo de água por tonelada produzida.

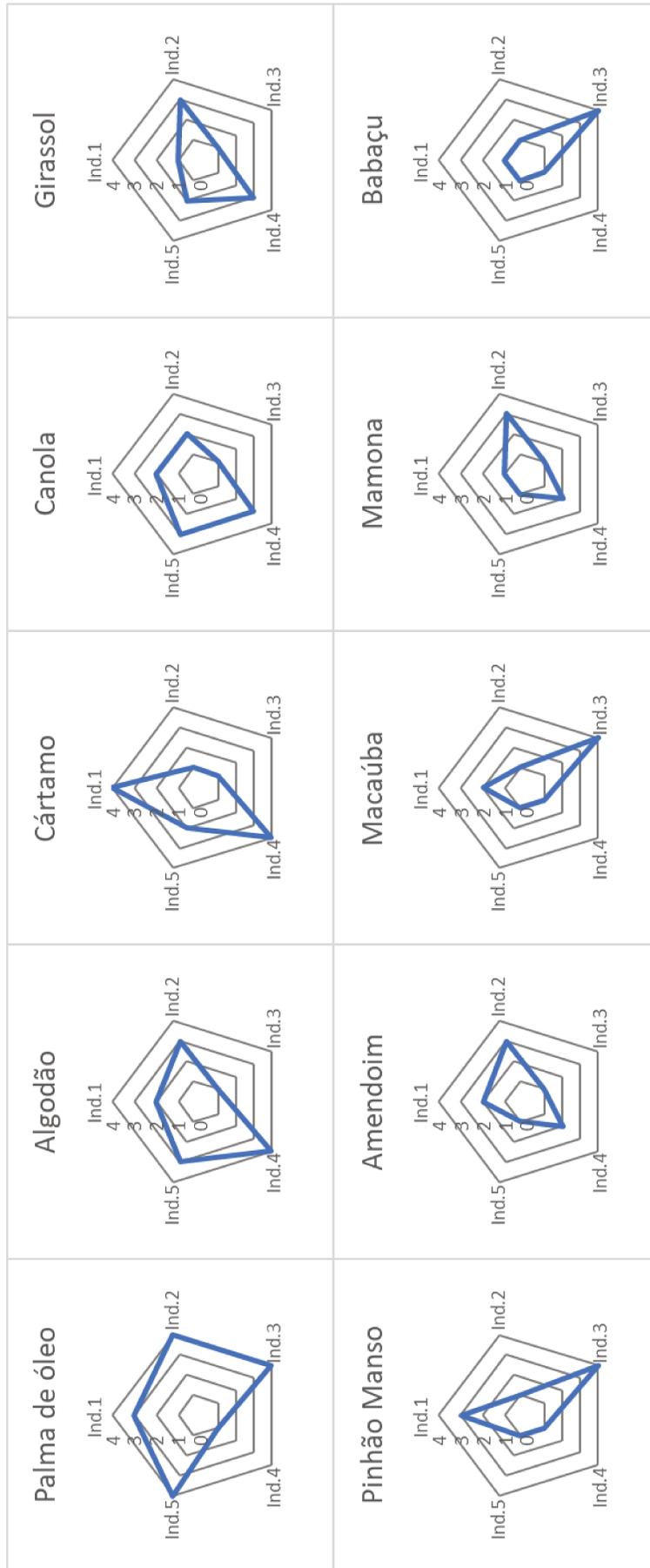
O amendoim apresenta baixo desempenho nos valores médios dos indicadores, só rece-

beu boa pontuação para a existência de ZARC o que mostra que não é uma boa alternativa nessa dimensão.

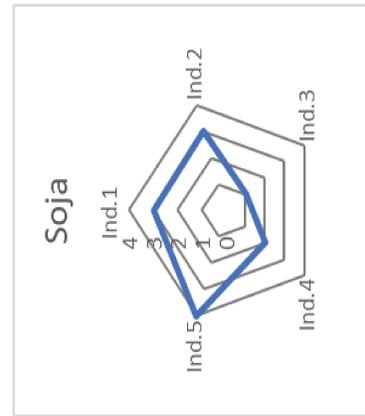
A macaúba é bem pontuada no indicador 3 contribuindo com a proteção do solo, porém os demais indicadores têm baixas notas. É de salientar que devido ao alto grau de incerteza com os dados dessa fonte na literatura, particularmente, a inexistência de informações para o indicador 5, ela acabou tendo um mal desempenho.

A mamona é uma cultura que nessa dimensão unicamente obteve boa pontuação no indicador 2, dado que conta com o ZARC, porém obteve pontuação muito baixa no resto de indicadores, em média recebeu nota 1, expondo que não é uma boa alternativa na dimensão ambiental.

Por fim, embora o babaçu seja boa opção por sua capacidade de proteger do solo ao reduzir a erosão (indicador 3), obteve mal desempenho por conta da inexistência de dados para os indicadores fator de emissões e pegada hídrica (indicadores 1 e 5), já que não se encontraram dados de literatura para estes aspectos.



(a) Avaliação das dez oleaginosas de uso não convencional



(b) Soja como fonte de comparação

Figura 6.3: Resultados da avaliação das oleaginosas no cenário base por meio dos indicadores ambientais

6.1.4 Avaliação das oleaginosas nas três dimensões

Nesta seção se apresenta uma visão macro da avaliação das dez fontes de óleo vegetal ao integrar os resultados obtidos nas três dimensões, como apresenta a Tabela 6.7.

Tabela 6.7: Cenário base - Resultados globais para cada dimensão

| Dimensão | Soja | Algodão | Girassol | Canola | Amendoim | Mamona | Cártamo | Pinhão Manso | Palma de óleo | Macaúba | Babaçu |
|-----------|------|---------|----------|--------|----------|--------|---------|--------------|---------------|---------|--------|
| Técnica | 0,71 | 0,71 | 0,83 | 0,75 | 0,71 | 0,38 | 0,58 | 0,58 | 0,88 | 0,71 | 0,38 |
| Econômica | 0,63 | 0,54 | 0,71 | 0,54 | 0,50 | 0,50 | 0,50 | 0,63 | 0,79 | 0,71 | 0,54 |
| Ambiental | 0,65 | 0,65 | 0,50 | 0,55 | 0,45 | 0,40 | 0,60 | 0,50 | 0,80 | 0,45 | 0,40 |
| TOTAL | 1,98 | 1,90 | 2,04 | 1,84 | 1,66 | 1,28 | 1,68 | 1,71 | 2,47 | 1,87 | 1,32 |

Fonte: Elaboração própria

Como pode ser observado na Figura 6.4, e considerando que os indicadores têm a mesma importância, os resultados mostram que as oleaginosas apresentam diferentes desempenhos dependendo da dimensão onde foram analisadas. Como exemplos, é possível ver que o algodão é uma alternativa mais viável para a produção do biodiesel vista desde a dimensão técnica, mas não é tão boa desde a dimensão ambiental e bem menos viável para a dimensão econômica. A canola é uma boa alternativa para a dimensão técnica, mas não é tão boa pelas dimensões econômica e ambiental. Por sua parte, o cártamo é mais viável desde a dimensão ambiental, menos viável na dimensão técnica e pouco viável para a dimensão econômica. A macaúba apresentou bom desempenho na dimensão técnica e econômica mas não é tão boa desde a dimensão ambiental. Por fim, a palma de óleo que obteve a maior pontuação em cada dimensão é mais viável desde a dimensão técnica e igualmente viável desde a dimensão econômica e ambiental.

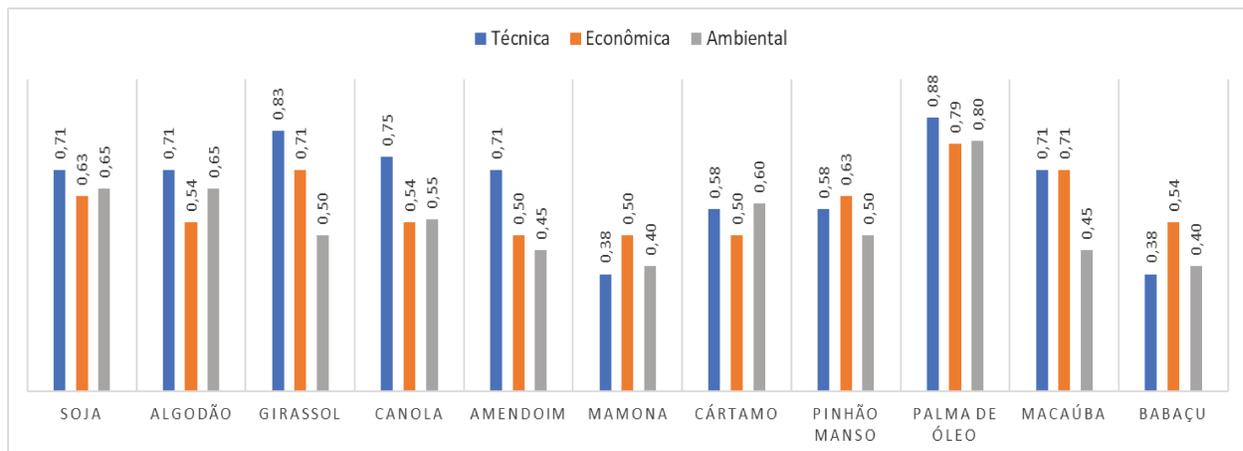


Figura 6.4: Cenário base - Participação por dimensão na pontuação de cada matéria-prima

6.1.5 Classificação das oleaginosas

Outra informação interessante que decorre desse cenário base é a classificação das oleaginosas. A Tabela 6.8 foi construída com os resultados da pontuação das alternativas normalizadas em cada dimensão e estão ordenadas de maior a menor. Nas duas colunas finais, apresenta-se a classificação global considerando as três dimensões.

Tabela 6.8: Cenário base - Classificação das oleaginosas

| Posição | Dimensão técnica | | Dimensão econômica | | Dimensão ambiental | | Nas três dimensões | |
|---------|------------------|-----------|--------------------|-----------|--------------------|-----------|--------------------|-----------|
| | Matéria-prima | Pontuação | Matéria-prima | Pontuação | Matéria-prima | Pontuação | Matéria-prima | Pontuação |
| 1 | Palma de óleo | 0,88 | Palma de óleo | 0,79 | Palma de óleo | 0,80 | Palma de óleo | 2,47 |
| 2 | Girassol | 0,83 | Girassol | 0,71 | Soja | 0,65 | Girassol | 2,04 |
| 3 | Canola | 0,75 | Macaúba | 0,71 | Algodão | 0,65 | Soja | 1,98 |
| 4 | Soja | 0,71 | Soja | 0,63 | Cártamo | 0,60 | Algodão | 1,90 |
| 5 | Algodão | 0,71 | Pinhão Manso | 0,63 | Canola | 0,55 | Macaúba | 1,87 |
| 6 | Amendoim | 0,71 | Algodão | 0,54 | Girassol | 0,50 | Canola | 1,84 |
| 7 | Macaúba | 0,71 | Canola | 0,54 | Pinhão Manso | 0,50 | Pinhão Manso | 1,71 |
| 8 | Cártamo | 0,58 | Babaçu | 0,54 | Amendoim | 0,45 | Cártamo | 1,68 |
| 9 | Pinhão Manso | 0,58 | Amendoim | 0,50 | Macaúba | 0,45 | Amendoim | 1,66 |
| 10 | Mamona | 0,38 | Mamona | 0,50 | Mamona | 0,40 | Babaçu | 1,32 |
| 11 | Babaçu | 0,38 | Cártamo | 0,50 | Babaçu | 0,40 | Mamona | 1,28 |

Fonte: Elaboração própria

Nessa classificação vista desde a dimensão técnica as melhores alternativas são a palma de óleo, o girassol, a canola, o algodão e o amendoim respectivamente. Esclarece-se que a soja, mesmo que apareça na lista (quarto lugar), só está incluída como ponto de comparação, porém, corrobora-se que não é a fonte mais eficiente tecnicamente para a produção de biodiesel segundo a posição que alcançou.

Para a dimensão econômica as melhores alternativas nessa classificação são a palma de óleo, o girassol, a macaúba, o pinhão manso e o algodão na devida ordem. A soja como ponto de comparação colocou-se na quarta posição. Os resultados mostram que espécies como a macaúba e o pinhão manso, são opções viáveis nessa dimensão conforme os dados pesquisados, devido que ao ser culturas não comestíveis não competem no mercado alimentar nem por preço nem por uso, mas existe certo grau de incerteza já que não têm uma vida comercial desenvolvida no Brasil como foi apresentado na avaliação do desempenho individual dessas oleaginosas.

A partir da dimensão ambiental, os cinco primeiros lugares na classificação foram ocupados pela palma de óleo, o algodão, o cártamo, a canola e o girassol. Trata-se, em sua maioria de matérias-primas de uso tradicional resultantes de sistemas de produção agrícola bem estabelecidos no mundo. A pontuação obtida indica que o uso dessas fontes na produção de biodiesel tem menores impactos ambientais considerado os indicadores definidos para a avaliação. A soja, colocou-se no segundo lugar, indicando que é uma fonte que pode reduzir os impactos ao meio ambiente na produção de biodiesel.

Na classificação global para o cenário base, verifica-se que as cinco fontes de óleo vegetal não convencionais mais viáveis para ser inseridas na cadeia produtiva do biodiesel em direção a uma produção sustentável nas dimensões técnica, econômica e ambiental são a palma de óleo, o girassol, o algodão, a macaúba e a canola.

6.2 Análise de sensibilidade

Uma análise de sensibilidade foi realizada sobre as classificações individuais obtidas no cenário base para observar se há variações significativas nas posições das alternativas quando são atribuídos diferentes pesos aos indicadores.

Para realizar a análise, considerou-se uma interpretação própria da visão dos diferentes agentes econômicos que nesse caso, são os tomadores de decisão caracterizados conforme se

apresentou na metodologia e que irão representar os diferentes cenários de análise a seguir:

- Cenário 1 - Produtores de biodiesel em usina totalmente integrada
- Cenário 2 - Produtores de biodiesel em usina parcialmente integrada
- Cenário 3 - Produtores de biodiesel em usina não integrada
- Cenário 4 - Gestores de políticas públicas

A atribuição de pesos outorgada por cada cenário para cada indicador é feita de acordo com a Tabela 6.9.

Tabela 6.9: Variação de pesos para os indicadores

| Pesos | Nível de importância |
|-------|----------------------|
| 1 | Muito baixo |
| 2 | Baixo |
| 3 | Médio |
| 4 | Alto |
| 5 | Muito alto |

A análise foi realizada alterando o peso dos indicadores na dimensão técnica, econômica e ambiental, tentando refletir o que seria a visão dos agentes econômicos e os seus interesses como se apresenta na Tabela 6.10.

Na Tabela 6.10, observa-se que a ponderação atribuída pelo cenário 1 considera um nível de importância muito alto (peso 5) para todos os indicadores da dimensão técnica, devido a que esse agente econômico está em todas as etapas possíveis do processo de produção do biodiesel. Enquanto para o cenário 2 os indicadores (2 e 4) que correspondem ao nível de domínio tecnológico agrícola e à existência de apoio técnico por entidades de PD&I para a produção do biodiesel não seriam tão relevantes para ele considerando que abordam aspectos particularmente da fase agrícola. Para o cenário 3, considerou-se que o nível de importância dos indicadores (1 e 2) produtividade do óleo e nível de domínio tecnológico agrícola é muito baixo, para esse agente econômico seria de maior interesse os indicadores relacionados com a parte industrial e com a qualidade do biodiesel uma vez que produzir biodiesel é sua principal atividade econômica. Para o cenário 4 (Gestor de política pública) a importância de todos os

Tabela 6.10: Atribuição de pesos de acordo com a interpretação da visão do agente econômico de cada cenário

| Dimensão | Indicador | Peso Cenário1 | Peso Cenário2 | Peso Cenário3 | Peso Cenário4 |
|-----------|---|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Técnica | 1. Produtividade esperada do óleo | 5 | 5 | 1 | 5 |
| | 2. Nível de domínio tecnológico agrícola | 5 | 1 | 1 | 5 |
| | 3. Nível de domínio tecnológico industrial | 5 | 5 | 5 | 5 |
| | 4. Existência de apoio técnico por entidades de PD&I para a produção do biodiesel | 5 | 2 | 2 | 3 |
| | 5. Perfil de ácido graxo favorável | 5 | 5 | 5 | 5 |
| | 6. Cumpre com a especificação de biodiesel da ANP | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Econômica | 1. Preço da oleaginosa | 5 | 5 | 1 | 5 |
| | 2. Preço do óleo vegetal | 5 | 5 | 5 | 5 |
| | 3. Existe concorrência com a produção alimentar | 5 | 5 | 5 | 5 |
| | 4. Ciclo do cultivar | 5 | 3 | 1 | 3 |
| | 5. Regiões Potenciais para a produção | 5 | 4 | 2 | 5 |
| | 6. Capacidade de comercialização de produtos, coprodutos e uso eficiente dos recursos secundários | 5 | 5 | 3 | 4 |
| Ambiental | 1. Fator de emissão de gCO ₂ eq/MJ | 3 | 2 | 1 | 5 |
| | 2. Existência do zoneamento agroecológico ou agrícola de risco climático | 5 | 1 | 1 | 5 |
| | 3. Capacidade de proteção do solo conforme tipo de cultivar | 4 | 1 | 1 | 5 |
| | 4. Capacidade da cultura de atuar como planta de cobertura em rotação, sucessão ou em consórcio. | 4 | 1 | 1 | 5 |
| | 5. Pegada hídrica parte agrícola | 5 | 1 | 1 | 5 |

Fonte: Elaboração própria

indicadores estimou-se muito alta, uma vez que para impulsar a diversificação das matérias-primas de origem vegetal na produção de biodiesel é preciso ter em conta a maioria de aspectos técnicos nas etapas da plantação, do esmagamento e da produção industrial do biocombustível.

Na parte econômica uma vez mais para o produtor do cenário 1 pressupõe-se que todos os indicadores merecem um nível de importância muito alto, esse produtor tem a opção de vender o grão que plantou, esmagá-lo vendendo o óleo vegetal ou produzir e vender o biodiesel ou seus coprodutos, levando ao mercado aquele produto que proporcionar maior margem de lucro naquele determinado momento. Mas para o produtor do cenário 2 os indicadores (1, 2, 3 e 6) foram considerados os de maior relevância, porque para ele tanto o preço da oleaginosa quanto o preço do óleo são bem importantes para o esmagamento bem como para a fabricação do biodiesel. Logo, aquelas matérias-primas que não compitam com o mercado alimentar e tenham uma boa capacidade de comercialização de coprodutos e uso eficiente dos recursos secundários também seriam de muita importância para a lucratividade na cadeia industrial desse tipo de usina. Nesse cenário o nível de importância outorgado para o indicador 4 que mede o ciclo de cultivar é médio (pontuação 4), pois faz parte da fase agrícola e não é de sua relevância. Finalmente supõe-se que o indicador 5 das regiões para a produção das oleaginosas sim é de alta importância, porque dependendo do lugar de produção da cultura e da sua proximidade com a usina, o produtor vai ter uma redução de custos de transporte ou frete.

Colocando-se na posição do produtor em usina não integrada do cenário 3, basicamente o que é mais importante é o preço do óleo vegetal e se existe concorrência com a produção alimentar para garantir a disponibilidade e preço mais estável no mercado, dado que vai ser um produto destinado exclusivamente para biocombustíveis. Por outro lado, para o cenário 4 considerou-se que quase todos os indicadores merecem um nível de importância muito alto, só o indicador 4 do ciclo de cultivar e o indicador 6 de capacidade de comercialização de coprodutos e uso eficiente de recursos secundários seriam de menor importância porque esses aspectos vão impactar particularmente a parte financeira das usinas.

Na dimensão ambiental considerou-se que para o cenário 1, o nível de importância desses indicadores têm maior relevância do que para os agentes econômicos do cenário 2 e 3. Devido a que a parte agrícola é a maior contribuinte nos impactos ambientais nos indicadores estabelecidos. Porém, tentando refletir estritamente a visão desses produtores, as preocupações ambientais não são de seu interesse. Esses aspectos unicamente ganham relevância se eles

obtiverem algum impacto de valorização de preço do seus produtos ou ainda para efeitos de imagem da empresa. Sob outra perspectiva, para o cenário 4 todos os indicadores dessa dimensão seriam muito importantes, uma vez que um dos seus escopos é trazer benefícios a longo prazo visando a sustentabilidade e não somente benefícios de rentabilidade a curto prazo.

6.2.1 Classificação das oleaginosas na dimensão técnica de acordo com os diferentes cenários

Com a ponderação atribuída nessa análise de sensibilidade pelos agentes econômicos, gerou-se quatro novas classificações para cada dimensão que foram comparadas com a classificação das oleaginosas do cenário base como se apresenta nas Tabelas a seguir. A soja se manteve nessa classificação para contrastar sua posição com as culturas restantes.

Nessa Tabela 6.11, é possível perceber as diferentes alterações no posicionamento das oleaginosas na classificação. Observa-se que neste exercício de sensibilidade para o cenário 1 a usina totalmente integrada na dimensão técnica não existiu modificação das posições em relação ao cenário base. As melhores alternativas são a palma de óleo, o girassol a canola e o algodão.

No cenário 2 existiram algumas alterações, destaca-se que o amendoim e a macaúba para esse agente econômico são melhores alternativas, deslocando-se duas posições acima com respeito ao cenário base. Outras fontes como o pinhão manso e o babaçu melhoraram em uma posição, por sua parte, o algodão, o cártamo e a mamona caíram de lugar na lista.

No cenário 3, conforme à interpretação dos interesses desse tipo de produtor, varias alterações são observadas em comparação ao cenário base. Ressalta-se que o girassol ganhou uma posição alcançando o primeiro lugar, seguido pela palma de óleo que caiu uma posição, assim como o cártamo e a mamona. A canola caiu duas posições, enquanto o algodão, o pinhão manso, e o babaçu ganharam uma posição.

Para o cenário 4 houve poucas alterações, a mais evidente foi para a canola que caiu três posições em comparação com o cenário base. O algodão, o amendoim e o pinhão manso subiram uma posição e o cártamo nesta análise caiu uma posição. No geral, a palma de óleo, o girassol, o algodão, o amendoim e a canola mantiveram-se nas primeiras posições.

Tabela 6.11: Classificação das oleaginosas de acordo com os diferentes cenários na dimensão técnica

| Dimensão técnica | | | | | | | | | | |
|-------------------------|---------------|-----------|------------------|-----------|------------------|-----------|------------------|-----------|------------------|-----------|
| Cenário base | | | Cenário 1 | | Cenário 2 | | Cenário 3 | | Cenário 4 | |
| Posição | Matéria-prima | Pontuação | Matéria-prima | Pontuação | Matéria-prima | Pontuação | Matéria-prima | Pontuação | Matéria-prima | Pontuação |
| 1 | Palma de óleo | 0,88 | Palma de óleo | 0,88 | Palma de óleo | 0,88 | Girassol | 0,89 | Palma de óleo | 0,87 |
| 2 | Girassol | 0,83 | Girassol | 0,83 | Girassol | 0,83 | Palma de óleo | 0,86 | Girassol | 0,82 |
| 3 | Canola | 0,75 | Canola | 0,75 | Canola | 0,76 | Soja | 0,82 | Soja | 0,74 |
| 4 | Soja | 0,71 | Soja | 0,71 | Amendoim | 0,76 | Algodão | 0,82 | Algodão | 0,74 |
| 5 | Algodão | 0,71 | Algodão | 0,71 | Macaúba | 0,75 | Canola | 0,82 | Amendoim | 0,74 |
| 6 | Amendoim | 0,71 | Amendoim | 0,71 | Soja | 0,72 | Amendoim | 0,76 | Canola | 0,73 |
| 7 | Macaúba | 0,71 | Macaúba | 0,71 | Algodão | 0,72 | Macaúba | 0,70 | Macaúba | 0,69 |
| 8 | Cártamo | 0,58 | Cártamo | 0,58 | Pinhão Manso | 0,68 | Pinhão Manso | 0,67 | Pinhão Manso | 0,61 |
| 9 | Pinhão Manso | 0,58 | Pinhão Manso | 0,58 | Cártamo | 0,59 | Cártamo | 0,55 | Cártamo | 0,55 |
| 10 | Mamona | 0,38 | Mamona | 0,38 | Babaçu | 0,41 | Babaçu | 0,45 | Mamona | 0,38 |
| 11 | Babaçu | 0,38 | Babaçu | 0,38 | Mamona | 0,37 | Mamona | 0,34 | Babaçu | 0,38 |

Fonte: Elaboração própria

6.2.2 Classificação das oleaginosas na dimensão econômica de acordo com os diferentes cenários

Na Tabela 6.12 da classificação da dimensão econômica, vê-se para o cenário 1 que as oleaginosas mantiveram a posição, dado que para esse agente econômico todos os indicadores eram de muita importância. Atribuiu-se peso 5 em todos os indicadores e se normalizou obtendo que as melhores candidatas para a diversificação nesse cenário são a palma de óleo, o girassol, a macaúba o pinhão manso e o algodão.

Para o cenário 2 encontrou-se algumas mudanças de colocações comparando com o cenário base, verifica-se que a macaúba, o pinhão manso, o babaçu a mamona e o cártamo ganharam uma posição, enquanto o girassol e a canola caíram uma posição. O amendoim ficou no último lugar caindo duas posições em virtude de seu elevado preço no mercado o que resulta desfavorável para sua utilização na cadeia produtiva do biodiesel.

Observa-se no cenário 3 que as espécies pinhão manso e a mamona subiram três posições e o babaçu dois lugares na lista com relação ao cenário base. As melhores alternativas segundo o avaliado pelos indicadores estabelecidos para esta análise são a palma de óleo, seguida pelo pinhão manso, a macaúba, o girassol e o babaçu. Note-se que ainda quando essas oleaginosas na literatura apresentem certos gargalos na parte econômica, essas culturas são boas alternativas no caso que o tomador de decisão somente se interessar na compra do seu óleo para produzir biodiesel e não se preocupar pela parte agrícola, já que seu principal interesse é o preço desse óleo.

Finalmente para o cenário 4 quando comparado com o cenário base, a macaúba, o pinhão manso, a mamona e o cártamo subiram uma posição, bem como o girassol, a mamona e o amendoim caíram de posição devido ao preço dessas oleaginosas e seus óleos no mercado. Nesse cenário as melhores alternativas são a palma de óleo, a macaúba, o girassol, o pinhão manso e o algodão.

Tabela 6.12: Classificação das oleaginosas de acordo com os diferentes cenários na dimensão econômica

| Dimensão econômica | | | | | | | | | | |
|--------------------|---------------|-----------|---------------|-----------|---------------|-----------|---------------|-----------|---------------|-----------|
| Cenário base | | | Cenário 1 | | Cenário 2 | | Cenário 3 | | Cenário 4 | |
| Posição | Matéria-prima | Pontuação |
| 1 | Palma de óleo | 0,79 | Palma de óleo | 0,79 | Palma de óleo | 0,80 | Palma de óleo | 0,76 | Palma de óleo | 0,77 |
| 2 | Girassol | 0,71 | Girassol | 0,71 | Macaúba | 0,70 | Pinhão Manso | 0,71 | Macaúba | 0,71 |
| 3 | Macaúba | 0,71 | Macaúba | 0,71 | Girassol | 0,68 | Macaúba | 0,71 | Girassol | 0,69 |
| 4 | Soja | 0,63 | Soja | 0,63 | Pinhão Manso | 0,65 | Soja | 0,60 | Pinhão Manso | 0,67 |
| 5 | Pinhão Manso | 0,63 | Pinhão Manso | 0,63 | Soja | 0,62 | Girassol | 0,60 | Soja | 0,65 |
| 6 | Algodão | 0,54 | Algodão | 0,54 | Algodão | 0,55 | Babaçu | 0,60 | Algodão | 0,55 |
| 7 | Canola | 0,54 | Canola | 0,54 | Babaçu | 0,55 | Mamona | 0,59 | Canola | 0,54 |
| 8 | Babaçu | 0,54 | Babaçu | 0,54 | Canola | 0,53 | Algodão | 0,57 | Babaçu | 0,54 |
| 9 | Amendoim | 0,50 | Amendoim | 0,50 | Mamona | 0,52 | Canola | 0,54 | Mamona | 0,51 |
| 10 | Mamona | 0,50 | Mamona | 0,50 | Cártamo | 0,49 | Cártamo | 0,46 | Cártamo | 0,49 |
| 11 | Cártamo | 0,50 | Cártamo | 0,50 | Amendoim | 0,45 | Amendoim | 0,37 | Amendoim | 0,47 |

Fonte: Elaboração própria

6.2.3 Classificação das oleaginosas na dimensão ambiental de acordo com os diferentes cenários

A classificação das oleaginosas na dimensão ambiental para cada cenário são apresentadas na Tabela 6.13. Verifica-se que as posições que obtiveram as oleaginosas no cenário base se mantiveram sem alterações nos cenários 1, 2, 3 e 4. Unicamente a pontuação variou pela atribuição de pesos na interpretação dos interesses de cada agente econômico. O que indica que essa é a dimensão mais estável e as melhores alternativas são a palma de óleo, o algodão, o cártamo, a canola e o girassol conforme o ponto de vista do agente econômico e do gestor de políticas públicas, porém é de lembra-se que a macaúba e o babaçu nessa dimensão foram penalizadas pela inexistência de dados na literatura para os indicadores 1 e 5, o que afetou o seu desempenho na avaliação do cenário base.

Tabela 6.13: Classificação das oleaginosas de acordo com os diferentes cenários na dimensão ambiental

| Dimensão ambiental | | | | | | | | | | |
|--------------------|---------------|-----------|---------------|-----------|---------------|-----------|---------------|-----------|---------------|-----------|
| Cenário base | | | Cenário 1 | | Cenário 2 | | Cenário 3 | | Cenário 4 | |
| Posição | Matéria-prima | Pontuação |
| 1 | Palma de óleo | 0,80 | Palma de óleo | 0,19 | Palma de óleo | 0,67 | Palma de óleo | 0,80 | Palma de óleo | 0,16 |
| 2 | Soja | 0,65 | Soja | 0,15 | Soja | 0,54 | Soja | 0,65 | Soja | 0,13 |
| 3 | Algodão | 0,65 | Algodão | 0,15 | Algodão | 0,54 | Algodão | 0,65 | Algodão | 0,13 |
| 4 | Cártamo | 0,60 | Cártamo | 0,14 | Cártamo | 0,50 | Cártamo | 0,60 | Cártamo | 0,12 |
| 5 | Canola | 0,55 | Canola | 0,13 | Canola | 0,46 | Canola | 0,55 | Canola | 0,11 |
| 6 | Girassol | 0,50 | Girassol | 0,12 | Girassol | 0,42 | Girassol | 0,50 | Girassol | 0,10 |
| 7 | Pinhão Manso | 0,50 | Pinhão Manso | 0,12 | Pinhão Manso | 0,42 | Pinhão Manso | 0,50 | Pinhão Manso | 0,10 |
| 8 | Amendoim | 0,45 | Amendoim | 0,11 | Amendoim | 0,38 | Amendoim | 0,45 | Amendoim | 0,09 |
| 9 | Macaúba | 0,45 | Macaúba | 0,11 | Macaúba | 0,38 | Macaúba | 0,45 | Macaúba | 0,09 |
| 10 | Mamona | 0,40 | Mamona | 0,10 | Mamona | 0,33 | Mamona | 0,40 | Mamona | 0,08 |
| 11 | Babaçu | 0,40 | Babaçu | 0,10 | Babaçu | 0,33 | Babaçu | 0,40 | Babaçu | 0,08 |

Fonte: Elaboração própria

6.2.4 Classificação global das oleaginosas nas três dimensões de acordo com os diferentes cenários

Por último nessa análise de sensibilidade na Tabela 6.14, mostra-se a classificação global considerando as três dimensões para cada cenário. No cenário 1, destaca-se a posição que alcançou a macaúba ficando duas posições arriba contrastada com o cenário base. A canola, o pinhão manso e o amendoim subiram uma posição conforme o interesse desse tipo de produtor, enquanto o algodão caiu em três posições. As cinco melhores alternativas nesse cenário são a palma de óleo, o girassol, seguido pela macaúba, a canola e o pinhão manso. A soja se manteve na lista para verificar sua importância nessa classificação, ficando no quarto lugar indicando que outras alternativas resultam mais interessantes para esse produtor considerando todas as dimensões.

Para o cenário 2, a macaúba e o pinhão manso subiram duas posições versus o cenário base, o algodão caiu três posições e o cártamo uma posição. Sob as três dimensões as melhores candidatas para o produtor desse cenário são a palma de óleo, o girassol, a macaúba, o pinhão manso e a canola.

Na classificação para o cenário 3 ressaltam as posições da macaúba e do pinhão manso, ganhando três posições acima em relação ao cenário base. O girassol, a canola e o cártamo caíram uma posição, entretanto o algodão e a soja caíram duas posições, o resto das oleaginosas não tiveram alterações. Para o produtor não integrado as melhores alternativas são a palma de óleo, a macaúba, o girassol, o pinhão manso e o algodão.

Por fim, no cenário 4 a classificação ficou na mesma ordem que para o cenário 2. A macaúba e o pinhão manso melhoraram suas posições versus o cenário base. As cinco melhores alternativas nesse cenário são a palma de óleo, o girassol, a macaúba, o pinhão manso e a canola.

Com a análise de sensibilidade, foi possível mostrar que a classificação das oleaginosas depende do ponto de vista do agente econômico e a escolha das alternativas muda conforme os interesses dos tomadores de decisão. Como exemplo, o pinhão manso não é uma boa alternativa para o produtor totalmente integrado do cenário 1, mas é um pouco melhor para a usina parcialmente integrada do cenário 2 e é uma boa alternativa para o produtor não integrado do cenário 3. Isso significa que o desempenho na parte agrícola dessa oleaginosa não é muito bom, porém se ninguém plantar essa cultura porque não resulta interessante para o produtor, sua produção não vai evoluir para ser utilizada na cadeia produtiva do biodiesel.

Tabela 6.14: Classificação das oleaginosas de acordo com os diferentes cenários nas três dimensões

| Nas três dimensões | | | | | | | | | | |
|--------------------|---------------|-----------|---------------|-----------|---------------|-----------|---------------|-----------|---------------|-----------|
| Cenário base | | | Cenário 1 | | Cenário 2 | | Cenário 3 | | Cenário 4 | |
| Posição | Matéria-prima | Pontuação |
| 1 | Palma de óleo | 2,47 | Palma de óleo | 1,86 | Palma de óleo | 1,87 | Palma de óleo | 1,84 | Palma de óleo | 1,84 |
| 2 | Girassol | 2,04 | Girassol | 1,65 | Girassol | 1,62 | Macaúba | 1,56 | Girassol | 1,64 |
| 3 | Soja | 1,98 | Macaúba | 1,57 | Macaúba | 1,56 | Girassol | 1,55 | Macaúba | 1,57 |
| 4 | Algodão | 1,90 | Soja | 1,50 | Soja | 1,49 | Pinhão Manso | 1,51 | Soja | 1,52 |
| 5 | Macaúba | 1,87 | Canola | 1,43 | Pinhão Manso | 1,45 | Soja | 1,48 | Pinhão Manso | 1,47 |
| 6 | Canola | 1,84 | Pinhão Manso | 1,43 | Canola | 1,42 | Algodão | 1,45 | Canola | 1,43 |
| 7 | Pinhão Manso | 1,71 | Algodão | 1,41 | Algodão | 1,42 | Canola | 1,44 | Algodão | 1,42 |
| 8 | Cártamo | 1,68 | Amendoim | 1,37 | Amendoim | 1,32 | Amendoim | 1,24 | Amendoim | 1,34 |
| 9 | Amendoim | 1,66 | Cártamo | 1,23 | Cártamo | 1,22 | Cártamo | 1,19 | Cártamo | 1,22 |
| 10 | Babaçu | 1,32 | Babaçu | 1,05 | Babaçu | 1,05 | Babaçu | 1,11 | Babaçu | 1,05 |
| 11 | Mamona | 1,28 | Mamona | 0,96 | Mamona | 0,98 | Mamona | 1,05 | Mamona | 0,97 |

Fonte: Elaboração própria

Como resultado final a classificação global considerando as três dimensões e a média da pontuação obtida por cada cenário se apresenta na Tabela 6.15, as melhores alternativas nos diferentes cenários foram a palma de óleo que ficou na primeira posição, a segunda colocada foi o girassol, a terceira posição foi para a macaúba, e, a quinta e sexta posição foi para o pinhão manso e a canola respectivamente. Nas posições abaixo da média ficaram o algodão, o amendoim o cártamo e finalmente o babaçu e a mamona como alternativas menos favoráveis nessa escolha. A soja ficou na quarta posição reforçando que existem outras alternativas com bom desempenho capazes de contribuir na diversificação de matérias-primas para a produção do biodiesel no Brasil.

Tabela 6.15: Média da pontuação obtida por cada cenário

| Média de todos os cenários | | |
|-----------------------------------|---------------|-----------|
| Posição | Matéria-prima | Pontuação |
| 1 | Palma de óleo | 1,85 |
| 2 | Girassol | 1,62 |
| 3 | Macaúba | 1,56 |
| 4 | Soja | 1,50 |
| 5 | Pinhão Manso | 1,47 |
| 6 | Canola | 1,43 |
| 7 | Algodão | 1,42 |
| 8 | Amendoim | 1,32 |
| 9 | Cártamo | 1,21 |
| 10 | Babaçu | 1,07 |
| 11 | Mamona | 0,99 |

Fonte: Elaboração própria

Capítulo 7

Conclusões

Este trabalho teve por objetivo principal a avaliação e classificação de algumas oleaginosas para serem introduzidas na cadeia de produção de biodiesel com o intuito de facilitar a escolha das melhores candidatas para a diversificação da matéria-prima para esse biocombustível, através de cinco cenários sugeridos; um cenário base onde os indicadores têm a mesma importância e quatro cenários ponderados tentando-se colocar na posição dos diferentes agentes econômicos e desde a ótica dos gestores de políticas públicas.

A metodologia desenvolvida permitiu obter uma visão micro na avaliação das dez oleaginosas selecionadas, exibida nos gráficos de tipo radar, ao identificar suas forças e fraquezas por meio da pontuação e análise dos indicadores estabelecidos na dimensão técnica, econômica e ambiental, e, uma visão macro, na avaliação das alternativas ao integrar os resultados nas três dimensões abordadas no cenário base.

Na avaliação, encontrou-se que as oleaginosas apresentam diferentes desempenhos dependendo da dimensão onde foram analisadas. Porém para alguns indicadores existe certa heterogeneidade no tratamento das informações de cada matéria-prima, devido a que quando são revisadas culturas que ainda tem pouca expressão econômica, os dados geram um grau de incerteza grande e a pontuação acaba ficando suscetível a essas variabilidades o que pode terminar afetando o desempenho delas. Como exemplo, o algodão e a canola são boas alternativas considerando apenas a dimensão técnica, mas não são tão boas pelas dimensões econômica e ambiental, por sua parte a macaúba apresentou bom desempenho na dimensão técnica e econômica mas na dimensão ambiental não foi tão boa alternativa.

A classificação das oleaginosas decorrente do cenário base serviu como ponto de com-

paração para a análise de sensibilidade, exercício onde se tentou refletir o que seria a visão dos agentes econômicos definidos pelo grau de verticalização das usinas produtoras do setor e sob a ótica dos gestores de políticas públicas através de quatro cenários.

Com a análise de sensibilidade foi possível mostrar que a classificação das oleaginosas depende do ponto de vista do agente econômico. A visão do produtor totalmente integrado que está no plantio, esmagamento e produção do biocombustível é diferente daquele não integrado que só produz biodiesel e compra óleo vegetal no mercado. O mesmo acontece com o gestor de políticas públicas que está mais preocupado com aspectos da dimensão ambiental e a sustentabilidade. A escolha das alternativas muda conforme os interesses dos tomadores de decisão. Como exemplo, o pinhão manso mostrou não ser uma boa alternativa para o produtor totalmente integrado do cenário 1, mas é uma opção um pouco melhor para a usina parcialmente integrada do cenário 2 e para o gestor de políticas do cenário 4 e é uma boa alternativa para o produtor não integrado do cenário 3.

Como resultado da classificação global considerando as três dimensões, as melhores alternativas nos diferentes cenários foram a palma de óleo que ficou na primeira posição, a segunda colocada foi o girassol, a terceira posição foi para a macaúba, e, a quinta e sexta posição foi para o pinhão manso e a canola respectivamente. O algodão, o amendoim e o cártamo foram alternativas de desempenho abaixo da média, e por último, o babaçu e a mamona as oleaginosas de menor desempenho. A soja ficou na quarta posição reforçando que existem outras alternativas com melhores características capazes de contribuir na diversificação das matérias-primas para a produção do biodiesel no Brasil.

Ao se avaliar a política RenovaBio encontrou-se que o programa apresenta algumas dificuldades quando se busca inserir oleaginosas não convencionais para a produção do biodiesel. Por uma parte na RenovaCalc apenas é considerada a categoria “Mudança do Clima”, pelo que os produtores de biodiesel interessados em participar do programa deveriam procurar oleaginosas com fator de emissões de $\text{gCO}_{2\text{eq}}/\text{MJ}$ reduzidos para obter maior NEEA e adquirir mais Cbios, porém conhecer a procedência daquelas matérias-primas é um desafio. Os fornecedores de oleaginosas e óleos vegetais tem muitos intermediários sem disponibilidade pública de informações da parte agrícola nem industrial nas esmagadoras, além disso, ainda que o produtor possa fazer o pedido à ANP de credenciamento de novas rotas, hoje a planilha de cálculo na parte agrícola tem foco na soja como matéria-prima para a rota do biodiesel.

O intuito é que esta metodologia e a classificação das oleaginosas sirva de base, e seja utilizada para apoiar as decisões referentes à escolha das melhores candidatas para a diversificação das matérias-primas para uma produção sustentável do biodiesel, sugerindo uma priorização de alternativas que sejam mais coerentes com os interesses dos agentes econômicos e dos gestores de políticas públicas envolvidos no setor.

Com os resultados e aproveitando o programa RenovaBio, espera-se que os interessados em participar dele, possam fazer uma avaliação mais abrangente olhando múltiplos aspectos não só na dimensão ambiental mas também na dimensão técnica e econômica, uma vez que este trabalho buscou superar as limitações para a escolha de oleaginosas, que são causadas pelos aspectos conflitantes provenientes dessas dimensões.

Por ultimo, recomenda-se para trabalhos futuros: (a) revisar as informações dos indicadores da dimensão ambiental para deixar eles mais uniformes na comparação das matérias-primas; (b) incluir indicadores na dimensão social; (b) incluir entrevistas com os tomadores de decisão dos diferentes cenários na busca de refletir fielmente a realidade dos seus interesses; (c) avaliar outros biocombustíveis assim como outras matérias-primas como gorduras animais ou óleos reciclados; (d) aprofundar o contexto das iniciativas de sustentabilidade similares na produção e consumo de biocombustíveis.

Referências

ABIOVE. *Pesquisa de Capacidade Instalada da Indústria de Óleos Vegetais*. 2019. Disponível em: <<https://abiove.org.br/estatistica/>>. Acesso em: 08 abr. 2020.

ABIOVE. *Estatística Mensal do Complexo Soja*. 2020. Disponível em: <<https://abiove.org.br/estatistica/>>. Acesso em: 08 abr. 2020.

ALMEIDA, G. M. A.; BORGES, R. J.; AMÂNCIO-VIEIRA, S. F. Processo de institucionalização da pesquisa com pinhão-manso: um estudo na Embrapa - DF. *Revista Eletrônica de Administração e Turismo - ReAT*, Universidade Federal de Pelotas, v. 10, n. 5, p. 1245, jun 2017.

ANP. *Resolução ANP Nº 45, de 25.8.2014*. 2014. Disponível em: <<http://legislacao.anp.gov.br/?path=legislacao-anp/resol-anp/2014/agosto&item=ranp-45-2014>>. Acesso em: 07 maio. 2020.

ANP. *Resolução ANP Nº 758, de 23.11.2018*. 2018. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/producao-de-bicombustiveis/renovabio/legislacao>>. Acesso em: 07 maio. 2020.

ANP. *Anuário Estatístico 2019*. Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/publicacoes/anuario-estatistico/5237-anuario-estatistico-2019>>. Acesso em: 02 mar. 2020.

ANP. *Orientações Gerais: Procedimentos para Certificação da Produção ou Importação Eficiente de Biocombustíveis*. [S.l.], 2019. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/producao-de-bicombustiveis/renovabio/orientacoes-para-certificacao-do-renovabio>>. Acesso em: 07 maio. 2020.

ANP. *Anuário Estatístico 2020*. Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/publicacoes/anuario-estatistico/5809-anuario-estatistico-2020>>. Acesso em: 13 ago. 2020.

ANP. *Biodiesel*. 2020. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/bicombustiveis/biodiesel>>. Acesso em: 12 maio. 2020.

ANP. *Informações de Mercado*. Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/producao-de-bicombustiveis/biodiesel/informacoes-de-mercado>>. Acesso em: 15 fev. 2020.

ANP. *Renovabio*. 2020. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/producao-de-bicombustiveis/renovabio>>. Acesso em: 04 maio. 2020.

ANP. *RenovaCalc*. 2020. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/producao-de-biocombustiveis/renovabio/renovacalc>>. Acesso em: 06 maio. 2020.

ARANDA, D. A. G.; SOARES, C. M.; TAPANES, N. O. Techno-Economic and Life Cycle Analysis of Biodiesel Production: Perception of Land Use, Climate Change, and Sustainability Measurements. In: *Biofuels in Brazil*. [S.l.]: Springer International Publishing, 2014. cap. 16, p. 351–365.

B3. *B3 inicia comercialização do Crédito de Descarbonização do RenovaBio*. 2020. Disponível em: <<http://www.b3.com.br/ptbr/produtos-e-servicos/outros-servicos/servicos-de-natureza-informacional/credito-de-descarbonizacao-cbio/>>. Acesso em: 23 maio. 2020.

BELLEN, H. M. V. Indicadores de sustentabilidade: um levantamento dos principais sistemas de avaliação. *Cadernos EBAP.EBR*, scielo, v. 2, n. 1, p. 01–14, mar. 2004. ISSN 1679-3951. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1679-39512004000100002&nrm=iso>.

BELTRÃO, N. E. de M.; OLIVEIRA, M. I. P. de. *Oleaginosas e seus Óleos: Vantagens e Desvantagens para Produção de Biodiesel*. Campina Grande, PB, 2008. EMBRAPA (ISSN 0103-0205). Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/276836/1/DOC201.pdf>>. Acesso em: 22 mar. 2020.

BERGMANN, J. et al. Biodiesel production in Brazil and alternative biomass feedstocks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier BV, v. 21, p. 411–420, may 2013.

BIODIESELBR. *Verticalização: Da matéria-prima ao biodiesel*. 2007. Disponível em: <<https://www.biodieselbr.com/revista/010/verticalizacao-2>>. Acesso em: 05 out. 2020.

BIODIESELBR. *Estímulo à produção de girassol em Minas*. 2013. Disponível em: <<https://www.biodieselbr.com/noticias/materia-prima/giras/embrapa-disponibiliza-novas-cultivares-girassol-safrinha-280214>>. Acesso em: 18 mar. 2020.

BIODIESELBR. *Macaúba é alternativa promissora para o biodiesel*. 2016. Disponível em: <<https://www.biodieselbr.com/noticias/materia-prima/macauba/macauba-alternativa-promissora-para-o-biodiesel-150716>>. Acesso em: 06 abr. 2020.

BIODIESELBR. *'Barato', caroço de algodão vira ração para bois*. 2019. Disponível em: <<https://www.biodieselbr.com/noticias/materia-prima/algodao/barato-caroco-de-algodao-vira-racao-para-bois-290419>>. Acesso em: 18 mar. 2020.

BIODIESELBR. *Ciência leva canola ao Cerrado e à região do Semiárido*. 2019. Disponível em: <<https://www.biodieselbr.com/noticias/materia-prima/canola/ciencia-leva-canola-ao-cerrado-e-a-regiao-do-semiarido-030719>>. Acesso em: 14 mar. 2020.

BIODIESELBR. *História e Biodiesel*. 2019. Disponível em: <<https://www.biodieselbr.com/biodiesel/historia/biodiesel-historia>>. Acesso em: 25 out. 2019.

BIODIESELBR. *Representações do setor de biodiesel criticam judicialização do RenovaBio*. 2020. Disponível em: <<https://www.biodieselbr.com/noticias/regulacao/rbio/ubrario-critica-judicializacao-do-renovabio-101120>>. Acesso em: 13 nov. 2020.

BOMFIM, M. A. D.; SILVA, M. M. C.; SANTOS, S. F. dos. Potencialidades da utilização de subprodutos da indústria de biodiesel na alimentação de caprinos e ovinos. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE CAPRINOS E OVINOS DE CORTE – 3º SINCORTE. *Simpósio Internacional sobre Caprinos e Ovinos de Corte – 3º SINCORTE*. João Pessoa: Tecnol. & Ciên. Agropec., 2007. Anais.

BORGES, A. de J.; COLLICCHIO, E.; CAMPOS, G. A. A cultura da palma de óleo (*Elaeis guineensis* Jacq.) no Brasil e no mundo: aspectos agronômicos e tecnológicos - uma revisão. *Revista Liberato*, v. 17, n. 27, p. 65–78, jan. 2016. ISSN 2178-8820. Disponível em: <http://revista.liberato.com.br/ojs_lib/index.php/revista/issue/view/38/showToc>. Acesso em: 31 mar. 2020.

BRASIL. *Lei nº 11.097, de 13 de janeiro de 2005*. 2005. Acesso em: 07 maio. 2020.

BRASIL. *Pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada para consecução do objetivo da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima*. 2015.

CADERNOSNAE. *Cadernos NAE: biocombustíveis*. Brasília, 2005. ISSN 1806-8588.

CANAKCI, M.; SANLI, H. Biodiesel production from various feedstocks and their effects on the fuel properties. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, Springer Science and Business Media LLC, v. 35, n. 5, p. 431–441, mar 2008.

CARVALHO, L. P. de. *Melhoramento do Algodoeiro Herbáceo Visando ao Aumento do Teor de Óleo nas Sementes*. Campina Grande, PB, 2015. EMBRAPA (ISSN 0103-0205). Disponível em: <<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/144098/1/Melhoramento-do-algodoeiro.pdf>>. Acesso em: 14 abr. 2020.

CERRI, C. E. P. et al. Assessing the greenhouse gas emissions of Brazilian soybean biodiesel production. *PLOS ONE*, Public Library of Science (PLoS), v. 12, n. 5, p. e0176948, may 2017.

CNPE. *Resolução Nº 15, DE 24 DE JUNHO DE 2019*. 2019. Disponível em: <<http://www.in.gov.br/web/dou/-/despachos-do-presidente-da-republica-190107850>>. Acesso em: 04 maio. 2020.

COMIN, J. J.; LOVATO, P. E. *Programa de capacitação em gestão da água: Manejo para qualidade do solo*. Florianópolis, 2014.

CONAB. *Perspectivas para a agropecuária*. Brasília, 2018. (ISSN: 2318-3241).

CONAB. *Acompanhamento de safra brasileira: Grãos*. Brasília, 2019. (ISSN 2318-6852). Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>>. Acesso em: 18 mar. 2020.

CONAB. *Boletim da Sociobiodiversidade*. Brasília, 2019. (ISSN 2527-1598). Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/busca?searchword=boletimdasociobiodiversidade&ordering=newest&searchphrase=all&limit=20>>. Acesso em: 08 abr. 2020.

- CONAB. *Política de Garantia de Preços Mínimos: para Produtos da Sociobiodiversidade*. Brasília, 2019. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/images/chamadas/politicas_programas/Folder-pgpmbio-2019_digital_bx.pdf>. Acesso em: 08 abr. 2020.
- CONAB. *Preços agrícolas, da sociobio e da pesca*. 2020. Preços médios mensais 2014-2020. Disponível em: <<http://sisdep.conab.gov.br/precosiagroweb/>>. Acesso em: 06 abr. 2020.
- CORREIA, B. d. B. *Requisitos de sustentabilidade para biocombustíveis e as normas do direito internacional*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP, 2011. Disponível em: <<http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/263862>>. Acesso em: 17 jul. 2020.
- CSOB/MAPA. *Agenda de Inovação para a cadeia produtiva do Brasil*. Brasília, DF, 2019. CSOB/MAPA. Disponível em: <<https://aprobio.com.br/arquivos/Agenda-Biodiesel-V2.pdf>>. Acesso em: 25 jan. 2020.
- DAPONTI, C. M. *Indicadores para avaliação da sustentabilidade em contextos de desenvolvimento rural local*. Dissertação (phdthesis) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- DIAZ-CHAVEZ, R. Indicators for socio-economic sustainability assessment. In: _____. *Socio-Economic Impacts of Bioenergy Production*. Cham: Springer International Publishing, 2014. p. 17–37. ISBN 978-3-319-03829-2. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-03829-2_2>.
- DURÃES, F. O. M.; LAVIOLA, B. G.; ALVES, A. A. Potential and challenges in making physic nut (*Jatropha curcas* L.) a viable biofuel crop: the Brazilian perspective. *CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources*, CABI Publishing, v. 6, n. 043, mar 2011.
- EMBRAPA. *Mapa divulga zoneamento para plantio da mamona*. 2007. Notícias. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/18021299/mapa-divulga-zoneamento-para-plantio-da-mamona>>. Acesso em: 26 mar. 2020.
- EMBRAPA. *Pinhão manso: matéria-prima potencial para produção de biodiesel*. Brasília, DF, 2009. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/17958/8/665.pdf>>. Acesso em: 30 mar. 2020.
- EMBRAPA. *Nova cultivar de amendoim precoce para o mercado de óleo*. 2012. Notícias. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/1487299/nova-cultivar-de-amendoim-precoce-para-o-mercado-de-oleo>>. Acesso em: 26 mar. 2020.
- EMBRAPA. *Macaúba é matéria-prima promissora para biodiesel*. 2014. Notícias. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/2329636/macauba-e-materia-prima-promissora-para-b>>. Acesso em: 3 abr. 2020.
- EMBRAPA. *Cultivares e Sementes*. 2020. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/AG01_28_168200511158.html>. Acesso em: 07 out. 2020.
- EMBRAPA. *Girassol*. 2020. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/girassol>>. Acesso em: 21 mar. 2020.

EMBRAPA. *Zoneamento agroecológico*. 2020. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/tema-zoneamento-agroecologico/perguntas-e-respostas>>. Acesso em: 24 set. 2020.

ENCARNAÇÃO, A. P. G. *Geração de biodiesel pelos processos de transesterificação e hidroesterificação, uma avaliação econômica*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - UFRJ, 2008. Disponível em: <<http://www.tpqb.eq.ufrj.br/download/biodiesel-via-trans-e-hidroesterificacao.pdf>>. Acesso em: 02 dez. 2019.

EPA. *A Comprehensive Analysis of Biodiesel Impacts on Exhaust Emissions*. United States, 2002. Disponível em: <<https://www.epa.gov/moves/biodiesel-emissions-analysis-program>>. Acesso em: 04 mar. 2020.

EPA. *Notice of Opportunity To Comment on an Analysis of the Greenhouse Gas Emissions Attributable to Production and Transport of Cotton (Gossypium spp.)*. United States, 2015. Disponível em: <<https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2015-07-14/pdf/2015-17262.pdf>>. Acesso em: 04 jul. 2020.

EPE. *Análise de conjuntura dos biocombustíveis ano 2017*. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-.>> Acesso em: 04 maio. 2020.

EPE. *Potencial dos Recursos Energéticos no Horizonte 2050*. Brasília, 2018. MME/EPE. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-2050>>. Acesso em: 25 fev. 2020.

EPE. *Análise de conjuntura dos biocombustíveis ano 2019*. Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/analise-de-conjuntura-dos-biocombustiveis-2019>>. Acesso em: 04 ago. 2020.

EPE. *Balanco Energético Nacional 2020: Ano Base 2019*. Rio de Janeiro, 2020. MME/EPE. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2020>>. Acesso em: 20 set. 2020.

EPE. *Plano Decenal de Expansão de Energia 2029*. Rio de Janeiro, 2020. MME/EPE. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2029>>. Acesso em: 25 fev. 2020.

EU-COMMISSION et al. Directive 2003/30/EC of the European Parliament and of the Council of 8 May 2003 on the promotion of the use of biofuels or other renewable fuels for transport. *Official Journal of the European Union*, v. 5, p. 42–46, 2003.

FANG, Z. (Ed.). *Biodiesel - Feedstocks, Production and Applications*. [S.l.]: InTech, 2012.

FAO et al. *Price Volatility in Food and Agricultural Markets: Policy Responses*. Roma, 2011. Disponível em: <http://www.fao.org/fileadmin/templates/est/Volatility/Interagency_Report_to_the_G20_on_Food_Price_Volatility.pdf>. Acesso em: 16 abr. 2020.

FAO et al. *The state of food security and nutrition in the world : safeguarding against economic slowdowns and downturns*. Rome: FAO, 2019. ISBN 9789251315705.

- FAOSTAT. *Crops. 2018*. 2018. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/es/#data/QI>>. Acesso em: 26 mar. 2020.
- FAVARO, S. P. et al. *Armazenamento e processamento da macaúba: contribuições para manutenção da qualidade e aumento do rendimento de óleo da polpa*. Brasília, DF, 2018. EMBRAPA (ISSN 2177-0395). Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/186831/1/BPD-16-CNPAAE.pdf>>. Acesso em: 2 abr. 2020.
- FAVARO, S. P. et al. Oleaginous Biomass for Biofuels, Biomaterials, and Chemicals. In: *Biomass and Green Chemistry*. [S.l.]: Springer International Publishing, 2017. p. 31–68.
- FERNÁNDEZ-COPPEL, I. A. et al. Life cycle analysis of macauba palm cultivation: A promising crop for biofuel production. *Industrial Crops and Products*, Elsevier BV, v. 125, p. 556–566, dec 2018.
- FGVENERGIA. *Biocombustíveis*. Rio de Janeiro, 2017. Ano 4. Disponível em: <https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/caderno_biocombustivel_-_baixa.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2020.
- FLAMMINI, A. *Biofuels and the underlying causes of high food prices*. Roma, 2008. GBEP-FAO.
- FREIRE, F. das C. O. *Alternaria helianthi Associada a folhas de cártamo no Estado do Ceará*. Fortaleza, CE, 2009. EMBRAPA (ISSN1679-6535). Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/659089/1/cot141.pdf>>. Acesso em: 04 jun. 2020.
- FRITSCHÉ, U. R. et al. Sustainable bioenergy: key criteria and indicators. *Final D Delivery of the Biomass Futures Project Funded by Intelligent Energy Europe*, v. 4.1, 2012.
- GALLO, W. L. R. Perspectivas para el biodiesel en Centroamérica: Costa Rica, El Salvador, Guatemala y Honduras (Convenio CEPAL). n. LC/MX/L.791, ago. 2007.
- GLOBAL BIOENERGY PARTNERSHIP. *The Global Bioenergy Partnership Sustainability Indicators for Bioenergy*. Rome, Italy: Global Bioenergy Partnership FAO, 2011. First edition. Disponível em: <https://rsb.org/wp-content/uploads/2020/06/RSB-STD-01-001_Principles_and_Criteria-DIGITAL.pdf>. Acesso em: 13 oct. 2020.
- GERBENS-LEENES, W.; HOEKSTRA, A. Y.; MEER, T. H. van der. The water footprint of bioenergy. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 106, n. 25, p. 10219–10223, jun 2009.
- HILL, J. et al. Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 103, n. 30, p. 11206–11210, jul 2006.
- HIRAKURI, M. H. et al. *Indicadores de sustentabilidade da cadeia produtiva da soja no Brasil*. Londrina, Pr, 2014. EMBRAPA (ISSN 2176-2937). Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/990556/indicadores-de-sustentabilidade-da-cadeia-produtiva-da-soja-no-brasil>>. Acesso em: 14 jul. 2020.

- HIRAKURI, M. H.; LAZZAROTO, J. J. *O agronegócio da soja nos contextos mundial e brasileiro*. Londrina, Pr, 2014. EMBRAPA (ISSN 2176-2937). Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/104753/1/O-agronegocio-da-soja-nos-contextos-mundial-e-brasileiro.pdf>>. Acesso em: 14 mar. 2020.
- IBGE. *Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura*. 2018. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pevs/quadros/brasil/2018>>. Acesso em: 07 maio 2020.
- IRIARTE, A.; VILLALOBOS, P. Greenhouse gas emissions and energy balance of sunflower biodiesel: Identification of its key factors in the supply chain. *Resources, Conservation and Recycling*, Elsevier BV, v. 73, p. 46–52, apr 2013.
- ISGA. *Manual de melhores práticas agrícolas*. [S.l.], 2010.
- JBIC. *Estudo prospectivos para fomento dos biocombustíveis no Brasil*. Brasília, 2006. MAPA.
- JONGSCHAAP, R. E. E. et al. The water footprint of bioenergy from jatropha curcas l. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 106, n. 35, p. E92–E92, aug 2009.
- KAMIYAMA, A. *Agricultura sustentável*. São Paulo: Governo do Estado de São Paulo, Secretaria do Meio Ambiente, Coordenadoria de Biodiversidade e Recursos Naturais, 2014. (II). 2a reimpressão. ISBN 9788586624841.
- KNOTHE, G. Historical perspectives on vegetable oil-based diesel fuels. *Inform - International News on Fats, Oils and Related Materials*, v. 12, p. 1103–1106, nov. 2001.
- KNOTHE, G. Biodiesel: Current Trends and Properties. *Topics in Catalysis*, Springer Science and Business Media LLC, v. 53, n. 11-12, p. 714–720, apr 2010.
- KUMAR, N. et al. Optimization of safflower oil transesterification using the Taguchi approach. *Petroleum Science*, Springer Science and Business Media LLC, v. 14, n. 4, p. 798–805, sep 2017.
- LAVIOLA, B. *BRJATROPHA: pesquisa, desenvolvimento e inovação em pinhão-mansão para produção de biodiesel*. Brasília, DF, 2011.
- LAVIOLA, B. G.; RODRIGUES, E. V. (Ed.). *Pinhão-mansão: pesquisas, conhecimentos e práticas*. Brasília: Embrapa, 2019. ISBN 978-85-7035-925-4.
- LICHSTON, J. E. et al. Biodiesel de Cártamo: por um sertão verde e produtivo. In: *VII Congresso da Rede Brasileira de Tecnologia e Inovação de Biodiesel*. Florianópolis, SC: [s.n.], 2019. p. 558–559. Anais.
- LIMA, J. R. de O. et al. Biodiesel de babaçu (*Orbignya sp.*) obtido por via etanólica. *Química Nova*, FapUNIFESP (SciELO), v. 30, n. 3, p. 600–603, jun 2007.
- LIU, B.; BENSON, A. Winter safflower biodiesel: a green biofuel for the southern high plains. Unknown, 2011.

LUQUE, R. *Advances in biodiesel production : processes and technologies*. Oxford: Woodhead Pub Ltd, 2012. ISBN 9780857095862.

MAHMUDUL, H. et al. Production, characterization and performance of biodiesel as an alternative fuel in diesel engines – a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier BV, v. 72, p. 497–509, may 2017.

MAPA. *Benefícios ambientais da produção e do uso do biodiesel*. Brasília, 2014. MAPA/ACS.

MAPA. *Anuário Estatístico da Agroenergia 2014*. Brasília, 2015. Secretaria de Produção e Agroenergia.

MAPA. *Usos de biodiesel no Brasil e no mundo*. Brasília, 2015. MAPA/ACE.

MAPA. *Diagnóstico da Produção Sustentável da Palma de Óleo no Brasil*. Brasília, 2018. MAPA/ACE.

MARQUES, J. F.; SKORUPA, L. A.; FERRAZ, J. M. G. *Indicadores de sustentabilidade em agroecossistemas*. Jaguariuna: Embrapa Meio Ambiente, 2003. ISBN 85-85771-23-2.

MATSUURA, M. I. da S. F. et al. Renovacalc: A Calculadora do programa RenovaBio. In: *VI Congresso Brasileiro Sobre Gestão do Ciclo de Vida*. Brasília: [s.n.], 2018. p. 162–167. Anais.

MATTEI, L. Programa Nacional para Produção e Uso do Biodiesel no Brasil (PNPB): trajetória, situação atual e desafios. *Revista Econômica do Nordeste*, v. 41, n. 4, p. 731–740, 2010.

MCBRIDE, A. C. et al. Indicators to support environmental sustainability of bioenergy systems. *Ecological Indicators*, Elsevier BV, v. 11, n. 5, p. 1277–1289, sep 2011.

MEHER, L.; SAGAR, D. V.; NAIK, S. Technical aspects of biodiesel production by transesterification—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier BV, v. 10, n. 3, p. 248–268, jun 2006.

MEKONNEN, M. M.; HOEKSTRA, A. Y. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences*, Copernicus GmbH, v. 15, n. 5, p. 1577–1600, may 2011.

MENDES, A. P. do A.; COSTA, R. C. da. Mercado brasileiro de biodieseles perspectivas futuras. *BNDES Setorial*, n. Biocombustíveis, p. 253–280, 2010.

MME. *Nota explicativa sobre a proposta de criação da política nacional de biocombustíveis*. 2017. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/36224/459938/NotaExplicativaRENOVABIO-DocumentodeCONSOLIDACAO-site.pdf/dc4b6756-d7ca-ab6a-4aac-226c4b8bf436?version=1.0>>. Acesso em: 04 maio. 2020.

MME. *Programa Renovabio: Perguntas e Respostas*. 2017. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/36224/459914/P&R-RenovaBio.pdf/15053f36-eb31-3ed4-04b4-8b0775fc8e82>>. Acesso em: 04 maio. 2020.

MME. *Relatório de consolidação dos testes e ensaios para validação da utilização de Biodiesel B15 em motores e veículos*. Brasília, 2019. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/20182/6a5a7ec6-c930-9d41-c737-04d52814546c>>. Acesso em: 19 out. 2019.

MME. *B3 inicia comercialização do Crédito de Descarbonização do RenovaBio*. 2020. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/todas-as-noticias/-/asset_publisher/pdAS9IcdBICN/content/b3-inicia-comercializacao-do-credito-de-descarbonizacao-do-renovabio>. Acesso em: 23 maio. 2020.

MORANDI, M. A. B. RenovaCalc eficiência para o biodiesel. In: *VII Congresso da Rede Brasileira de Tecnologia e Inovação de Biodiesel*. Florianópolis, SC: [s.n.], 2019. Palestra.

MORETTI, R. R. *Mistura diesel, biodiesel e etanol anidro: uma possibilidade para reduzir o custo de produção da cadeia da cana-de-açúcar*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP, 2013. Disponível em: <<http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/264671>>. Acesso em: 23 ago. 2019.

MORI, C. D.; TOMM, G. O.; FERREIRA, P. E. P. *Aspectos econômicos e conjunturais da cultura da canola no mundo e no Brasil*. Passo Fundo, RS, 2014. EMBRAPA (ISSN 1518-6512). Disponível em: <<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/103763/1/2014-documentos-online149.pdf>>. Acesso em: 19 mar. 2020.

MOSER, B. R. Biodiesel production, properties, and feedstocks. *In Vitro Cellular & Developmental Biology - Plant*, Springer Science and Business Media LLC, v. 45, n. 3, p. 229–266, mar 2009.

MOTTA, P. E. F. da et al. Ocorrência da macaúba em Minas Gerais: relação com atributos climáticos, pedológicos e vegetacionais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, FapUNIFESP (SciELO), v. 37, n. 7, p. 1023–1031, jul 2002.

NOGUEIRA, L. A. Does biodiesel make sense? *Energy*, Elsevier BV, v. 36, n. 6, p. 3659–3666, jun 2011.

OECD/FAO. *OECD-FAO Agricultural Outlook 2019-2028*. Roma: OECD Publishing, 2019. Paris/Food and Agriculture Organization of the United Nations. ISBN 9789264312463.

PINHO, L. de A. *Barreiras à diversificação de matérias-primas usadas na produção de biodiesel no Brasil*. Tese (phdthesis) — Universidade Federal da Bahia, Escola de Administração, Salvador, BA, 2015. Disponível em: <<http://repositorio.ufba.br/ri/handle/ri/23879>>. Acesso em: 1 jul. 2020.

RAMALHO FILHO, A. et al. (Ed.). *Zoneamento agroecológico, produção e manejo da cultura de palma de óleo na Amazônia*. Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Solos, 2010. ISBN 978-85-85864-34-7.

RAMALHO, H. F.; SUAREZ, P. A. Z. A química dos óleos e gorduras e seus processos de extração e refino. *Revista Virtual de Química*, Sociedade Brasileira de Química (SBQ), v. 5, n. 1, p. 2–15, 2013. ISSN 1984-6835.

RAMOS, L. P. et al. Biodiesel: Matérias-Primas, Tecnologias de Produção e Propriedades Combustíveis. *Revista Virtual de Química*, Sociedade Brasileira de Química (SBQ), v. 9, n. 1, p. 317–369, 2017. ISSN 1984-6835.

REN21. *Renewables 2020 Global Status Report*. 2020. Paris: REN21 Secretariat.

RIBEIRO, C. H. *RENOVAECO: Um modelo para o Renovabio*. 2019. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=zfSIYO8HafM&t=533s>>. Acesso em: 27 maio. 2020.

RIMPPI, H. et al. Sustainability criteria and indicators of bioenergy systems from steering, research and finnish bioenergy business operators' perspectives. *Ecological Indicators*, Elsevier BV, v. 66, p. 357–368, jul 2016.

ROCHA, M. H. et al. Life cycle assessment (LCA) for biofuels in Brazilian conditions: A meta-analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 37, p. 435 – 459, 2014. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211400361X>>.

RODRIGUES, H. de S. *Obtenção de ésteres etílicos e metílicos, por reações de transesterificação, a partir do óleo da palmeira Latino Americana macaúba - Acrocomia aculeata*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, Agencia USP de Gestao da Informacao Academica (AGUIA), 2007.

RODRIGUES, L. G. da S. M. et al. Amendoim (*Arachis sp.*) como fonte na matriz energética brasileira. *Journal of bioenergy and food science*, Instituto Federal do Amapa, v. 3, n. 3, p. 178–190, sep 2016.

ROUNDTABLE ON SUSTAINABLE BIOFUELS. *RSB Principles & Criteria*, v. 3, n. RSB-STD-01-001. Roundtable on Sustainable Biomaterials (RSB)., 2016. Disponível em: <https://rsb.org/wp-content/uploads/2020/06/RSB-STD-01-001_Principles_and_Criteria-DIGITAL.pdf>. Acesso em: 13 oct. 2020.

SADROLHOSSEINI, A. R. et al. Physical Properties of Normal Grade Biodiesel and Winter Grade Biodiesel. *International Journal of Molecular Sciences*, MDPI AG, v. 12, n. 4, p. 2100–2111, mar 2011.

SAMPAIO, R. M. *Biodiesel no Brasil: capacidades estatais, P&D e inovação na Petrobras Biocombustível*. Dissertação (phdthesis) — Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências, Campinas, SP, 2017. Disponível em: <<http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/324985>>. Acesso em: 1 set. 2019.

SANDEFUR, H. et al. Chapter 13 - Peanut Products as a Protein Source: Production, Nutrition, and Environmental Impact. In: NADATHUR, S. R.; WANASUNDARA, J. P.; SCANLIN, L. (Ed.). *Sustainable Protein Sources*. San Diego: Academic Press, 2017. p. 209 – 221. ISBN 978-0-12-802778-3. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128027783000135>>.

SCHMIDT, J. H. Life cycle assessment of five vegetable oils. *Journal of Cleaner Production*, v. 87, p. 130 – 138, 2015. ISSN 0959-6526. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652614010518>>.

- SEMBRAE. *Biodiesel*. [S.l.], 2007. 1 Edição. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/NT00035116_000gihb7tn102wx5ok05vadr1szzvy3n.pdf>. Acesso em: 25 out. 2019.
- SILVA, G. C. R.; ANDRADEO, M. H. C. de. Extração dos óleos do fruto da macaúba no norte de Minas Gerais: rota de processamento e viabilidade econômica. *Rev. de Economia Agrícola Economia Agrícola*, v. 61, n. 1, p. 23–34, 2014.
- SOUZA, G. *Bioenergy & sustainability: bridging the gaps*. Paris Cedex: Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE, 2015. ISBN 9782954555706.
- SOUZA, S. P.; SEABRA, J. E. A.; NOGUEIRA, L. A. H. Feedstocks for biodiesel production: Brazilian and global perspectives. *Biofuels*, Informa UK Limited, v. 9, n. 4, p. 455–478, jan 2017.
- SUAREZ, P. A. Z.; MENEGHETTI, S. M. P. 70^o aniversário do biodiesel em 2007: evolução histórica e situação atual no brasil. *Química Nova*, FapUNIFESP (SciELO), v. 30, n. 8, p. 2068–2071, 2007.
- THE WORLD BANK. *Commodity Markets Outlook*. Washington, DC, 2020. Disponível em: <<https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/33624/CMO-April-2020.pdf>>. Acesso em: 01 out. 2020.
- TIMMER, C. P. *Causes of High Food Prices*. Filipinas, 2008. ADB Economics Working Paper.
- TRIDGE. *Overview of global safflower seed market*. 2020. Disponível em: <<https://www.tridge.com/intelligences/safflower-seed>>. Acesso em: 007 jul. 2020.
- UBRABIO. *Futuro do biodiesel passa por políticas compensatórias para complexo soja*. 2017. Disponível em: <<https://ubrablo.com.br/2018/11/05/futuro-do-biodiesel-passa-por-politicas-compensatorias-para-complexo-soja/>>. Acesso em: 07 abr. 2020.
- UFOP. *UFOP Report on Global Market Supply 2018/2019*. Berlin, 2019. Agricultural Market Information Company (AMI). Disponível em: <https://www.ufop.de/files/4815/4695/8891/WEB_UFOP_Report_on_Global_Market_Supply_18-19.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2020.
- USDA. *Oilseeds: World Markets and Trade*. 2020. Disponível em: <<https://apps.fas.usda.gov/psdonline/app/index.html#/app/downloads>>. Acesso em: 09 mar. 2020.
- USDOE. *Biodiesel Handling and Use Guide*. [S.l.], 2016. Disponível em: <https://afdc.energy.gov/files/u/publication/biodiesel_handling_use_guide.pdf>. Acesso em: 24 mar. 2020.
- UUSITALO, V. et al. Carbon footprint of renewable diesel from palm oil, jatropha oil and rapeseed oil. *Renewable Energy*, Elsevier BV, v. 69, p. 103–113, sep 2014.
- VAZ, S. (Ed.). *Biomass and Green Chemistry*. [S.l.]: Springer International Publishing, 2018.

VENTURA, D. A. M. F.; ALVES, K. B.; SANTOS, M. K. V. A. dos. Análise comparativaentre o biodiesel de girassol e o biodiesel de mamona. In: Congresso Brasileiro de Mamona e I Simpósio Internacional de Oleaginosas Energéticas. *IV Congresso Brasileiro de Mamona e I Simpósio Internacional de Oleaginosas Energéticas*. João Pessoa, PB: Porths Eventos, 2010. Anais.

WALTER, A. O Mercado Internacional de Etanol: que papel cabe ao Brasil? In: *Pontes entre o Comércio e o Desenvolvimento Sustentável*. Brasil: Fundação Getúlio Vargas, 2007. v. 3, n. 5.

Apêndice A

Apêndice

O objetivo desse apêndice é apresentar a construção dos diagramas de extremos e quartis (DEQ) a partir dos dados ou variáveis relacionadas a cada indicador, baseados no levantamento bibliográfico e nos sites da internet para avaliar as das dez oleaginosas não convencionais para a produção de biodiesel apresentadas neste trabalho.

O DEQ (Figura A.1), compõe-se de cinco medidas estatísticas da coleção de dados: o valor mínimo (mín), o 1.º quartil ($Q1$); o 2.º quartil ($Q2$ ou mediana); o 3.º quartil ($Q3$) e o valor máximo (máx).

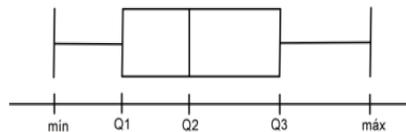


Figura A.1: Diagrama de extremos e quartis

A.1 DEQ para os indicadores técnicos, econômicos e ambientais

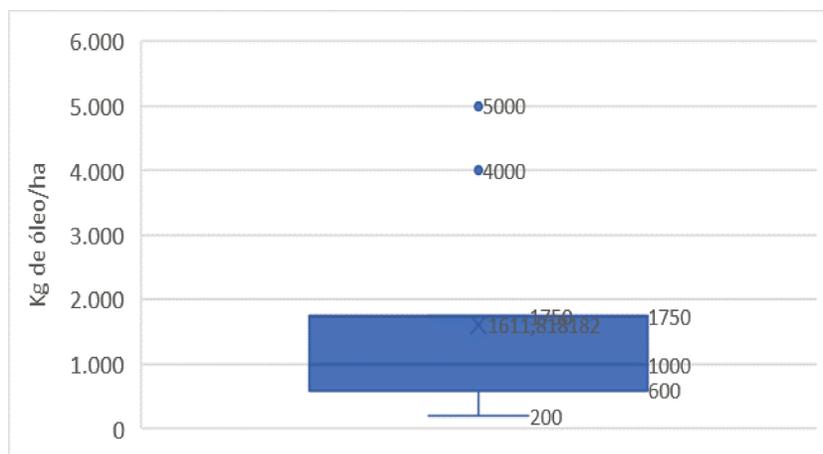


Figura A.2: Distribuição dados indicador técnico 1. Produtividade esperada do óleo

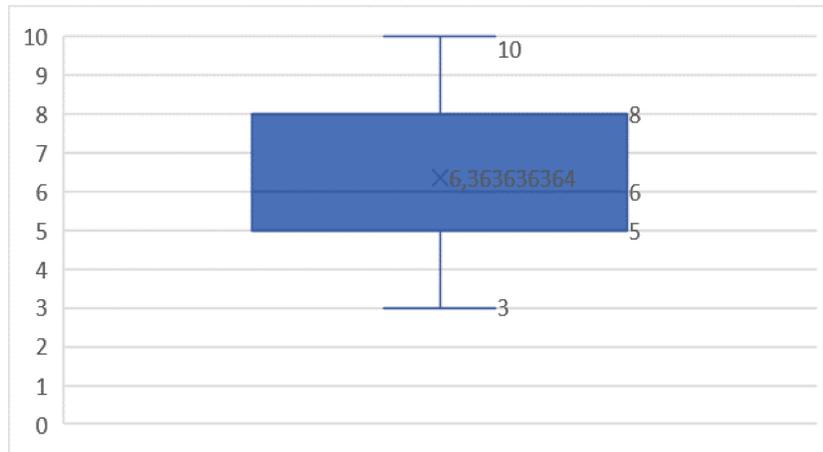


Figura A.3: Distribuição dados indicador técnico 2. Nível de domínio tecnológico agrícola

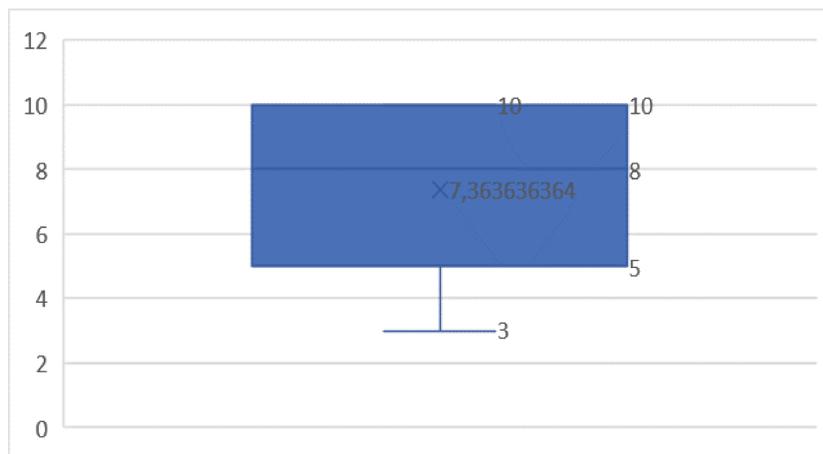


Figura A.4: Distribuição dados indicador técnico 3. Nível de domínio tecnológico industrial

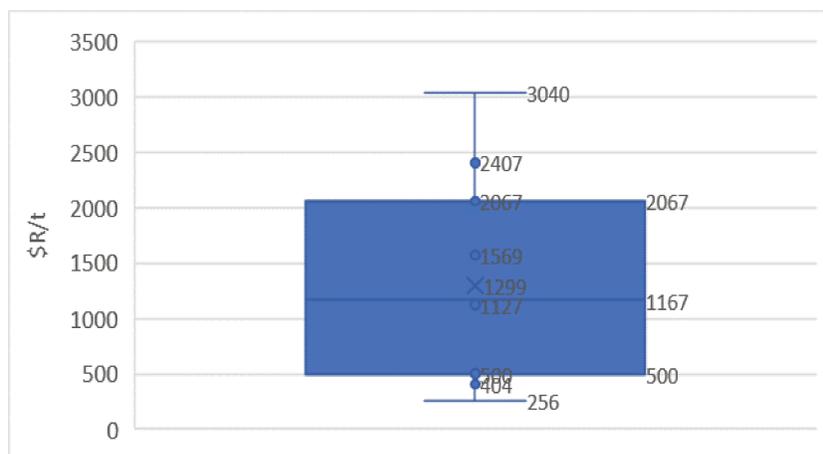


Figura A.5: Distribuição dados indicador econômico 1. Preço da oleaginosa

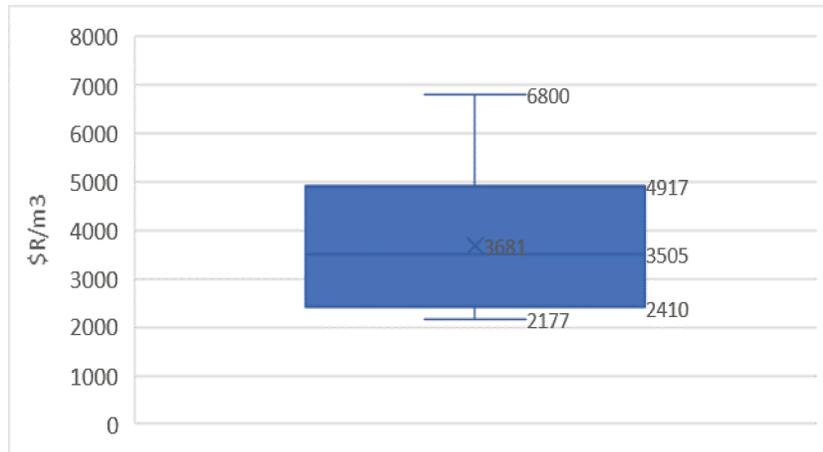
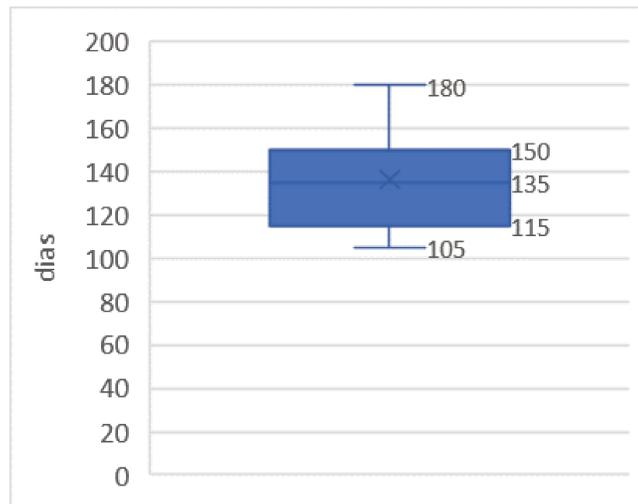
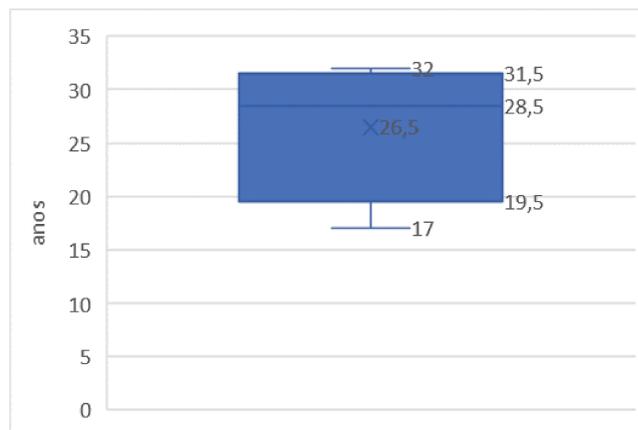


Figura A.6: Distribuição dados indicador econômico 2. Preço do óleo vegetal



(a) Ciclo de cultivar para espécies anuais



(b) Ciclo de cultivar para espécies perenes

Figura A.7: Distribuição dados indicador econômico 4. Ciclo de cultivar

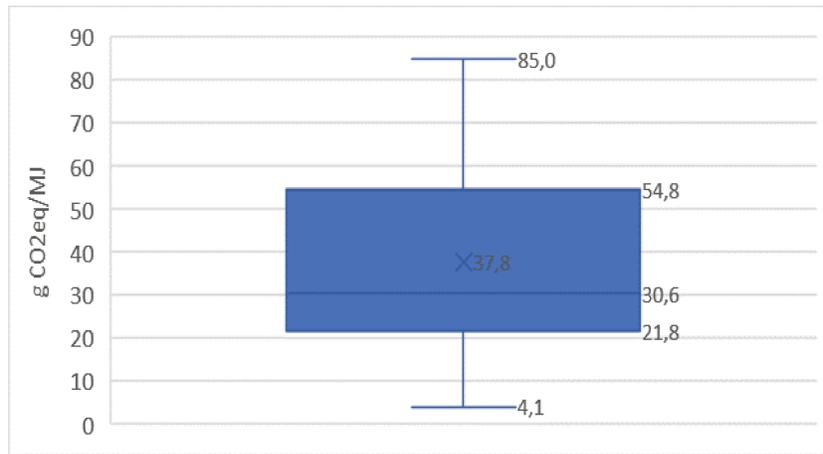


Figura A.8: Distribuição dados indicador ambiental 1. Fator de emissão de gCO₂eq/MJ

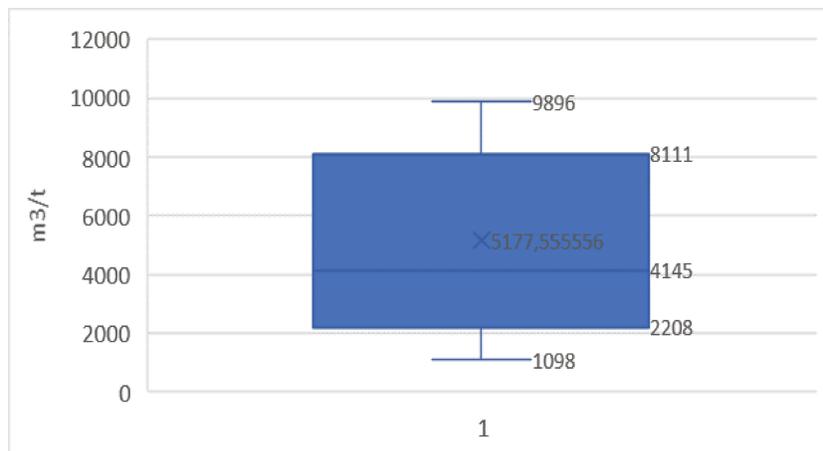


Figura A.9: Distribuição dados indicador ambiental 5. Pegada hídrica parte agrícola