

RESÍDUOS NO ÂMBITO DO RENOVABIO:

Revisão de literatura

AGOSTO/2025

RESÍDUOS NO ÂMBITO DO RENOVABIO: Revisão de Literatura

EQUIPE DE SUPERVISÃO EMBRAPA

Nilza Patrícia Ramos
Marília Ieda da Silveira Folegatti
Anna Leticia M T Pighinelli

EQUIPE i17

Alessandro Sanches Pereira
Vanice Nakano
Karina Guedes Cubas Amaral
Camila Ester Hollas
Leidiane Ferronato Mariani

EQUIPE ANP

Maria Auxiliadora de Arruda Nobre;
Joana Borges da Rosa;
Cristiane Mascarenhas da Silva Sampaio

Avisos e Orientações:

O Instituto 17, em parceria com a Embrapa Meio Ambiente, apresenta uma proposta para a definição de resíduos no contexto do RenovaBio. Este relatório constitui os resultados preliminares do estudo conduzido pelo Instituto 17, sob a supervisão técnica da Embrapa Meio Ambiente, e está sujeito a atualizações e revisões.

A decisão final sobre o conteúdo a ser publicado é uma responsabilidade conjunta da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) e da Embrapa Meio Ambiente. Assim, torna-se imprescindível a realização de uma revisão rigorosa e criteriosa do material por ambas as instituições antes de sua publicação efetiva.

Todas as indicações, dados e resultados deste estudo foram compilados e cuidadosamente revisados pelos autores. Nem o Instituto 17 nem os autores podem ser responsabilizados por qualquer reivindicação, perda ou prejuízo direto ou indireto resultante do uso ou confiança depositada sobre as informações contidas neste estudo, ou diretamente resultante de eventuais erros, imprecisões ou omissões de informações nele presentes.

Agosto/2025.



Sumário

Parte 1: Revisão da legislação brasileira e internacional, protocolos relacionados a resíduos e biocombustíveis e calculadoras existentes	4
1. Introdução E Contextualização	5
2. A Resolução N° 758/2018	6
3. Conceito de resíduos / material reciclável na abordagem <i>cut-off</i> do ecoinvent	7
4. Conceitos internacionais.....	11
4.1 Diretrizes europeias	11
4.1.1 RED II e RED III	11
4.1.2 Diretiva 2008/98/CE	15
4.2 Estados Unidos: Clean Air Act.....	16
4.2.1 Renewable Fuel Standard (RFS).....	17
4.4 Calculadoras disponibilizadas pelo Conselho de Recursos Atmosféricos da Califórnia ..	21
4.4.1 Biodiesel	23
4.4.2 Biometano de esterco de laticínios e suínos.....	24
4.4.3 Biometano de lodo de estação de tratamento de efluentes	24
4.4.4 Biometano de aterros sanitários	24
4.4.5 Biometano de resíduos orgânicos (Biodigestor).....	25
4.4.6 Combustíveis hidroprocessados de ésteres e ácidos graxos (HEFA).....	25
4.4.7 Etanol de milho e sorgo	26
4.4.8 Etanol de cana de açúcar	26
4.3 Canadá: Clean Fuel Regulations - SOR/2022-140	27
4.3.1 Fuel LCA Model.....	29
4.4 Organizações Internacionais	36
4.4.1 Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA)	36
4.4.2 International Maritime Organization (IMO).....	40
4.5 Sistemas internacionais para classificação de produtos.....	41
4.5.1 Sistema Internacional de Declaração Ambiental de Produto (Environmental Product Declaration - EPD)	41
4.5.2 Product Environmental Footprint Category (Europa)	42
5. Visão geral das principais diretrizes	45
6. Principais considerações e conclusões.....	51
Parte 2: Estudo do impacto que a mudança de conceito (resíduo / reciclável / subproduto) causa no renovabio e proposta de uma árvore de decisão.....	52
1. Introdução e Contextualização	52

2. Classificações de Matérias-Primas para Biocombustíveis nas Resoluções Internacionais e a Resolução Nº 758/2018	53
3. Lista de possíveis resíduos – consulta à ANP	60
4. Taxonomia para classificação de matéria-prima	65
4.1 Aplicação da árvore de decisão	73
4.1.1 Bagaço de cana de açúcar	73
4.2.2 Vinhaça de cana de açúcar	75
4.2.3 Sebo bovino.....	78
4.2.4 DDGs	79
4.2.5 Óleo técnico de milho – TCO	81
4.2.6 Silicato de Cálcio e Magnésio – corretivo de solo.....	82
4.2.7 Dejetos animais.....	83
4.2.8 Resíduos de alimentos em geral.....	84
4.2.9 Resíduos sólidos orgânicos de processos industriais com origem biológica.....	84
4.2.10 Caroço de algodão.....	85
5. Conclusões.....	86
7. Referências	87
ANEXOS.....	91

Parte 1: Revisão da legislação brasileira e internacional, protocolos relacionados a resíduos e biocombustíveis e calculadoras existentes

1. Introdução E Contextualização

O uso de biocombustíveis tem crescido significativamente nos últimos anos, impulsionado por políticas públicas e mandatos regulatórios que incentivam sua adoção em diversos países. Metas ou mandatos volumétricos, como os mandatos de mistura, são amplamente utilizados para fomentar mercados e apoiar investimentos no setor. Globalmente, a mistura de biocombustíveis já alcança aproximadamente 6% em termos volumétricos, com variações entre 4% na Índia e 27% no Brasil. As metas de médio prazo para biocombustíveis diferem substancialmente entre países, variando em ambição e tipo de abordagem. Em muitas economias avançadas, essas metas são estabelecidas com base na redução da intensidade de gases de efeito estufa (GEE), como no Padrão de Combustível de Baixo Carbono da Califórnia (LCFS), nos Regulamentos de Combustível Limpo do Canadá (CFR) e na Diretiva de Energia Renovável da União Europeia (RED) (IEA, 2024).

No Brasil, a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), instituída pela Lei 13.576/2017 (Brasil, 2017), visa promover a expansão sustentável dos biocombustíveis na matriz energética, com foco na redução das emissões de GEE. Entre os principais pilares do RenovaBio estão a melhoria da eficiência energética e a descarbonização, tanto na produção quanto no uso de biocombustíveis, por meio de um mecanismo de mercado (créditos de descarbonização) com base no cálculo da intensidade de carbono (IC) de cada combustível utilizando a avaliação de ciclo de vida.

As duas etapas mais importantes do ciclo de vida do biocombustível são a produção e a conversão da matéria-prima. Quando uma matéria-prima é derivada de um resíduo ou desperdício, ela pode levar a uma intensidade de carbono muito baixa para o combustível resultante (Ro; Zhang; Kendall, 2023). Embora as matérias-primas cultivadas para fins específicos ou dedicadas à energia provavelmente sejam importantes para atingir a meta dos biocombustíveis, elas normalmente fornecem apenas reduções incrementais na intensidade de carbono e, portanto, os combustíveis produzidos a partir de resíduos ou matérias-primas residuais provavelmente serão necessários para atingir IC baixo, neutro ou até mesmo negativo.

A utilização de resíduos ou matérias-primas residuais como biocombustível ou combustível alternativo permite que a IC seja reduzida, pois o cálculo, frente a ser considerada, da IC varia de acordo com a designação da matéria-prima. Na ACV, quando mais de um produto ou serviço é gerado a partir de um processo, é necessário algum método para determinar como atribuir fluxos ambientais entre os produtos e serviços resultantes. Esse método é chamado de método de alocação e varia dependendo da designação de uma matéria-prima, bem como do escopo aplicado a uma matéria-prima. De acordo com a ISO 14040 (ISO, 2006), a alocação se refere a um método para dividir as entradas e saídas de um processo ou sistema entre o sistema de produto de interesse e um ou mais sistemas. Quando um coproduto é gerado a partir de um sistema de produção, é necessário particionar ou dividir os fluxos ambientais de forma equitativa e consistente entre os produtos ou serviços. No entanto, a ISO 14040 não especifica uma taxonomia mais completa para coprodutos, o que significa que não há uma distinção clara entre coprodutos, subprodutos, resíduos ou dejetos (Ro; Zhang; Kendall, 2023).

Nesse sentido, a classificação das matérias-primas (biomassa) utilizadas na produção dos biocombustíveis no contexto do RenovaBio é crucial para o cálculo da intensidade de carbono e, consequentemente, para a descarbonização do setor, no caso da utilização da abordagem *cut off* do ecoinvent. Para essa abordagem, no caso da matéria-prima (biomassa) ser caracterizada como “reciclável”, não lhe são atribuídas as emissões de gases causadores de efeito estufa (GEE) referentes a sua geração e somente são contabilizadas as **emissões ocorridas a partir do seu recolhimento e transporte até a unidade de processamento, sendo** contabilizada uma intensidade de carbono menor e melhorando a Nota de Eficiência Energético-Ambiental.

Por exemplo, as matérias-primas residuais ou de resíduos usadas para a produção de biocombustível não recebem nenhum ônus ambiental dos processos de produção anteriores, a não **ser o transporte e qualquer pré-processamento adicional necessário antes da conversão. Essas matérias-primas podem até mesmo receber ônus evitados como créditos quando são desviadas de um processo de descarte usual com emissões de GEE não negligenciáveis**, aplicado em algumas diretrizes e calculadoras existentes, conforme demonstrado no item 4.

Atualmente, a Resolução ANP nº 758/2018 (BRASIL, 2018) estabelece os critérios para a certificação de eficiência de biocombustíveis e define uma lista de substratos reconhecidos como resíduos. Entretanto, o setor de biocombustíveis tem manifestado a necessidade de revisão e ampliação desses critérios, a fim de incluir outros tipos de biomassa não contemplados na regulamentação atual.

Este documento tem como objetivo revisar a literatura sobre o conceito de resíduos, com foco na análise dos critérios utilizados para sua classificação, conforme estabelecido pela legislação vigente. A proposta inclui o desenvolvimento de uma taxonomia detalhada e a aplicação de uma árvore de decisão para avaliar e classificar substratos como produtos primários, coprodutos, subprodutos ou resíduos. Essa abordagem busca identificar lacunas no processo de classificação, promovendo um sistema mais robusto e alinhado com os avanços tecnológicos e as demandas do setor de biocombustíveis. Essa revisão é essencial para garantir que as políticas de descarbonização do país sejam inclusivas, eficientes e compatíveis com os métodos de alocação utilizados para estimar a intensidade de carbono das matérias-primas.

2.A Resolução N° 758/2018

A Resolução ANP nº 758/2018 (BRASIL, 2018), em seu artigo 3.2, estabelece uma lista específica de biomassas reconhecidas como resíduos no âmbito do RenovaBio, definindo quais materiais podem ser utilizados para a produção de biocombustíveis, sendo:

- **Resíduos de culturas agrícolas e florestais**



- a) Palhas de cana-de-açúcar, de milho, de sorgo e de trigo;
- b) Cascas de arroz, de noz, de café e similares;
- c) Sabugo de milho; e
- d) Cascas, tocos, ramos, folhas, agulhas, copas de árvores, aparas florestais e serragem provenientes de florestas plantadas ou de florestas nativas, estas últimas desde que exploradas sob regime de Manejo Florestal Sustentável devidamente autorizado pelos órgãos competentes, conforme estabelecido na Lei nº 11.284, de 2 de março de 2006, Decreto nº 5.975, de 30 de novembro de 2006 e Instrução Normativa do Ministério do Meio Ambiente nº 5, de 11 de dezembro de 2006, ou outras que venham a surgir.

- **Resíduos de processamento**

- a) Vinhaça e outros efluentes agroindustriais;
- b) Bagaço de cana-de-açúcar e sorgo;
- c) Torta de filtro, cinzas e fuligem;
- d) Gordura animal;
- e) Outros resíduos de origem animal;
- f) Borras; e
- g) Óleo de fritura usado.

- **Outros**

- a) Dejetos animais;
- b) Cama de aviário;
- c) Resíduos de alimentos em geral;
- d) Resíduos sólidos orgânicos de processos industriais com origem biológica;
- e) Esgoto sanitário e lodo de estação de tratamento de efluentes; e
- f) Biogás de aterro sanitário.

3. Conceito de resíduos / material reciclável na abordagem *cut-off* do ecoinvent

Nos estudos de avaliação de ciclo de vida (ACV), um sistema de produto é isolado de um sistema econômico de produção no qual múltiplos produtos/funções coexistem. Muitos dos processos estudados geram mais de uma saída de produto, e outros reciclam como matéria-prima produtos intermediários ou descartados. Nestes processos, existe o desafio de particionar a

responsabilidade dos impactos ambientais gerados por processos multifuncionais entre os diferentes produtos. Este particionamento é chamado de alocação.

A abordagem de alocação utilizada na RenovaCalc é a *Cut-off*. Nesta abordagem, é efetuado um corte, que divide as cargas ambientais que devem ser atribuídas a um e outro produto (ciclo de vida). É uma abordagem simples e de fácil compreensão, bastante utilizada, recomendada pelo Sistema Internacional de Declaração Ambiental de Produto (*Environmental Product Declaration - EPD*) e pela PAS 2050 (BSI, 2011) e pelo *Greenhouse Gas Protocol* (GHG, 2011).

A base de dados ecoinvent, utilizada como fonte de fatores de emissão para os processos a jusante e a montante na RenovaCalc, tem uma biblioteca de inventários na qual é utilizada a alocação do tipo *Cut-off*. Nesta biblioteca, para que as regras de alocação possam ser aplicadas, é realizada uma **distinção entre resíduos e materiais recicláveis**. Sendo, **materiais recicláveis aqueles com pouco ou nenhum valor econômico que podem servir como insumo ou recurso para uma atividade de reciclagem; portanto, existe interesse em sua coleta**. Exemplos incluem sucatas metálicas e resíduos de papel. Já os **resíduos são materiais sem valor econômico e para os quais não existe interesse na coleta se não houver compensação**. O gerador, portanto, geralmente conta com a prestação de um serviço de coleta e descarte para seu resíduo, sendo essa prestação de serviço contratada (empresas especializadas terceirizadas de tratamento de águas residuais, solo quimicamente poluído e resíduos radioativos, por exemplo) ou coleta municipal (como de resíduo sólido urbano).

Nesta biblioteca do ecoinvent, o modelo do sistema de corte tem, em termos gerais, o efeito de que os **materiais recicláveis** são cortados (ou seja, o impacto do processo de geração é desconsiderado do sistema) quando são gerados. Para o gerador do material reciclável, enviá-lo para reciclagem significa deixar de ser responsável por toda a carga ambiental que poderia advir do processamento desse material reciclável. Por outro lado, para o reciclador, o reciclável vem livre da carga ambiental dos processos que antecedem a geração do resíduo, **responsabilizando-se pelos impactos a partir do momento que coleta e transporta este material**. Com relação aos resíduos, a carga ambiental do **tratamento de resíduos** é totalmente atribuída ao processo gerador dos resíduos, e todos os subprodutos do tratamento de resíduos, ainda que com valor econômico, ficam disponíveis sem carga ambiental. Um resumo pode ser visualizado na Tabela 1.

Tabela 1 – Diferenças na abordagem *Cut-off*, conforme classificação do substrato entre resíduo e reciclável, conforme biblioteca *Cut-off* do ecoinvent.

Classificação do substrato	Resíduo	Reciclável
Alocação da carga ambiental do transporte	Impactos são alocados ao sistema gerador do resíduo	Impactos alocados ao produto final
Alocação da carga ambiental do processo de tratamento/biodigestão	Impactos são alocados ao sistema gerador do resíduo	Impactos alocados ao produto final
Critério	Não possui valor de mercado e não há interesse na coleta sem compensação financeira.	Possui pouco ou nenhum valor de mercado, mas há interesse na coleta, mesmo sem compensação financeira, já que pode servir como insumo ou recurso para uma

		atividade de reciclagem / destinação.
--	--	--

A Tabela 2 apresenta os principais biocombustíveis catalogados na base de dados doecoinvent e evidencia como essa lógica de classificação e atribuição de impactos é aplicada às matérias-primas utilizadas em sua produção.

Tabela 2 Relação dos substratos que são utilizados para biocombustíveis e como eles são considerados no banco de dados do Ecoinvent.

Geografia		Substrato	Considerações
Biodiesel			
esterification of rape oil fatty acid methyl ester Cutoff, U	RoW	Óleo de colza (RoW)	Considera o óleo de colza como “matéria-prima” , sendo os impactos contabilizados desde a etapa agrícola, e alocados entre a glicerina e sulfato de potássio.
esterification of vegetable oils and animal fats, average mix fatty acid methyl ester Cutoff, U	BR	Caroço de algodão (GLO)	Considera o caroço de algodão como coproduto oriundo da produção de fibras de algodão, sendo contabilizado o impacto do transporte até a unidade de tratamento e o tratamento em si. Para a produção do biodiesel: metanol, eletricidade, calor e água.
		Óleo de soja (BR)	Considera o óleo de soja como “matéria-prima” , sendo contabilizado o impacto desde a etapa agrícola.
		Sebo (GLO)	Considera o sebo como “reciclável” , sendo contabilizado o impacto apenas do transporte.
esterification of palm oil fatty acid methyl ester Cutoff, U	RoW	Óleo de palma (?)	Considera o óleo de palma como “matéria-prima” , sendo o impacto contabilizado desde a etapa agrícola, e alocado entre o metil éster e a glicerina.
esterification of palm oil glycerine Cutoff, U			Considera o óleo de palma como “matéria-prima” , sendo o impacto contabilizado desde a etapa agrícola e alocado entre o metil éster e a glicerina.
Biometano			
biogas purification to biomethane by amino washing biomethane, high pressure Cutoff, U / biogas purification to biomethane by membrane technique	RoW / CH	Biogás – dejetos / esterco (RoW)	Considera o dejetos como “reciclável” , sendo contabilizado o impacto do tratamento (digestão) e transporte.
		Biogás – lodo de esgoto (RoW)	Considera o lodo de esgoto como “resíduo” , não sendo contabilizada nenhuma carga ambiental.

biomethane, high pressure Cutoff, U / biogas purification to biomethane by pressure swing adsorption biomethane, high pressure Cutoff, U		Biogás – Resíduo biológico	Considera o resíduo biológico como “ resíduo ”, não sendo contabilizada nenhuma carga ambiental.
Etanol			
Ethanol, without water, in 95% solution state, from fermentation {BR} sugarcane processing, modern annexed plant Cut-off, U	BR	Cana de açúcar (BR)	Considera a cana de açúcar como “ matéria-prima ”, sendo o impacto contabilizado desde a etapa agrícola e alocado para o açúcar e o bagaço.

Como pode ser observado na Tabela 2, a classificação dos substratos no ecoinvent varia conforme sua origem e valor econômico. Substratos orgânicos provenientes de subprodutos agroindustriais, resíduos urbanos ou dejetos animais, por não possuírem valor de mercado significativo em sua forma bruta e resultarem de processos não intencionais, são geralmente classificados como **resíduos**. Nesses casos, seguindo o princípio do "poluidor pagador", os impactos ambientais da coleta e tratamento são atribuídos ao gerador do resíduo, e os biocombustíveis produzidos a partir desses materiais são considerados isentos dessa carga ambiental inicial.

Contudo, quando tais resíduos passam a ter valor econômico e um mercado estabelecido — como ocorre com o sebo, o caroço de algodão ou o biogás proveniente de dejetos —, são reclassificados como **materiais recicláveis**. Nessa condição, os impactos ambientais são contabilizados a partir do momento da coleta, incluindo as etapas de processamento e distribuição do biocombustível.

Em contrapartida, substratos agrícolas cultivados intencionalmente para fins energéticos, como a cana-de-açúcar e o milho, são considerados **produtos de alto valor agregado**. Por essa razão, todo o seu ciclo de vida é incluído no inventário — desde o cultivo até o processamento e a distribuição final do biocombustível.

Nesse contexto, a Tabela 3 apresenta uma seleção de substratos considerados na RenovaCalc, ilustrando como a definição da fronteira do sistema varia conforme a origem do material e os critérios de alocação adotados pelo banco de dados ecoinvent.

Tabela 3. Substratos considerados na RenovaCalc e fronteira considerada na base de dados utilizada.

Biodiesel			
	Inventário	Abordagem atual RenovaCalc / Ecoinvent	Consideração
Óleo de algodão e	Cottonseed oil, refined {GLO} market for	Conceito reciclável	Transporte é considerado mesmo utilizando um

outros óleos vegetais	cottonseed oil, refined Cut-off, U		inventário de mercado (dupla contagem).
Óleo de fritura usado	“Carga zero”	Conceito reciclável	Transporte é considerado
Gordura animal	“Carga zero”	Conceito reciclável	Transporte é considerado
Outros óleos residuais	“Carga zero”	Conceito reciclável	Transporte é considerado
Etanol			
	Inventário	Abordagem atual Renovacalc / Ecoinvent	Consideração
Cana	Cálculo com dados primários	Matéria prima	
Melaço	Cálculo específico	Matéria prima	

Apesar de os óleos residuais serem classificados como **resíduos** pela Resolução nº 758/2018 da ANP, observa-se, conforme demonstrado na Tabela 3, que o óleo de algodão, de fritura, outros residuais e a gordura animal são abordados como material reciclável, sendo contabilizado as cargas desde a etapa de transporte e seu processamento. Outro ponto importante é que para o óleo de algodão e outros óleos vegetais o transporte é considerado mesmo utilizando um inventário de mercado, o que pode ocasionar dupla contagem na etapa de transporte visto que ela já considerada nesse inventário.

Esse desalinhamento entre as abordagens teóricas e as práticas aplicadas no sistema evidencia a necessidade de uma definição mais clara e criteriosa das matérias-primas utilizadas para a produção de biocombustíveis. Uma categorização mais robusta pode assegurar maior consistência metodológica, melhorar a rastreabilidade dos materiais ao longo da cadeia produtiva e atender às exigências regulatórias e de sustentabilidade, promovendo uma transição energética mais eficiente e alinhada às metas ambientais globais.

4. Conceitos internacionais

4.1 Diretrizes europeias

4.1.1 RED II e RED III

A RED II (Diretiva de Energia Renovável II), oficialmente intitulada **Diretiva (UE) 2018/2001 (2023)**, foi adotada em 11 de dezembro de 2018, com o objetivo de promover o uso de energia renovável na União Europeia. Ela estabeleceu metas para aumentar a participação das energias renováveis

no mix energético da UE, incluindo biocombustíveis, biogás e biometano. A RED II foi atualizada pela **RED III (Diretiva (UE) 2023/2413)**, aprovada em 18 de outubro de 2023, com a finalidade de acelerar o uso de energias renováveis, melhorar a eficiência energética e reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE). Um dos principais objetivos da RED III é aumentar a participação de energia renovável para pelo menos 42,5% do consumo final bruto de energia da UE até 2030.

Embora a RED III reforce metas mais ambiciosas, a RED II continua sendo a base normativa que apresenta valores e metodologias relacionados às emissões associadas ao ciclo de vida dos biocombustíveis, definindo critérios de sustentabilidade que afetam diretamente a classificação e o uso de resíduos como matérias-primas para biocombustíveis.

Tanto a RED II quanto a RED III seguem as definições estabelecidas pela **Diretiva (EU) 2008/98 (2008)** em relação a resíduos (a mesma é apresentada em maiores detalhes abaixo), subprodutos e recicláveis. Resíduos são descritos como materiais descartados, destinados à eliminação ou à reciclagem, enquanto subprodutos são materiais que resultam do processo de produção principal, mas que podem ser reaproveitados para fins secundários.

No contexto europeu, de acordo com a RED (European Commission, 2010) e a RTFO (Obrigação de Combustível Renovável para Transporte, do inglês *Renewable Transport Fuel Obligation*) (Department For Transport, 2011), a designação de resíduos e detritos é particularmente importante, porque os biocombustíveis provenientes de resíduos ou detritos são elegíveis para receber créditos duplos. Assim, tanto a RED quanto a RTFO têm definições para resíduos e dejetos.

De acordo com a RED e a RTFO, resíduo (residue) é definido como “[a]gricultura, aquicultura, pesca e resíduos florestais, e resíduos de processamento. Um resíduo de processamento é uma substância que não é o(s) produto(s) final(is) que um processo de produção busca diretamente produzir. Não é um objetivo primário do processo de produção, e o processo não foi deliberadamente modificado para produzi-lo.” (Department for Transport, 2011; European Commission, 2010).

E “lixo” (waste) é definido como qualquer substância ou objeto que o detentor descarta ou pretende ou é obrigado a descartar, mas excluindo substâncias que foram intencionalmente modificadas para serem consideradas resíduos (Department for Transport, 2011; European Commission, 2010). O RTFO também tem uma definição para produtos primários, que inclui coprodutos. Em um relatório publicado pela ICF International em 2015, intitulado “*Waste, Residue and By Product Definitions for the California Low Carbon Fuel Standard*” (ICF International, 2015), a classificação da matéria-prima depende da elasticidade da oferta e do valor da matéria-prima em comparação com os outros produtos e, portanto, é necessária uma análise econômica e da cadeia de suprimentos aprofundada para a classificação da matéria-prima (Ro; Zhang; Kendall, 2023).

A RED II, em vigor desde 2021, define critérios de sustentabilidade e de redução de emissões para biocombustíveis, biolíquidos e combustíveis fósseis, e inclui uma lista das rotas de produção dos biocombustíveis, listando as matérias-primas usadas para produção de cada biocombustível e apresentando valores *default* das emissões das diferentes etapas do ciclo de vida desses biocombustíveis, que estão apresentados no anexo IV e V. Sendo que os resíduos são classificados de basicamente duas formas:

- **Resíduos agrícolas, florestais e de processamento:** incluem resíduos agrícolas (palha, bagaço, restos de colheitas) e resíduos florestais (serragem, resíduos de poda), bem como resíduos de processamento das indústrias alimentar e madeireira.
- **Resíduos urbanos e industriais:** incluem matérias-primas tais como a fração orgânica de resíduos sólidos urbanos (RSU), lodo de estações de tratamento de esgoto, resíduos da indústria de alimentos e resíduos de óleos usados.

A RED II também diferencia resíduos agrícolas, florestais e urbanos como matérias-primas de segunda geração, que não competem com a produção de alimentos e são preferíveis em termos de impacto ambiental. O uso de resíduos e subprodutos como esses é incentivado pela diretiva para a produção de biocombustíveis avançados, promovendo uma economia circular e a sustentabilidade no setor de transportes.

De forma mais específica o anexo IX lista quais são as matérias-primas consideradas para a produção de biocombustíveis avançados, as categorizando em duas partes: **A Parte A lista as matérias-primas de resíduos e subprodutos que têm um maior impacto positivo na redução das emissões e que podem ser utilizados para cumprir as metas de biocombustíveis avançados; enquanto a Parte B contém matérias-primas que podem ser utilizadas para produção de biocombustíveis convencionais, mas com menor prioridade.** A Tabela 4 abaixo apresenta em detalhes a lista de cada matéria prima considerada em cada parte do anexo IX da Diretiva (UE) 2018/2001 (2023).

Tabela 4 Lista de matérias-primas para a produção de biocombustíveis e biogás para transporte e biocombustíveis avançados apresentadas no anexo IX da Diretiva (UE) 2018/2001 (2023).

Parte A	Parte B
a) Algas, se cultivadas em terra, em lagos naturais ou fotobiorreatores; b) Fração de biomassa de resíduos urbanos mistos, mas não resíduos domésticos separados sujeitos a metas de reciclagem nos termos do artigo 11º, nº 2, alínea a), da Diretiva 2008/98/CE; c) Bio-resíduos, na seção do artigo 3º, ponto 4, da Diretiva 2008/98/CE, das habitações, sujeitos à recolha seletiva tal como definida no artigo 3º, ponto 11, dessa diretiva; d) Fração de biomassa de resíduos industriais não apropriada para uso na cadeia alimentar humana ou animal, incluindo material da venda a retalho ou por grosso e da indústria agroalimentar e da pesca e aquicultura, e excluindo as matérias-primas enumeradas na parte B do presente anexo; e) Palha; f) Estrume animal e lamas de depuração; g) Efluentes da produção de óleo de palma e cachos de frutos de palma vazios; h) Breu de tall oil; i) Glicerina não refinada; j) Bagaço; k) Bagaços de uvas e borras de vinho; l) Cascas de frutos secos; m) Peles; n) Espigas limpas de grãos de milho; o) Fração de biomassa de resíduos provenientes da silvicultura e de indústrias conexas, tais como cascas, ramos, desbastes pré-comerciais, folhas, agulhas, copas das árvores, serradura, aparas, licor negro, licor de sulfito, lamas de fibra de papel, lenhina e tall oil; p) Outro material celulósico não alimentar; q) Outro material lignocelulósico, exceto toras de serra e toras de folheado	a) Óleos alimentares usados. b) Gorduras animais classificadas como de categorias 1 e 2 em conformidade com o Regulamento (CE) nº 1069/2009.

A RED II estabelece que todas as etapas envolvidas na produção de biocombustíveis devem ser consideradas nas estimativas de redução de emissões de GEE, incluindo todas as etapas relacionadas com a obtenção das matérias primas¹, as etapas de transporte dos resíduos/matérias primas até as plantas de produção dos biocombustíveis e distribuição do produto, as etapas de processamento², além dos benefícios decorrentes da **redução de emissões resultante da melhoria da gestão agrícola**, a contabilização anual das emissões provenientes de alterações do carbono armazenado devidas a alterações do uso do solo³, a redução de emissões resultante da captura e armazenamento geológico de CO₂⁴, e a redução de emissões resultante da captura e da substituição de CO₂ (relacionadas com a produção de combustíveis biomássicos aos quais são atribuídas e serão limitadas às emissões evitadas).

Um dos exemplos mais relevantes de como a RED II lida com a gestão de resíduos no ciclo de vida dos biocombustíveis é o manejo de resíduos animais via digestão anaeróbica para a produção de biogás e biometano. Ao usar resíduos de origem animal, como dejetos, para geração de biometano, a diretiva adota uma abordagem chamada de "**fronteira expandida**", que considera os benefícios ambientais além do simples processo de conversão. Esse conceito de fronteira expandida atribui uma bonificação significativa às emissões de GEE associadas ao processo, com uma redução de -45 g CO₂eq/MJ devido à melhor gestão agrícola e do dejetos. Isso não apenas melhora a viabilidade ambiental da produção de biometano, mas também contribui para o objetivo maior de descarbonização do setor de energia da UE.

A expansão do sistema é uma abordagem para evitar alocação sugerida pela ABNT NBR ISO 14044:2009 (ABNT, 2009a). Nesta abordagem, são incluídas as funções adicionais relacionadas aos coprodutos. Desde a publicação da norma internacional ISO 14044:2006 (ISO, 2006), praticantes de ACV enfrentam dúvidas e falta de consenso quanto à como seria realizada a expansão do sistema, a fim de evitar a alocação. Para esclarecer essa questão, a errata publicada em 2020 (ISO, 2020) introduziu uma orientação importante: o sistema de produto substituído pelo coproduto deve ser explicitamente integrado ao sistema de produto em estudo.

Na prática, os coprodutos são considerados alternativas a (substitutos de) outros produtos do mercado global, e a carga ambiental associada aos produtos substituídos é subtraída do sistema de produto em estudo. A norma trouxe, então, a expansão do sistema como um sinônimo para a prática que vinha sendo chamada de substituição (Heijungs et al., 2021).

A RED II, reforçada pela RED III, mostra que a classificação de resíduos, subprodutos e coprodutos tem implicações diretas na contabilização de emissões e na elegibilidade para incentivos regulatórios. No entanto, as definições adotadas, embora estruturantes, ainda deixam margem para interpretações, exigindo análises complementares de contexto produtivo, valor econômico e elasticidade da oferta para aplicação consistente nas cadeias de biocombustíveis.

¹ Incluem as emissões do próprio processo de extração, da colheita ou cultivo; da colheita, secagem e armazenamento de matéria-prima; de resíduos e perdas; e da produção de produtos químicos ou produtos utilizados na extração ou no cultivo. A captura de CO₂ no cultivo de matérias-primas não é considerada

² Engloba todas as demandas do processo, emissões e resíduos.

³ Em especial relacionadas as culturas energéticas.

⁴ Processo de aprisionamento de gás em formações geológicas conforme Diretiva 2009/31/CE.

4.1.2 Diretiva 2008/98/CE

Como citado no item anterior a Diretiva (EU) 2008/98 (2008) desempenha um papel central na gestão de resíduos na União Europeia, estabelecendo definições para resíduos e subprodutos, que não são claramente definidos nas REDs vigentes. **Resíduos** são definidos como qualquer substância ou objeto que o detentor deseja ou tem a obrigação de descartar. Por outro lado, **subprodutos** são materiais resultantes de processos produtivos cujo objetivo principal não é a geração desses itens. A diferenciação é crucial, pois materiais considerados subprodutos não precisam ser classificados como resíduos, desde que possam ser reutilizados diretamente, **sem a necessidade de processamento adicional** além das práticas industriais comuns, e atendam a normas rigorosas de proteção ambiental e de saúde pública. Isso garante que o aproveitamento de subprodutos seja feito de forma sustentável, sem risco de contaminação ou outros efeitos adversos.

A diretiva também aborda a transformação de resíduos em materiais não considerados resíduos após passarem por operações de valorização, como a reciclagem. Para que esse processo ocorra, ou seja, para que um material possa ser considerado como **reciclável**, são estabelecidos critérios rigorosos, como a **necessidade de existir um uso reconhecido para o material, demanda no mercado e conformidade com padrões técnicos e regulatórios**. Esses requisitos visam garantir que o material reciclado possa ser utilizado de forma segura e eficiente, sem causar danos ao meio ambiente ou à saúde. A normativa ainda prevê que, se necessário, os critérios para classificação do material como reciclável devem incluir valores-limite para os poluentes, levando em consideração eventuais efeitos ambientais adversos causados pela substância ou objeto.

No entanto, a diretiva destaca que a **reciclagem não engloba a valorização energética ou o uso de materiais como combustíveis**. Materiais reprocessados com esses fins ainda são considerados resíduos. Isso enfatiza a necessidade de estabelecer uma distinção clara entre reciclagem, que envolve o retorno de materiais à cadeia produtiva em sua forma original ou em novos produtos, e processos que simplesmente utilizam resíduos como fonte de energia. A contabilização de resíduos reciclados e valorizados só ocorre quando os critérios de reciclagem são integralmente cumpridos, assegurando que os materiais recuperados atendam aos padrões estabelecidos pela legislação.

Além de regulamentar os processos de reutilização e reciclagem, a diretiva promove o princípio do “poluidor-pagador”. Esse princípio atribui ao produtor e ao detentor de resíduos a responsabilidade pela gestão adequada desses materiais, garantindo um alto nível de proteção ambiental e de saúde pública. A hierarquia dos resíduos, outro ponto central da diretiva, orienta as práticas de gestão de acordo com uma ordem de prioridades ambientais, favorecendo a prevenção, reutilização, reciclagem e valorização, antes da disposição final. Embora essa hierarquia seja amplamente recomendada, a diretiva reconhece que, em alguns casos, fluxos específicos de resíduos podem exigir abordagens diferenciadas, justificadas por questões técnicas, econômicas ou ambientais, permitindo uma flexibilidade necessária para enfrentar desafios específicos de gestão.

4.2 Estados Unidos: Clean Air Act

A Clean Air Act (CAA) (42 U.S.C. § 7401(1970)), promulgada nos Estados Unidos em 1963, é uma das mais importantes legislações ambientais do país, com o objetivo de controlar a poluição atmosférica. Administrada pela Agência de Proteção Ambiental (EPA), a lei estabelece padrões nacionais para limitar a emissão de poluentes perigosos como o dióxido de enxofre, óxidos de nitrogênio, monóxido de carbono e partículas finas, além de abordar a poluição causada por fontes móveis, como veículo.

A CAA também aborda a questão dos biocombustíveis como parte de sua estratégia para reduzir a poluição atmosférica e mitigar as emissões de gases de efeito estufa. Em suas emendas a lei incluiu disposições que incentivam o uso de combustíveis renováveis, como etanol e biodiesel, como alternativas mais limpas aos combustíveis fósseis. A CAA define as *emissões do ciclo de vida* na seção 211(o)(1)(H) como sendo: *“a quantidade agregada de emissões de gases de efeito estufa (incluindo emissões diretas e emissões indiretas significativas como emissões de mudanças no uso da terra), conforme determinado pelo Administrador (Agência de Proteção Ambiental), relacionadas ao ciclo de vida completo do combustível, incluindo todos os estágios de produção e distribuição de combustível e matéria-prima, desde a geração ou extração de matéria-prima até a distribuição e entrega e uso do combustível acabado até o consumidor final, onde os valores de massa para todos os gases de efeito estufa são ajustados para levar em conta seu potencial de aquecimento global relativo”*.

No contexto de biocombustíveis, a CAA trata dos resíduos principalmente sob a perspectiva das **emissões associadas à produção e ao uso desses combustíveis**, mas a lei não classifica diretamente os resíduos como matéria-prima para biocombustíveis. No entanto, o conceito de resíduos relacionados a biocombustíveis é abordado indiretamente no âmbito de outras regulamentações, como o **Renewable Fuel Standard (RFS)** (EPA, 2022), que é regulamentado pela Agência de Proteção Ambiental (EPA) e foi estabelecido como parte das emendas ao Clean Air Act em 2005 e 2007. O RFS define e regulamenta o uso de **matérias-primas renováveis**, incluindo resíduos agrícolas, florestais e outros resíduos biogênicos, para a produção de biocombustíveis, sendo:

1. **Resíduos agrícolas e florestais:** como restos de colheitas ou processamento de culturas plantadas de terras agrícolas existentes e qualquer biomassa removida de terras agrícolas existentes que facilite o manejo de culturas (incluindo biomassa removida de tais terras em relação ao controle de espécies invasoras ou manejo de incêndios). Além de resíduos de madeira e árvores (Desbastes e cortes pré-comerciais de terras florestais não federais), podem ser classificados como matérias-primas para biocombustíveis.
2. **Resíduos sólidos urbanos (RSU):** a fração orgânica desses resíduos pode ser usada para produzir biocombustíveis como biogás e biometano. Além de resíduos de jardim ou restos de comida separados, incluindo gordura reciclada de cozinha e de sifão.
3. **Resíduos industriais:** subprodutos de processos industriais, como resíduos da produção de alimentos ou bebidas, também podem ser considerados para a produção de biocombustíveis.
4. **Resíduos animais e subprodutos animais.**

A classificação e uso desses resíduos para biocombustíveis são promovidos, desde que contribuam para a redução de emissões de gases poluentes e gases de efeito estufa, em conformidade com os padrões estabelecidos pelo RFS, que se alinha aos objetivos da CAA de melhorar a qualidade do ar.

4.2.1 Renewable Fuel Standard (RFS)

A Agência de Proteção Ambiental (EPA) foi incumbida de estabelecer padrões e regulamentações para o uso de combustíveis renováveis, como o *Renewable Fuel Standard* (RFS) (EPA, 2022), que determina volumes mínimos de biocombustíveis a serem misturados à gasolina e ao diesel. Sendo que a análise de ciclo de vida da EPA para o Padrão de Combustíveis Renováveis abrange emissões provenientes da produção e transporte da matéria-prima, produção e distribuição do combustível, e uso final (Figura 1). A soma dessas emissões é comparada às do combustível fóssil equivalente, para avaliar se o biocombustível atende às metas de redução de GEE.

A EPA utiliza o modelo GREET (*Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation*) para estimar as emissões ao longo do ciclo de vida dos biocombustíveis. Esse modelo também considera impactos agrícolas e florestais, como variações na produção, uso de subprodutos, mudanças no uso da terra e transporte das matérias-primas. O modelo GREET não adota uma definição jurídica ou normativa de resíduo. Em vez disso, adota uma abordagem baseada em critérios funcionais, considerando a intencionalidade da produção, o valor econômico do material e sua função substitutiva dentro da cadeia de suprimento energética.

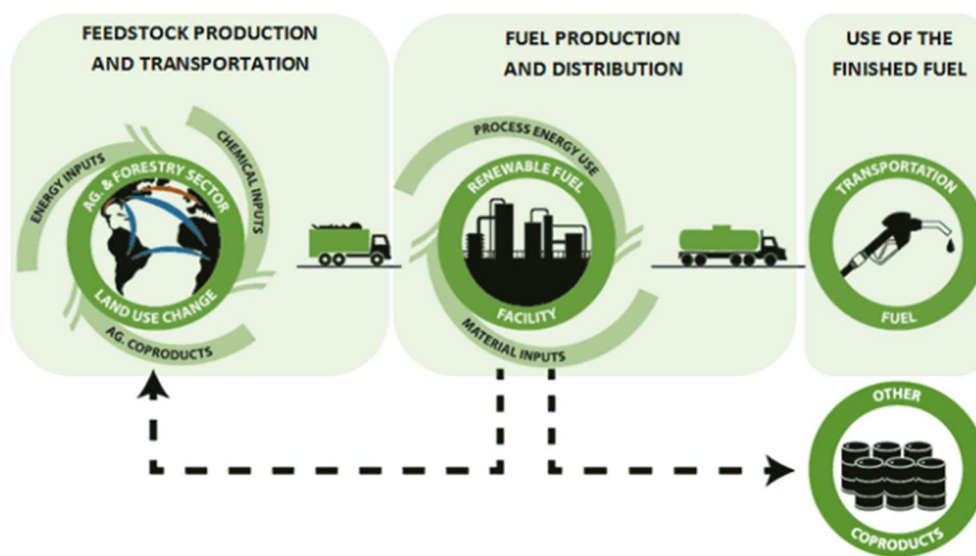


Figura 1 ciclo de vida dos biocombustíveis de acordo com a lei Clean Air Act dos EUA.

Fonte: EPA (2015).

Para se qualificar como um combustível renovável sob o programa RFS, um combustível deve ser produzido a partir de matérias-primas aprovadas, conforme caminhos listados na tabela 1 do § 80.1426 (EPA, 2022) e apresentados na Tabela 5 abaixo.

Tabela 5 Lista de caminhos de combustível aprovados sob o programa RFS, apresentados em 40 CFR parte § 80.1426 (EPA, 2022).

Linha	Tipo de combustível	Matéria-prima	Requisitos do processo de produção	Código D
A	Etanol	Amido de milho	Todos os seguintes: Processo de moagem a seco, usando gás natural, biomassa ou biogás para energia de processo e pelo menos duas tecnologias avançadas da Tabela 2 desta seção	6 (renovável)
B	Etanol	Amido de milho	Todos os seguintes: Processo de moagem a seco, usando gás natural, biomassa ou biogás para energia de processo e pelo menos uma das tecnologias avançadas da Tabela 2 desta seção, além de secar no máximo 65% dos grãos de destilaria com solúveis que comercializa anualmente	6 (renovável)
C	Etanol	Amido de milho	Todos os seguintes: Processo de moagem a seco, usando gás natural, biomassa ou biogás para energia de processo e secando não mais do que 50% dos grãos de destilaria com solúveis que comercializa anualmente	6 (renovável)
D	Etanol	Amido de milho	Processo de moagem úmida usando biomassa ou biogás para energia de processo	6 (renovável)
E	Etanol	Amidos de resíduos de culturas e culturas de cobertura anuais	Fermentação usando gás natural, biomassa ou biogás para energia de processo	6 (renovável)
F	Biodiesel, diesel renovável, combustível de aviação e óleo de aquecimento.	Óleo de soja; Óleo de culturas de cobertura anuais; Óleo de algas cultivadas fotossinteticamente; Óleos/gorduras/graxas de resíduos biogênicos; Óleo de <i>Camelina sativa</i> ; Óleo de milho destilado; Óleo de sorgo destilado; Óleo de milho destilado e óleo de sorgo misturados	Um dos seguintes: Transesterificação com ou sem pré-tratamento de esterificação, ou Hidrotratamento; exclui processos que coprocessamento biomassa renovável e petróleo	4 (diesel baseado em biomassa)

G	Biodiesel, diesel renovável, combustível para aviação e óleo de aquecimento	Óleo de canola/colza	Um dos seguintes: Transesterificação usando gás natural ou biomassa para energia de processo, ou hidrotratamento; exclui processos que coprocessam biomassa renovável e petróleo	4 (diesel baseado em biomassa)
H	Biodiesel, diesel renovável, combustível para aviação e óleo de aquecimento	Óleo de soja; Óleo de culturas de cobertura anuais; Óleo de algas cultivadas fotossinteticamente; Óleos/gorduras/graxas residuais biogênicas; <i>Óleo de Camelina sativa</i> ; Óleo de milho destilado; Óleo de sorgo destilado; Óleo de milho destilado e óleo de sorgo misturados; Óleo de canola/colza	Um dos seguintes: Transesterificação com ou sem pré-tratamento de esterificação, ou Hidrotratamento;	5 (avançado)
I	Nafta, GLP	<i>Óleo de Camelina sativa</i> ; Óleo de sorgo destilador; Óleo de milho destilador; Óleo de milho destilador e óleo de sorgo destilador misturados; Óleo de canola/colza	Hidrotratamento	5 (avançado)
J	Etanol	Cana de açúcar	Fermentação	5 (avançado)
K	Etanol	Resíduos de colheita, resíduos de corte, desbastes pré-comerciais e resíduos de árvores, capim-rabo-de-raposa, miscanthus, cana-energética, Arundo donax, Pennisetum purpureum e resíduos de jardim separados; componentes biogênicos de RSU separados; componentes celulósicos de resíduos alimentares separados; e componentes celulósicos de culturas de cobertura anuais.	Qualquer processo que converta biomassa celulósica em combustível.	3 (biocombustível celulósico)
L	Diesel celulósico, combustível de aviação e óleo de aquecimento	Resíduos de colheita, resíduos de corte, desbastes pré-comerciais e resíduos de árvores, capim-rabo-de-raposa, miscanthus, cana-energética, Arundo donax, Pennisetum purpureum e resíduos de jardim separados; componentes biogênicos de RSU separados; componentes celulósicos de resíduos alimentares separados; e componentes celulósicos de culturas de cobertura anuais.	Qualquer processo que converta biomassa celulósica em combustível.	7 (biocombustível celulósico ou diesel de biomassa)

M	Gasolina renovável e mistura de gasolina renovável; Diesel celulósico coprocessado, combustível de aviação e óleo de aquecimento	Resíduos de colheitas, resíduos de corte, desbastes pré-comerciais, resíduos de árvores e resíduos de jardim separados; componentes biogênicos de RSU separados; componentes celulósicos de resíduos alimentares separados; e componentes celulósicos de culturas de cobertura anuais.	Pirólise catalítica e atualização, gaseificação e atualização, hidrodesoxigenação termocatalítica e atualização, conversão biológica direta, conversão biológica e atualização utilizando gás natural, biogás e/ou biomassa como as únicas fontes de energia do processo, desde que o processo usado converta biomassa celulósica em combustível; qualquer processo que utilize biogás e/ou biomassa como as únicas fontes de energia do processo que converte biomassa celulósica em combustível.	3 (biocombustível celulósico)
N	Nafta	Switchgrass, miscanthus, cana energética, Arundo donax e Pennisetum purpureum	Processos de gaseificação e beneficiamento que convertem biomassa celulósica em combustível.	3 (biocombustível celulósico)
O	Butanol	Amido de milho	Fermentação; moinho seco usando gás natural, biomassa ou biogás para energia de processo	6 (renovável)
P	Etanol, diesel renovável, combustível de aviação, óleo para aquecimento e nafta.	As porções não celulósicas de resíduos alimentares separados e componentes não celulósicos de culturas de cobertura anuais.	Qualquer	5 (avançado)
Q	Gás natural comprimido renovável, gás natural liquefeito renovável, eletricidade renovável.	Biogás de aterros sanitários, digestores de estações de tratamento de águas residuais municipais, digestores agrícolas e digestores de RSU separados; e biogás de componentes celulósicos de biomassa processada em outros digestores de resíduos.	Qualquer	3 (biocombustível celulósico)
R	Etanol	Sorgo Grão	Processo de moagem a seco usando biogás de aterros sanitários, estações de tratamento de resíduos e/ou digestores de resíduos e/ou gás natural para energia de processo	6 (renovável)
S	Etanol	Sorgo Grão	Processo de moagem a seco, usando apenas biogás de aterros sanitários, estações de tratamento de resíduos e/ou digestores de resíduos para energia de processo e para produção no local de toda a eletricidade usada no local, exceto até 0,15 kWh de eletricidade da rede por galão de etanol produzido, calculado por lote	5 (avançado)
T	Gás natural comprimido renovável, gás natural	Biogás de digestores de resíduos	Qualquer	5 (avançado)

liquefeito renovável e eletricidade renovável.			
--	--	--	--

Esses caminhos listados na Tabela 5, são categorizados em função do código D, que é um número determinado de acordo com § 80.1426(f) e identifica o tipo de combustível renovável, da seguinte forma:

- D tem o valor 3 para denotar combustível categorizado como biocombustível celulósico.
- D tem o valor 4 para denotar combustível categorizado como diesel baseado em biomassa.
- D tem o valor 5 para denotar combustível categorizado como biocombustível avançado.
- D tem o valor 6 para denotar combustível categorizado como combustível renovável.
- D tem o valor 7 para denotar combustível categorizado como diesel celulósico.

Para que novas rotas sejam aprovadas elas devem ter emissões de GEE do ciclo de vida pelo menos 20 por cento menores do que a gasolina e os combustíveis diesel de base petrolífera. Já os biocombustíveis avançados e o diesel de base biomassa devem ter emissões de GEE do ciclo de vida que sejam pelo menos 50 por cento menores do que os combustíveis de base, enquanto o biocombustível celulósico deve ter emissões do ciclo de vida pelo menos 60 por cento menores do que os combustíveis de base (42 U.S.C. § 7545. Regulation of fuels (1970)).

No contexto da RFS, pode-se entender que o resíduo é todo material que não é intencionalmente produzido, que seria descartado se não fosse aproveitado, e cujo uso para combustível contribui para evitar emissões. A definição é estritamente regulatória e está conectada aos critérios de elegibilidade de rota tecnológica e tipo de biocombustível, impactando diretamente a geração de créditos RINs.

4.4 Calculadoras disponibilizadas pelo Conselho de Recursos Atmosféricos da Califórnia

O Conselho de Recursos Atmosféricos da Califórnia (*California Air Resources Board – CARB*)⁵ é o órgão responsável pela implementação de políticas de controle da poluição atmosférica e combate às mudanças climáticas no estado da Califórnia. Vinculado à Agência de Proteção Ambiental da Califórnia, o CARB é composto por membros nomeados, incluindo representantes de distritos de qualidade do ar, especialistas em saúde ambiental e membros de comunidades de justiça ambiental. Com a missão de proteger a saúde pública e os recursos ecológicos frente aos efeitos da poluição do ar, o Conselho desenvolve diretrizes e instrumentos regulatórios, entre os quais se destaca o Padrão de Combustível de Baixo Carbono da Califórnia (*Low Carbon Fuel Standard Regulation - LCFS, 2020*).

⁵ <https://ww2.arb.ca.gov/>

Para apoiar a análise de intensidade de carbono dos combustíveis renováveis no âmbito do LCFS, o CARB disponibiliza em sua plataforma digital ferramentas específicas, como modelos completos de cálculo de emissões de gases de efeito estufa (GEE) e calculadoras simplificadas (Tier 1) desenvolvidas para diferentes rotas tecnológicas. O principal modelo adotado é o CA-GREET, uma versão adaptada para a Califórnia do modelo GREET (Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Technologies Model), originalmente desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Argonne, com financiamento do Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE). O CA-GREET simula o uso de energia e as emissões associadas a uma ampla gama de combinações entre combustíveis e tecnologias de conversão, incorporando dados regionais detalhados da Califórnia. A versão mais recente disponível é o CA-GREET3.0, de 2018, acompanhada por um conjunto de calculadoras Tier 1 para diferentes biocombustíveis, sendo que a versão CA-GREET4.0 encontra-se atualmente em processo de revisão pública.

No contexto dessas ferramentas, RO et al. (2023) estudaram a metodologia utilizada pela calculadora para designação das matérias primas utilizadas para a fabricação de biocombustíveis e elaboraram uma proposta de árvore de decisão para conceituar as matérias primas. Segundo os autores no contexto da CARB:

- **Produtos primários (produtos primários e coprodutos):** Emissões de produção *upstream*, emissões de processo e emissões indiretas aplicáveis, como mudança indireta no uso da terra (ILUC), são atribuídas a produtos primários.
- **Produtos secundários (subprodutos, resíduos e refugos):** Nenhuma emissão de produção *upstream* é atribuída a produtos secundários, mas quaisquer emissões de coleta e processamento, além de efeitos de deslocamento da utilização desses materiais para produção de biocombustíveis, são atribuídas à matéria-prima.
 - **Subprodutos e resíduos:** Se um subproduto for usado atualmente como ração animal, o efeito do desvio da matéria-prima deve ser incluído. A demanda por rações substituíveis será modelada e os impactos de sua produção serão atribuídos ao subproduto. Se um resíduo for atualmente deixado no local, as consequências da remoção, como aumento das necessidades de nutrientes ou perdas de carbono do solo, serão incluídas.
 - **Resíduos (wastes):** Nenhuma emissão de produção *upstream* é atribuída a resíduos, mas as emissões das etapas de coleta e processamento e as emissões consequentes do desvio desses materiais do fluxo de resíduos serão atribuídas à matéria-prima. Neste caso, as emissões consequentes provavelmente serão créditos devido à evitação de processos relacionados ao descarte, como operações de aterro e geração de gás de aterro.

Atualmente, o CARB disponibiliza nove calculadoras específicas de Tier 1 para diferentes rotas tecnológicas, cobrindo biocombustíveis como:

- biodiesel;
- biometano de esterco de laticínios e suínos;

- biometano de lodo de estação de tratamento de efluentes;
- biometano de aterros sanitários;
- biometano de resíduos orgânicos;
- combustíveis hidroprocessados de ésteres e ácidos graxos (HEFA);
- hidrogênio;
- etanol de milho e de sorgo e
- etanol de cana de açúcar.

Essas calculadoras são apresentadas individualmente a seguir, com destaque para as matérias-primas modeladas em cada rota tecnológica e para as fronteiras do sistema adotadas na estimativa das emissões de gases de efeito estufa.

4.4.1 Biodiesel

Para o cálculo de intensidade de carbono (IC) do biodiesel são considerados os produzidos a partir de até 20 matérias-primas (porém são especificados apenas 5 tipos, conforme apresentado na Tabela 6) exclusivas para uso como combustível de transporte na Califórnia.

A Tabela 6 apresenta os fatores de emissão utilizados pela calculadora para cada uma das matérias primas consideradas.

Tabela 6 Fatores de emissão utilizados na calculadora CA-GREET para biodiesel.

	Matéria prima utilizada	gCO ₂ e/lb óleo
Valores padrão para matérias-primas dos EUA/Canadá	Óleo de soja	225
	Óleo de canola	406
	Óleo de destilação	226
	Óleo de cozinha usado	123
	Gordura animal	286
	Matéria prima utilizada	gCO ₂ e/MJ biodiesel
Mudança do uso da terra	Óleo de soja	29
	Óleo de canola	15
	Palm Oil	71

Com relação aos fatores de emissão para mudança de uso da terra, eles são considerados somente para as matérias-primas: óleo de soja, óleo de canola e óleo de palma.

Conforme demonstrado pelos fatores de emissão, as matérias primas utilizadas para a produção de biodiesel não são conceituadas como “resíduos”, carregando uma carga ambiental para o seu processamento.

4.4.2 Biometano de esterco de laticínios e suínos

As emissões fugitivas são calculadas tanto para a fase de produção de biogás (biodigestão) quanto para a fase de produção de biometano. Na biodigestão, são consideradas as seguintes emissões:

- Emissões de metano de eventos de ventilação no sistema de controle de biogás, calculadas com base no armazenamento máximo de biogás no sistema, na média de produção de biogás nos sete dias anteriores à ventilação, no número de dias de ventilação descontrolada e na concentração trimestral de metano;
- Emissões de metano da lagoa de efluente do sistema de controle de biogás, calculadas com base na fração de sólidos voláteis enviados ao sistema;
- Emissões de metano de fontes diferentes do sistema de controle de biogás, calculadas com base no tipo de sistema de tratamento e na fração de dejetos manejados em outros sistemas de tratamento.

A calculadora considera o cálculo das emissões das etapas de digestores e uso do biometano. Portanto, traz o conceito de o substrato (dejetos), classificados como “material reciclável” (considerando a classificação do ecoinvent), alocando a carga do “tratamento” para o produto final (biometano). Supõem-se que isso ocorra porque, no contexto do estado americano, exista interesse na coleta dos dejetos animais, mesmo sem compensação financeira.

Na calculadora do CARB para digestão anaeróbia de dejetos animais, há ainda outro aspecto relevante de ser apresentado. Adota-se uma **abordagem de expansão do sistema**, subtraindo as emissões da linha de base (lagoa coberta) ou o conteúdo de CH₄ do biometano, o que for de menor valor.

Na calculadora do CARB, ocorre a integração do sistema de produto que é substituído pelo coproduto (tratamento em lagoa) no sistema de produto em estudo. Na prática, o sistema de biodigestão para produzir o biogás é considerado alternativa a (substituto de) um tratamento convencional em lagoa, prática mais comum no contexto do estado americano, e as emissões associadas ao tratamento substituído **são subtraídas do sistema de produto em estudo**.

4.4.3 Biometano de lodo de estação de tratamento de efluentes

As emissões consideradas são da energia requerida para o processo, as emissões fugitivas do upgrading, o transporte do biometano e a queima. Portanto, de acordo com a fronteira considerada, o conceito adotado para o substrato (lodo), é de “**resíduo**”, sendo a carga ambiental do tratamento (digestores) não considerada para o produto final (biometano).

4.4.4 Biometano de aterros sanitários

As emissões consideradas são da energia requerida para o processo, as emissões fugitivas do upgrading, o transporte do biometano e a queima. Portanto, de acordo com a fronteira considerada, o conceito adotado para o substrato (resíduo sólido urbano), é de “**resíduo**”, sendo a carga ambiental do tratamento (aterro) não considerada para o produto final (biometano).

4.4.5 Biometano de resíduos orgânicos (Biodigestor)

A calculadora para biometano de resíduos orgânicos abrange 4 categorias de resíduos:

- resíduos de alimentos, que é a porção de resíduos sólidos urbanos que consiste em alimentos não comestíveis ou pós-consumo coletados de residências, instalações de hospitalidade, instituições e supermercados. Matérias-primas que normalmente não são aterradas não se qualificam como restos de alimentos, que incluem: gorduras, óleos ou graxas, líquidos e materiais de instalações industriais de fabricação ou processamento de alimentos.
- Resíduos de Paisagismo Urbano, que é o material orgânico coletado de atividades de paisagismo, incluindo folhas, grama, galhos e tocos.
- Orgânicos recuperados, que é a fração orgânica do RSU misto que é manual ou mecanicamente separada do fluxo de resíduos, normalmente em uma instalação de recuperação de materiais ou estação de transferência.

Quaisquer outras matérias-primas de resíduos orgânicos podem ser modeladas como “Outros Resíduos Orgânicos” (OOW).

Assim como a calculadora de dejetos suínos e bovinos de leite, adota-se uma **abordagem de expansão do sistema**, subtraindo as emissões da linha de base, ou seja, as emissões evitadas pelo não aterramento dos resíduos orgânicos. A calculadora apresenta fatores e parâmetros de emissões dos resíduos em aterros e compostagem e realiza a subtração dessas emissões da nota de intensidade do carbono. A quantidade de emissões evitadas de aterros sanitários é proporcional ao carbono orgânico anaerobicamente degradável (ANDOC) da matéria-prima.

As emissões evitadas são calculadas com base no documento “*Method for Estimating Greenhouse Gas Emission Reductions from Diversion of Organic Waste from Landfills to Compost Facilities*” (CARB, 2017).

4.4.6 Combustíveis hidroprocessados de ésteres e ácidos graxos (HEFA)

A calculadora para HEFA é utilizada para o cálculo das intensidades de carbono (CI) de diesel renovável (RD), nafta renovável (RN), propano renovável (RP) e/ou combustível alternativo para aviação (AJF) produzido com até 20 matérias-primas (porém são especificados apenas 5 tipos, conforme apresentado na

Tabela 7 Tabela 10) exclusivas para uso como combustível de transporte na Califórnia.

A

Tabela 7 apresenta os fatores de emissão utilizados pela calculadora para cada uma das matérias primas consideradas, os mesmos valores que para o biodiesel.

Tabela 7 Fatores de emissão utilizados na calculadora CA-GREET para HEFA

Matéria prima utilizada		gCO ₂ e/lb óleo
		

Valores padrão para matérias-primas dos EUA/Canadá	Óleo de soja	225
	Óleo de canola	406
	Óleo de destilação	226
	Óleo de cozinha usado	123
	Gordura animal	286

	Matéria prima utilizada	gCO₂e/MJ biodiesel
Mudança do uso da terra	Óleo de soja	29
	Óleo de canola	15
	Palm Oil	71

Com relação aos fatores de emissão para mudança de uso da terra, eles são considerados somente para as matérias-primas: óleo de soja, óleo de canola e óleo de palma.

Conforme demonstrado pelos fatores de emissão, as matérias primas utilizadas para a produção de HEFA não são conceituadas como “resíduos”, carregando uma carga ambiental para o seu processamento.

4.4.7 Etanol de milho e sorgo

Para o cálculo de intensidade de carbono (IC) do etanol do milho e sorgo, são utilizados fatores de emissão padrão para as etapas de mudança de uso da terra e a fase agrícola, incluindo o uso de fertilizantes e pesticidas, além do transporte.

A

Tabela 8 apresenta os fatores de emissão utilizados pela calculadora para cada uma das matérias primas e etapas consideradas.

Tabela 8. Fatores de emissão utilizados na calculadora CA-GREET para etanol do milho e sorgo.

	Matéria prima utilizada	gCO₂e/alqueire
Agricultura, fertilizantes e pesticidas	Milho	7.111
	Sorgo	7.601

	Matéria prima utilizada	gCO₂e/MJ
Mudança do uso da terra	Milho	19,8
	Sorgo	19,4

4.4.8 Etanol de cana de açúcar

Para o cálculo de intensidade de carbono (IC) do etanol de cana de açúcar, são utilizados fatores de emissão padrão para as etapas de cultivo da cana de açúcar, fertilizantes e químicos utilizados na etapa agrícola, emissão de N₂O do uso de fertilizantes nitrogenados e da biomassa, a queima da palha no campo (no caso de colheita mecanizada, é aplicado um crédito pela redução) e a mudança do uso da terra.

A Tabela 9 apresenta os fatores de emissão utilizados pela calculadora para cada uma das etapas consideradas.

Tabela 9. Fatores de emissão utilizados na calculadora CA-GREET para etano da cana.

Etapas	
Cultivo da cana de açúcar	8.307 gCO _{2e} / t cana
Fertilizantes e químicos utilizados	8.163 gCO _{2e} / t cana
Emissão de N ₂ O do uso de fertilizantes nitrogenados e da biomassa	14.385,2 gCO _{2e} / t cana
Queima da palha no campo	17.336 gCO _{2e} / t cana
Crédito pela redução das emissões da queima de palha – uso de colheita mecanizada	65%
Mudança de uso da terra	11,80 gCO _{2e} /MJ

4.3 Canadá: Clean Fuel Regulations - SOR/2022-140

Recentemente, no Canadá, foi publicado o regulamento "c" (Government of Canada, 2024), que estabelece diretrizes para a redução da intensidade de carbono (IC) de combustíveis como gasolina e diesel. Esse regulamento exige que produtores e importadores de combustíveis diminuam a IC dos combustíveis vendidos no Canadá, tomando como base os níveis de 2016. Em 2023, a meta é reduzir a intensidade em 3,5 gramas de dióxido de carbono equivalente por megajoule (gCO_{2e}/MJ), aumentando progressivamente para 14 gCO_{2e}/MJ até 2030. Além disso, o regulamento institui um mercado de créditos, onde as metas de redução de IC podem ser atingidas por meio de três ações principais: reduzir a IC dos combustíveis fósseis ao longo de seu ciclo de vida, fornecer combustíveis de baixo carbono e fornecer combustível e energia por meio de tecnologias avançadas.

A IC de referência, usada como base para as metas de redução, corresponde à média ponderada da IC da gasolina e do diesel consumidos no Canadá em 2016, sendo 95 gCO_{2e}/MJ para a gasolina e 93 gCO_{2e}/MJ para o diesel.

O regulamento também define o conceito de "resíduo", **que se refere a uma substância gerada incidentalmente durante um processo de produção, mas que não é o principal produto desse processo**. Importante notar que o termo não inclui substâncias resultantes de modificações no processo produtivo.

Um aspecto relevante do regulamento é o mecanismo de créditos de carbono relacionado ao "deslocamento do uso de combustíveis fósseis". Para gerar esses créditos, a matéria-prima utilizada deve atender a critérios específicos de elegibilidade. As matérias-primas elegíveis incluem aquelas que não derivam de biomassa, bem como biomassa florestal resultante de atividades de prevenção e proteção contra incêndios, limpeza de áreas não relacionadas à colheita, resíduos de colheitas, subprodutos de operações industriais de processamento de

madeira, resíduos orgânicos de residências, restaurantes, ou indústrias de alimentos, óleos vegetais usados, gorduras animais, lixo animal, materiais como esterco, efluentes industriais, águas residuais municipais, e materiais de construção ou demolição. Também são elegíveis matérias-primas derivadas de biomassa agrícola ou florestal.

O regulamento ainda detalha como **determinar a intensidade de carbono** de combustíveis de baixa intensidade, exceto hidrogênio derivado de combustíveis fósseis; e a intensidade de carbono de um insumo como gás natural renovável, biogás, propano renovável e hidrogênio não oriundo de combustíveis fósseis. A IC é calculada de acordo com uma fórmula específica, conforme previsto na regulamentação e apresentada abaixo:

$$Clf + Clp + Clcl + Cle + Cltd + Clc$$

Onde:

Clf = quantidade de CO_{2e} que está associada à extração ou produção, conforme o caso, da matéria-prima da qual o combustível ou material de entrada é produzido, por megajoule de energia produzida.

Clp = quantidade de CO_{2e} que é liberada durante a produção do combustível ou material de entrada da matéria-prima, o transporte da matéria-prima e produtos intermediários usados para produzir o combustível ou material de entrada e a distribuição do combustível ou material de entrada para usuários finais, por megajoule de energia produzida,

Clcl = quantidade de CO_{2e} que é liberada durante a compressão ou liquefação do combustível ou material de entrada, por megajoule de energia produzida.

Cle = quantidade adicional de CO_{2e} que está associada à produção de eletricidade usada durante a produção do combustível ou material de entrada, por megajoule de energia produzida,

Cltd = quantidade adicional de CO_{2e} que é liberada durante o transporte da matéria-prima e produtos intermediários usados para produzir o combustível ou insumo material e a distribuição do combustível ou insumo material para usuários finais, por megajoule de energia produzida, no caso de uma distância total de transporte não inferior a 1500 km, e

Clc = quantidade de CO_{2e} que é liberada durante a combustão do combustível ou o uso do insumo material, por megajoule de energia produzida.

Além da equação utilizada para estimar a intensidade de carbono, o regulamento, no anexo 6, apresenta os valores padrão para as diversas etapas do ciclo de vida dos combustíveis. Na etapa de extração ou produção, o regulamento estabelece que a quantidade de CO₂ equivalente é de **0 gCO_{2e}/MJ, ou seja, conceituada como resíduo**, quando a matéria-prima é derivada de:

- (i) biomassa florestal derivada de atividades de prevenção e proteção contra incêndios ou de atividades de limpeza que não estão relacionadas à colheita, como instalação de infraestrutura, controle de pragas e doenças e manutenção de estradas,
- (ii) resíduos de colheitas ou colheitas danificadas,

- (iii) resíduos florestais secundários que são subprodutos de operações industriais de processamento de madeira,
- (iv) orgânicos usados ou não comestíveis de uma área residencial, uma loja de varejo, um restaurante, um fornecedor de alimentos ou uma planta de processamento de alimentos,
- (v) gordura usada e óleos vegetais usados,
- (vi) lixo animal usado,
- (vii) materiais animais, incluindo esterco,
- (viii) efluentes industriais,
- (ix) águas residuais municipais e
- (x) materiais de construção usados e materiais de demolição,
- (xi) resíduos que são gerados diretamente pela agricultura, aquicultura e pesca, mas não resíduos de indústrias relacionadas ou de processamento,
- (xii) água,
- (xiii) resíduos de uma instalação de processamento de resíduos que produz biogás,
- (xiv) dióxido de carbono que foi capturado da atmosfera.

Além disso, o regulamento especifica um valor padrão para a etapa de extração ou produção, conceituadas como matérias primas, conforme demonstrado pela Tabela 10:

Tabela 10 Fatores de emissão utilizados na normativa canadense para as emissões do ciclo de vida das etapas de extração e produção das matérias-primas para biocombustíveis.

Matéria prima	gCO _{2e} /MJ
Derivada de culturas cultivadas exclusivamente para produção de energia e que não são cultivadas tradicionalmente para fins alimentícios e de ração	15
Óleo extraído de culturas oleaginosas	20
Outras	35

Com base no regulamento canadense, observa-se que a classificação das matérias-primas desempenha um papel central na contabilização da intensidade de carbono e na geração de créditos regulatórios, sendo que apenas aquelas cuja origem não está associada a processos produtivos intencionais — e que, por isso, não acarretam emissões na etapa de extração ou produção — são classificadas como resíduos e tratadas com fator de emissão nulo.

4.3.1 Fuel LCA Model

Além dessas considerações a respeito da intensidade de carbono, o regulamento apresenta a ferramenta “Fuel LCA Model” (Canada. Environment and Climate Change Canada, 2023) que é um modelo de avaliação do ciclo de vida do combustível de acordo com a Norma ISO 14040 (2009b) e que consiste nos procedimentos que devem ser seguidos para determinar a intensidade de carbono de um combustível, fonte de energia ou insumo de material usando inventário do ciclo de vida para vários caminhos. É uma ferramenta que permite aos usuários

calcularem a intensidade de carbono (IC) do ciclo de vida de combustíveis e fontes de energia produzidos e usados no Canadá.

O Modelo LCA de Combustível usa uma abordagem de ciclo de vida, que considera as emissões de gases de efeito estufa (GEE) envolvidas em vários estágios do processo de produção do combustível, desde a produção de matéria-prima até a combustão. Sendo que o limite do sistema de cada estágio do ciclo de vida inclui as emissões de GEE do ciclo de vida associadas ao uso de matéria-prima, entradas de eletricidade (geração na rede e no local), entradas de combustível, entradas de material (por exemplo, produtos químicos), processos de transporte, emissões de processo (por exemplo, ventilação e queima) e outras emissões diretas.

Apesar de englobar todo o ciclo de vida, os seguintes processos são excluídos do banco de dados do modelo devido à sua contribuição insignificante ou limitações, como falta de dados, métodos ou alta incerteza. Sendo eles: construção e descomissionamento de equipamentos e instalações; a fabricação de infraestrutura de transporte de combustível (por exemplo, oleodutos, caminhões, navios, estradas); a fabricação de infraestrutura de combustão de combustível (por exemplo, veículos, caldeiras); processos de gerenciamento de resíduos sólidos e processos de tratamento de águas residuais; atividades de pesquisa e desenvolvimento; atividades indiretas associadas à produção de combustível, como marketing, contabilidade, deslocamento e atividades legais; e mudança indireta no uso da terra.

Em casos em que o sistema estudado é um processo multifuncional que gera mais de um produto comercializável, a carga ambiental relacionada a esse processo pode ser distribuída entre as diferentes saídas do sistema (produto principal e coprodutos) usando um método de alocação. Para isso o Modelo LCA segue a ISO 14044 (ISO, 2006), na qual a abordagem de alocação deve ser evitada subdividindo ainda mais o sistema para isolar coprodutos, ou usando a abordagem de expansão de limites do sistema. Se a alocação não puder ser evitada, um método de alocação baseado em causalidade física (por exemplo, massa ou conteúdo de energia) ou outros relacionamentos (por exemplo, valor econômico) deve ser usado. O Modelo aplica diferentes abordagens de alocação:

- **Expansão do sistema:** A abordagem de expansão do sistema envolve levar em conta os encargos ambientais associados ao produto substituído de um coproduto produzido na instalação de produção de combustível. Os encargos ambientais associados a este produto substituído são subtraídos do IC do sistema de produto em estudo. Por exemplo, uma planta de produção de combustível pode gerar excesso de eletricidade como um coproduto que pode então ser usado no local ou exportado para a rede. Com uma abordagem de expansão do sistema, presume-se que o excesso de eletricidade irá “deslocar” os encargos ambientais associados à eletricidade da rede (que representa o produto substituído).

Nesse sentido, a expansão do sistema é utilizada para excesso de eletricidade e vapor produzidos na instalação de produção de combustível. No caso de excesso de eletricidade, o Modelo inclui uma lista de processos para excesso de eletricidade representando diferentes misturas de rede regionais e um único processo com excesso de vapor.

A expansão do sistema também pode ser aplicada quando um material residual é usado como matéria-prima para a produção de combustível de baixa intensidade de carbono e resulta em reduções reais de metano. Neste caso, o limite do sistema em torno do material residual para produção de combustível deve ser expandido para incluir o diferencial de emissão entre o uso do material residual para produção de combustível e um

cenário de linha de base que teria ocorrido se o material residual não fosse usado para produção de combustível.

- **Alocação baseada em energia:** o conteúdo de energia é a abordagem de alocação padrão. Em sistemas de produção de combustível, o conteúdo de energia, também conhecido e denominado HHV, é geralmente reconhecido como a métrica mais apropriada.

- **Alocação baseada em massa:** O Modelo usa alocação de massa para processos de matéria-prima de fibra de madeira e gordura animal, bem como para o processo configurável para óleo de sementes oleaginosas.

- **Alocação de corte:** Alguns dos processos de matéria-prima na Biblioteca de Dados representam resíduos de outras indústrias, como óleo de cozinha usado (transformado em gordura amarela) de restaurantes e gorduras animais de matadouros. Este é um caso de **reciclagem de resíduos**. O Modelo aplica a abordagem de alocação de “corte” à reciclagem de resíduos. Sob a abordagem de alocação de “corte”, se um material residual (primeira vida) for usado para outra finalidade (segunda vida) em vez de descarte, o produtor do material residual não é atribuído a nenhum ônus pelo descarte, e o usuário do material residual não é atribuído a nenhum ônus ambiental pela produção e manuseio *upstream* do material. **Consequentemente, os produtos residuais usados como matéria-prima são representados no Modelo por processos de unidade vazia (IC zero).**

Em relação às matérias-primas a Biblioteca de Dados as classifica em seis categorias principais que podem ser utilizadas em caminhos de Intensidade de Carbono ao Longo do Ciclo de Vida (LCIF). Essas categorias incluem: **gorduras animais, culturas agrícolas (como ervilhas, grãos e cana-de-açúcar), resíduos, refugo, fibra de madeira e gordura amarela**. Cada uma dessas matérias-primas pode contribuir de diferentes maneiras para a redução da intensidade de carbono na produção de combustíveis sustentáveis, dependendo de suas características e do processo de conversão utilizado. Uma breve descrição desses fluxos é apresentada abaixo para cada matéria-prima.

4.3.1.1 Produção de gorduras animais a partir de subprodutos animais

O processo de produção de gorduras animais começa com o **transporte dos subprodutos animais do matadouro para a unidade de processamento e termina com a obtenção da gordura animal**. As emissões de GEE a montante relacionadas ao subproduto animal não são incluídas, pois são consideradas provenientes de **resíduos**. Assume-se uma distância de transporte de 100 km. Na unidade de processamento, os subprodutos são convertidos em gordura animal e farinha de carne e ossos como coprodutos. O processo utiliza gás natural e óleo combustível pesado para suas necessidades de energia térmica, com os valores de consumo baseados pelos apresentados por CHEN *et al.* (2017). Os vapores de cozimento, considerados resíduos, são excluídos dos cálculos. **A alocação das cargas entre a gordura animal e a farinha de carne e ossos é feita com base no teor de massa seca dos produtos.**

4.3.1.2 Cultivo de culturas agrícolas

I. Abordagem de modelagem para cultivo de milho, trigo, cevada e ervilhas

O cultivo de cada cultura é modelado considerando oito processos principais: preparo do solo, semeadura, irrigação, aplicação de fertilizantes e pesticidas, colheita, transporte do campo até o silo de armazenamento na fazenda e o próprio armazenamento (incluindo aeração e secagem) (Figura 2). Todos os processos levaram em conta o consumo de combustível, energia e insumos agrícolas, como fertilizantes, pesticidas e sementes.

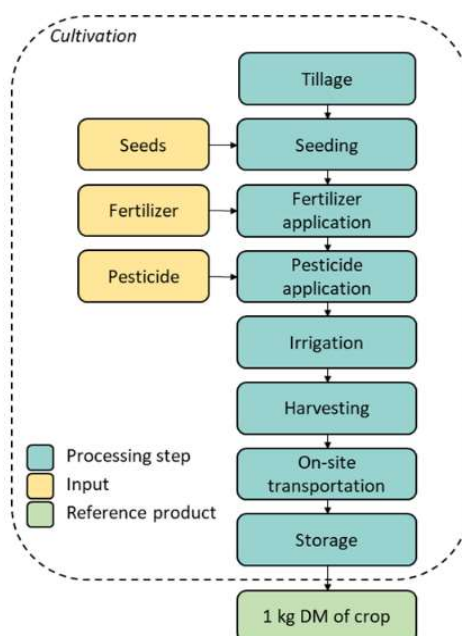


Figura 2 Visão geral do cultivo de matérias-primas agrícolas, que representa o estágio do ciclo de vida da produção de matérias-primas.

Fonte: (Canada. Environment and Climate Change Canada, 2023).

O modelo considera diferentes técnicas de preparo do solo (convencional, reduzido e plantio direto) para calcular o consumo de diesel, as emissões diretas de N_2O e as mudanças no carbono do solo. Também inclui emissões diretas e indiretas de N_2O provenientes de fertilizantes, resíduos de colheitas e sequestro de CO_2 relacionadas ao manejo da terra. As emissões de N_2O para as culturas no Canadá são baseadas em fatores de emissão específicos para cada cultivo, irrigação e topografia.

As mudanças no carbono do solo (SOC) devido à produtividade das culturas e práticas de cultivo foram incluídas até 2020, conforme os Relatório de Dados de Produção de Fertilizantes Canadenses. No entanto, alguns elementos foram excluídos do escopo, como energia renovável nas fazendas, transporte de insumos, e fabricação de equipamentos, devido à falta de dados ou baixa relevância para o impacto de carbono.

Emissões relacionadas à aplicação de esterco foram alocadas à produção pecuária, seguindo a abordagem padrão, que trata o esterco como coproduto residual dos sistemas pecuários, e as emissões de N_2O do esterco também são atribuídas à pecuária.

II. Abordagem de modelagem para sorgo

Como na modelagem de outras culturas, os limites do conjunto de dados de sorgo consideraram todas as atividades de campo relacionadas à produção de culturas (da preparação do solo à colheita e armazenamento) e excluíram a fase subsequente de transporte, distribuição, processamento e uso dos grãos e sementes oleaginosas colhidos.

O sorgo foi modelado usando os mesmos oito processos de produção de outras culturas incluídas na Biblioteca de Dados: lavoura, semeadura, irrigação, aplicação de fertilizantes e pesticidas, colheita, transporte do produto do campo para o silo de armazenamento na fazenda e armazenamento (incluindo aeração/secagem). O consumo de combustível e energia, bem como insumos agrícolas, como fertilizantes, pesticidas e sementes, foram considerados para todos os processos.

III. Abordagem de modelagem para cana-de-açúcar

Os dados usados para a modelagem do processo da cana-de-açúcar vêm da ferramenta RenovaCalc.

4.3.1.3 Cultivo de resíduos agrícolas

I. Abordagem de modelagem para cultivo de resíduos agrícolas

O modelo inclui um processo de sistema que modela a coleta de resíduos de culturas agrícolas (Figura 3). Esses resíduos compreendem as partes acima do solo das plantas de milho e trigo que são deixadas nos campos após a colheita. O processo de matéria-prima de resíduos de culturas incluído no modelo é uma média de palha de milho, palha de trigo não duro e palha de trigo duro. Consequentemente, o conjunto de dados é aplicável apenas para resíduos da produção de milho e trigo.

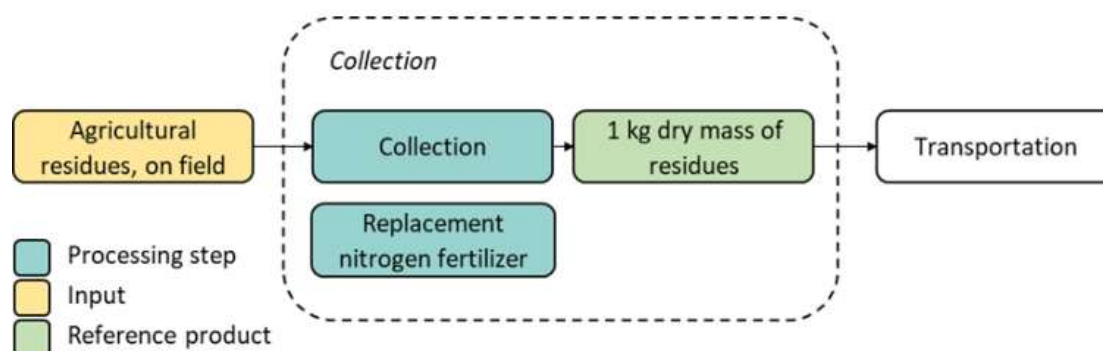


Figura 3 Visão geral do processo de coleta de resíduos agrícolas.

Fonte: (Canada. Environment and Climate Change Canada, 2023).

Como a maioria dos resíduos de colheitas atualmente permanece nos campos agrícolas, eles **são tratados como produtos residuais** no modelo. Dessa forma, não são atribuídos impactos a

montante do cultivo a esses resíduos. No entanto, a modelagem inclui o uso de diesel para contabilizar a coleta dos resíduos, além de uma aplicação adicional de fertilizante nitrogenado (N), necessária devido à remoção dos resíduos. Como os resíduos contêm nitrogênio, sua remoção implica a necessidade de uma reposição adicional de N no ano seguinte. A quantidade de nitrogênio retirada dos campos com os resíduos é calculada com base em dados de THIAGARAJAN *et al.* (2018), que analisam o teor de nitrogênio na palha de milho e de trigo.

O uso de energia para a coleta dos resíduos é modelado com base no consumo de combustível por máquinas agrícolas. O consumo de combustível é estimado por hectare para processos que utilizam máquinas agrícolas convencionais em múltiplas passagens e leva em consideração a quantidade de resíduos por hectare. As quantidades de resíduos são estimadas com base em rendimentos relativos de resíduos por quilo de colheita, conforme JANZEN *et al.* (2003). O processo de coleta resulta em 1 kg de massa seca de resíduos de colheita na porteira da fazenda (antes do transporte para a unidade de produção da LCIF).

II. Alocação para coleta de resíduos de culturas agrícolas

Resíduos agrícolas são considerados resíduos durante o cultivo de culturas e a abordagem de alocação *cut off* é aplicada. **A expansão do sistema é aplicada para contabilizar a produção de fertilizante de nitrogênio de substituição.**

4.3.1.4 Outros resíduos

I. Abordagem de modelagem para outros materiais residuais

Resíduos provenientes de diversas atividades agrícolas, comerciais e industriais podem ser utilizados como matéria-prima para diferentes LCIFs, como etanol, biodiesel, biogás/RNG e hidrogênio. O modelo considera três processos genéricos para resíduos (dois para resíduos biogênicos e um para resíduos não biogênicos), que podem ser aplicados a uma variedade de materiais residuais além das matérias-primas já incluídas na biblioteca de dados. Seguindo a abordagem de alocação por *cut off*, esses processos não têm ônus associado, mas são diferenciados pelo conteúdo de carbono biogênico ou não biogênico. Entretanto, ao **utilizar materiais residuais como matéria-prima para a produção de combustíveis, o transporte e o processamento desses resíduos devem ser incluídos no ciclo de vida do combustível por meio dos processos adequados disponíveis na biblioteca de dados do modelo.**

A utilização de algumas matérias-primas residuais na produção de combustíveis pode evitar emissões que ocorreriam caso esses resíduos não fossem aproveitados. Por exemplo, o uso de esterco de gado para a produção de biogás ou RNG pode reduzir as emissões de CH₄ associadas ao manejo convencional do esterco. Embora os processos para matérias-primas residuais no modelo não incluam emissões evitadas de forma predefinida, o modelo permite que os usuários insiram manualmente a quantidade dessas emissões evitadas nos processos de resíduos. A metodologia para calcular essas emissões evitadas pode variar conforme o programa em que o modelo está sendo aplicado.

4.1.3.5 Produção de matéria-prima de fibra de madeira no Canadá

I. Abordagem de modelagem para produção de fibras de madeira

As matérias-primas incluem **coprodutos** de serrarias, cavacos de toras não comercializáveis e pellets de madeira provenientes tanto de serrarias quanto de toras não comercializáveis. O ciclo de vida da produção dessas matérias-primas abrange desde a colheita até o processamento em fibras de madeira.

Toras comercializáveis e toras não comercializáveis de biomassa florestal em pé são modeladas como fontes de fibra de madeira na preparação de cavacos de madeira ou coprodutos de serraria como matéria-prima. Essas matérias-primas podem ser posteriormente comprimidas em pellets, também disponíveis como matéria-prima.

O Inventário do Ciclo de Vida (LCI) para toras comercializáveis considera o uso de combustíveis fósseis nas operações de colheita, mas exclui insumos químicos não contabilizados nos dados do LCA. Para as toras não comercializáveis, apenas o consumo de diesel nas operações de coleta é considerado, similar ao tratamento dado aos resíduos de colheita. As toras são transportadas e convertidas em cavacos de madeira. **A abordagem de modelagem para toras não comercializáveis considera apenas as atividades de coleta, o que é consistente com a abordagem para resíduos de colheita.**

Uma vez transportadas para a serraria, as toras comercializáveis são convertidas em madeira serrada, um processo que gera serragem e cavacos de madeira, bem como outros coprodutos (casca, aparas, pontas de aparas e finos de picador). Os cavacos de madeira e os coprodutos da serraria podem ser convertidos em pellets de madeira. Uma distância de caminhão de 100 km é assumida para o transporte de toras da floresta para a serraria. **A modelagem, portanto, aloca o consumo de energia (ou seja, eletricidade e uso de combustível fóssil) das operações da serraria com base no conteúdo de massa dos diferentes coprodutos da serraria.**

As emissões de mudança no uso da terra não são incluídas para matérias-primas de fibra de madeira, uma vez que se presume que as fontes florestais canadenses existentes não requerem conversão para produção de bioenergia no ICV de matérias-primas de madeira.

4.3.1.6 Óleo de cozinha usado bruto (OCU) e gordura amarela

O limite do processo de OCU (Óleo de cozinha usado) bruto começa com a produção do OCU bruto nos restaurantes e termina no portão do restaurante. As emissões de GEE *upstream* relacionadas ao OCU bruto não são incluídas no conjunto de dados, pois o óleo é considerado um resíduo. Este processo permite que os usuários do modelo escolham OCU bruto como matéria-prima para plantas de biodiesel que usam OCU bruto em suas instalações em vez de receber gordura amarela de uma planta de processamento.

Para a gordura amarela, o limite do processo começa com o **OCU bruto nos restaurantes e termina com o processamento do OCU na unidade de processamento.**

O processamento de OCU na unidade de processamento inclui a remoção de água do OCU com processos mecânicos e térmicos. Sendo que, nenhuma alocação é necessária para a produção de gordura amarela a partir de OCU bruto.

4.4 Organizações Internacionais

4.4.1 Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA)

O *Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation* (CORSIA) é um programa global destinado a mitigar as emissões de CO₂ provenientes de voos internacionais, com o objetivo de minimizar o impacto da aviação nas mudanças climáticas. Criado pela Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO)⁶ e adotado em outubro de 2016, o CORSIA implementa mecanismos de mercado, exigindo que as companhias aéreas compensem suas emissões comprando créditos de carbono. Esses créditos são adquiridos no mercado de carbono, ajudando a financiar projetos que reduzem ou removem emissões em outros setores.

O principal objetivo do CORSIA é garantir que o crescimento da aviação seja neutro em carbono a partir de 2020, limitando o impacto das emissões de CO₂ geradas por voos internacionais. Inicialmente, o esquema foi implementado de forma voluntária em 2021, mas sua adesão se tornará obrigatória para todos os países a partir de 2027. Além disso, o programa complementa outras iniciativas, como a melhoria da eficiência energética e o uso de Combustíveis Sustentáveis para Aviação (*Sustainable Aviation Fuel – SAF*), já promovidos pela indústria (ICAO, 2023).

O SAF pode ser produzido a partir de uma ampla variedade de matérias-primas. No contexto do CORSIA, essas matérias-primas são classificadas em diferentes categorias, dependendo de sua origem e processo de produção. Essas categorias incluem resíduos de biomassa, óleos residuais, gorduras animais e plantas ricas em óleo, além de recursos não comestíveis, como algas e resíduos florestais. De acordo com a estrutura do CORSIA, essas matérias-primas são amplamente categorizadas como:

- **Produtos primários e coprodutos:** são os principais produtos de um processo de produção. Esses produtos **têm valor econômico significativo e oferta elástica** (ou seja, há evidências de que existe um vínculo causal entre os preços da matéria-prima e a quantidade de matéria-prima produzida);
- **Subprodutos:** são produtos secundários com fornecimento e valor econômico inelásticos.
- **Resíduos:** São materiais com **oferta inelástica e pouco valor econômico**.
- **Lixo (Waste):** são materiais com suprimento **inelástico e sem valor econômico**. Um lixo é qualquer substância ou objeto que o detentor descarta ou pretende ou é obrigado a descartar. Se intencionalmente modificadas ou contaminadas para atender a esta definição não são abrangidas por esta definição.

⁶ <https://www.icao.int/Pages/default.aspx>

De acordo com a estrutura do CORSIA, subprodutos, resíduos e dejetos têm direito a um valor de ILUC igual a zero no cálculo do valor de emissão do ciclo de vida do SAF. Os produtos primários e coprodutos também podem ter direito a um valor zero de ILUC com o uso de metodologias de baixo risco de LUC definidas no Capítulo 5 do documento da ICAO “Metodologia CORSIA para calcular os valores reais de emissões do ciclo de vida” (ICAO, 2024a).

A Tabela 11 a seguir lista as matérias-primas que são atualmente reconhecidas na estrutura CORSIA da ICAO para produzir SAF. As estimativas sobre aspectos econômicos relacionados a algumas dessas matérias-primas, como rendimento e custos, são fornecidas nas Regras Práticas de SAF da ICAO (ICAO, 2023).

Tabela 11 Lista das matérias-primas que são atualmente reconhecidas na estrutura CORSIA da ICAO (ICAO, 2023).

Matéria-prima	Classificação	Referência
Destilado de ácido graxo de palma	Subproduto	Tabela 1, (ICAO, 2024a) Tabela 2, (ICAO, 2024b)
Óleo de milho técnico	Subproduto	Tabela 1, (ICAO, 2024a) Tabela 2, (ICAO, 2024b)
Sebo	Subproduto	Tabela 2, (ICAO, 2024b)
Sebo bovino	Subproduto	Tabela 1, (ICAO, 2024a)
Cocos não padronizados	Subproduto	Tabela 1, (ICAO, 2024a)
Gordura de aves	Subproduto	Tabela 1, (ICAO, 2024a)
Gordura de porco	Subproduto	Tabela 1, (ICAO, 2024a)
Gordura de animais mistos	Subproduto	Tabela 1, (ICAO, 2024a)
Melaço	Coproducto	Tabela 1, (ICAO, 2024a) Tabela 3, (ICAO, 2024b)
Óleo de Brassica carinata	Produto	Tabela 2, (ICAO, 2024b)
Óleo de camelina	Produto	Tabela 2, (ICAO, 2024b)
Grão de milho	Produto	Tabela 3, (ICAO, 2024b) Tabela 4, (ICAO, 2024b)
Óleo de Jatropha	Produto	Tabela 2, (ICAO, 2024b)
Miscanthus (culturas energéticas herbáceas)	Produto	Tabela 1, (ICAO, 2024b) Tabela 3, (ICAO, 2024b) Tabela 4, (ICAO, 2024b)
Óleo de palma	Produto	Tabela 2, (ICAO, 2024b)
Álamo (culturas lenhosas de rotação curta)	Produto	Tabela 1, (ICAO, 2024b)
Óleo de colza	Produto	Tabela 2, (ICAO, 2024b)
Óleo de soja	Produto	Tabela 2, (ICAO, 2024b) Tabela 6, (ICAO, 2024b)
Beterraba	Produto	Tabela 5, (ICAO, 2024b)
Cana-de-açúcar	Produto	Tabela 3, (ICAO, 2024b) Tabela 4, (ICAO, 2024b) Tabela 5, (ICAO, 2024b)
Switchgrass (culturas energéticas herbáceas)	Produto	Tabela 1, (ICAO, 2024b) Tabela 3, (ICAO, 2024b) Tabela 4, (ICAO, 2024b)
Resíduos agrícolas: Bagaço	Resíduos	Tabela 1, (ICAO, 2024a)
Resíduos agrícolas: Espigas	Resíduos	Tabela 1, (ICAO, 2024a)
Resíduos agrícolas: Cascas	Resíduos	Tabela 1, (ICAO, 2024a)
Resíduos agrícolas: Estrume	Resíduos	Tabela 1, (ICAO, 2024a)
Resíduos agrícolas: Cascas de nozes	Resíduos	Tabela 1, (ICAO, 2024a)
Resíduos agrícolas: Talos	Resíduos	Tabela 1, (ICAO, 2024a)
Resíduos agrícolas: Esterco	Resíduos	Tabela 1, (ICAO, 2024a)
Resíduos agrícolas: Palha	Resíduos	Tabela 1, (ICAO, 2024a)

Resíduos florestais: Casca	Resíduos	Tabela 1, (ICAO, 2024a)
Resíduos florestais: Galhos	Resíduos	Tabela 1, (ICAO, 2024a)
Resíduos florestais: Aparas de corte	Resíduos	Tabela 1, (ICAO, 2024a)
Resíduos florestais: Folhas	Resíduos	Tabela 1, (ICAO, 2024a)
Resíduos florestais: Agulhas	Resíduos	Tabela 1, (ICAO, 2024a)
Resíduos florestais: Desbastes pré-comerciais	Resíduos	Tabela 1, (ICAO, 2024a)
Resíduos florestais: Serragem	Resíduos	Tabela 1, (ICAO, 2024a)
Resíduos florestais: Copas de árvores	Resíduos	Tabela 1, (ICAO, 2024a)
Resíduos de processamento: Glicerina bruta	Resíduos	Tabela 1, (ICAO, 2024a)
Resíduos de processamento: óleo de resina “Crude Tall Oil”	Resíduos	Tabela 1, (ICAO, 2024a)
Resíduos de processamento: Cachos de palmito vazios	Resíduos	Tabela 1, (ICAO, 2024a)
Resíduos de processamento: Resíduos de processamento florestal	Resíduos	Tabela 1, (ICAO, 2024a)
Resíduos de processamento: Efluente da fábrica de óleo de palma	Resíduos	Tabela 1, (ICAO, 2024a)
Resíduos de processamento: Lodo de esgoto	Resíduos	Tabela 1, (ICAO, 2024a)
Resíduos de processamento: óleo de resina: Tall oil pitch	Resíduos	Tabela 1, (ICAO, 2024a)
Resíduos sólidos urbanos	Resíduos	Tabela 1, (ICAO, 2024b) Tabela 1, (ICAO, 2024a)
Óleo de cozinha usado	Resíduos	Tabela 1, (ICAO, 2024a) Tabela 2, (ICAO, 2024b) Tabela 6, (ICAO, 2024b)
Gases residuais	Resíduos	Tabela 1, (ICAO, 2024a) Tabela 4, (ICAO, 2024b)

As tabelas citadas na terceira coluna da Tabela 11, como referência, apresentam valores default para os resíduos, subprodutos e produtos utilizados para a produção do SAF, contemplando os valores de LCA e ILUC LCA.

Apesar de apresentar essa lista positiva o CORSIA destaca que essa relação é uma lista aberta, na qual o Conselho da ICAO pode adicionar materiais a ela, de acordo com as definições de matérias-primas e usando um critério como esquematizado na Figura 4 abaixo (ICAO, 2024a):

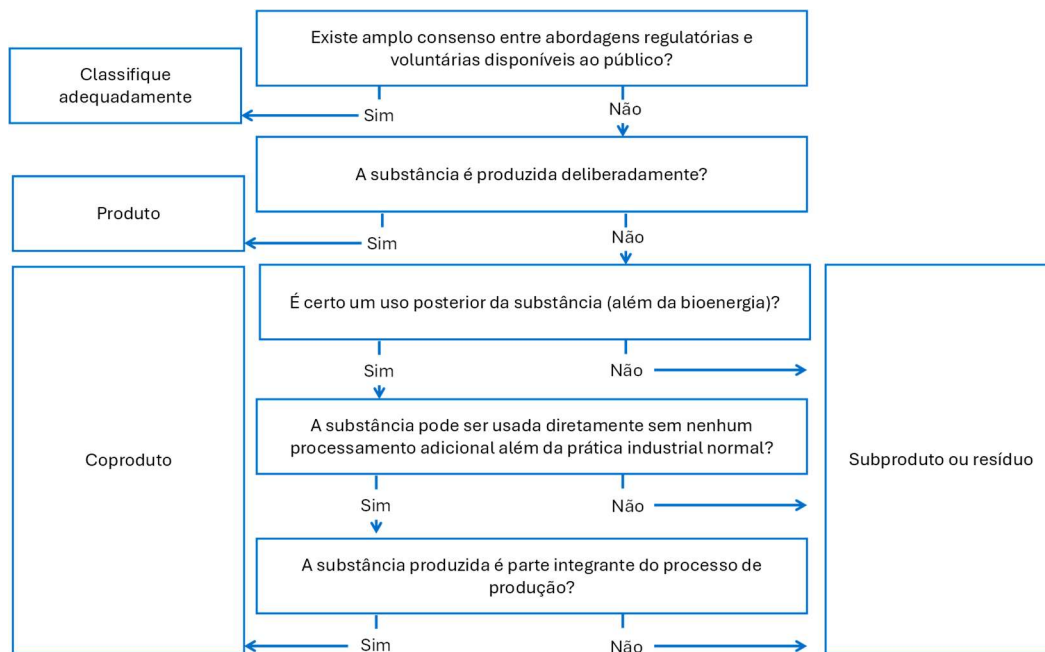


Figura 4 Orientação para inclusão de materiais adicionais na lista positiva na estrutura CORSIA.
Fonte: adaptado de ICAO (2024).

A lógica de tomada de decisão apresentada na Figura 4 sugere que a classificação dos materiais é fundamentada em quatro pilares principais: **valor funcional**, **utilidade no mercado**, **características do processamento** e **contexto regulatório**. Essa abordagem integrada possibilita uma análise mais abrangente, considerando tanto os aspectos econômicos quanto os técnicos e normativos. Dessa forma, o material pode ser categorizado de maneira precisa, com base em sua funcionalidade e seu papel no mercado, garantindo que as decisões tomadas sejam adequadas e alinhadas com as demandas industriais, comerciais e ambientais.

Com relação aos créditos de emissão, ou emissões evitadas, a seção 6 do documento cita que a produção de SAF a partir de resíduos pode gerar créditos de emissão que podem ser subtraídos dos valores da ACV. O crédito pode ser para SAFs derivados de: emissões evitadas de aterro de resíduos sólidos municipais e reciclagem de resíduos sólidos municipais. O documento cita ainda que a intensidade de carbono final não pode ser menor que 0 gCO₂/MJ e não se aplicam para resíduos de construção / demolição ou industriais.

Para os resíduos orgânicos, o cálculo das emissões evitadas é realizado com base no conteúdo orgânico do material. Com relação à reciclagem de materiais (plásticos e metais), o cálculo é realizado através da diferença do consumo energético da produção do material virgem e reciclado.

Nesse contexto, a estrutura adotada pelo CORSIA demonstra não apenas uma abordagem técnica para a classificação de matérias-primas, mas também um mecanismo dinâmico e adaptável que permite a inclusão de novos materiais conforme critérios funcionais, econômicos e regulatórios.

4.4.2 International Maritime Organization (IMO)

A IMO⁷ – a Organização Marítima Internacional – é a agência especializada das Nações Unidas com responsabilidade pela segurança e proteção do transporte marítimo e pela prevenção da poluição marinha e atmosférica por navios. A Estratégia da IMO de 2023 para Redução de Emissões de GEE visa mitigar as emissões no transporte marítimo com a adoção de combustíveis de emissão zero ou quase zero. As metas incluem reduzir a intensidade de carbono em pelo menos 40% até 2030 e alcançar emissões líquidas zero até 2050, levando em consideração as condições nacionais. A estratégia também estabelece metas intermediárias de redução de 20% a 30% até 2030 e 70% a 80% até 2040, em comparação com os níveis de 2008 (IMO, 2023).

A avaliação do ciclo de vida (ACV) é essencial nesse processo, considerando as emissões de GEE do ciclo completo dos combustíveis, desde a produção ("Poço-Tanque") até o uso final no navio ("Tanque-Estrada"). A ACV garante que a redução de emissões no transporte marítimo não seja transferida para outros setores e apoia o cumprimento das metas da IMO, já que cerca de 64% das reduções previstas até 2050 dependerão do uso de combustíveis alternativos de baixo ou zero carbono (IMO, 2024). Nesse sentido a avaliação realizada é uma ACV atribucional na qual as emissões associadas aos seguintes estágios da cadeia do ciclo de vida do combustível serão contabilizadas (Figura 5):

- extração/cultivo/aquisição/recuperação de matéria-prima;
- processamento/transformação (precoce) de matéria-prima na fonte;
- transporte de matéria-prima para o local de conversão;
- conversão de matéria-prima em combustível de produto;
- transporte/armazenamento/entrega/armazenamento de varejo/abastecimento de combustível de produto; e
- utilização de combustível a bordo de um navio.

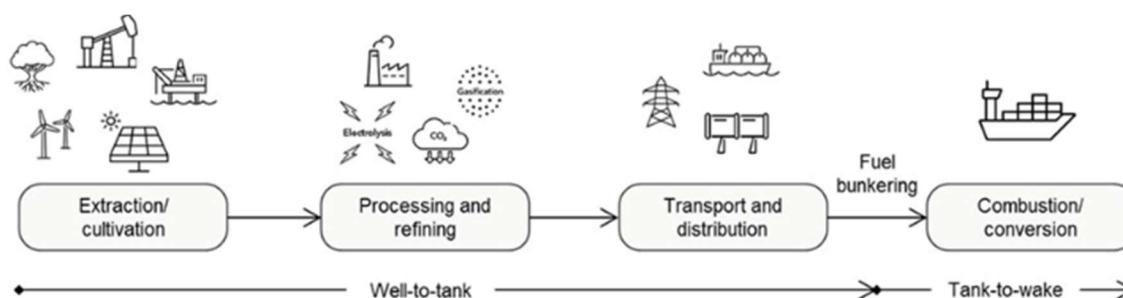


Figura 5 Cadeia de suprimentos genérica dos combustíveis marítimos.

Fonte: (IMO, 2023).

Em relação à classificação das matérias-primas, a metodologia apresentada no anexo 10 da resolução MEPC.391(81) (2024 Guidelines On Life Cycle Ghg Intensity Of Marine Fuels (2024 LCA Guidelines)) estabelece que um **coproduto é definido como "um resultado de um processo de produção que possui valor econômico e oferta elástica", ou seja, há uma evidência clara da**

⁷ <https://www.imo.org/en>

relação causal entre o valor de mercado da matéria-prima e a quantidade que pode ser produzida.

Essa definição também se aplica quando a matéria-prima utilizada para produzir combustíveis é um **resíduo/lixo (waste) (sem valor econômico)** ou um resíduo **(inevitavelmente produzido e com valor econômico insignificante, necessitando de processamento adicional para ser usado no processo de conversão principal)**.

Quando a matéria-prima é um resíduo ou subproduto, as emissões consideradas no ciclo "poço-para-tanque" são contabilizadas a partir do ponto de coleta da matéria-prima até o uso final do combustível ou produto energético.

A metodologia também prevê a possibilidade de ampliar os limites do sistema em casos específicos, nos quais matérias-primas ou produtos intermediários são desviados de seus usos originais, devendo essa situação ser analisada caso a caso.

4.5 Sistemas internacionais para classificação de produtos

4.5.1 Sistema Internacional de Declaração Ambiental de Produto (Environmental Product Declaration - EPD)

O Sistema EPD⁸ Internacional tem como objetivo principal a ambição de habilitar e dar suporte a organizações em qualquer país para comunicar informações ambientais quantificadas sobre o ciclo de vida de seus produtos de forma credível, comparável e compreensível. O escopo do programa inclui qualquer tipo de produto de qualquer organização em qualquer país onde haja uma demanda de mercado para comunicar suas informações ambientais baseadas no ciclo de vida.

A classificação de produtos dentro do sistema EPD⁸ Internacional, conforme as **General Programme Instructions (GPI)**, oferece uma abordagem estruturada e flexível para a comunicação de informações ambientais baseadas no ciclo de vida de produtos. Essa estrutura, que inclui o desenvolvimento de **Product Category Rules (PCR)** (Regras de Categoria de Produto), estabelece um processo rigoroso para a definição de categorias de produtos, o que poderia ser aplicado também para a classificação de matérias-primas.

Uma das características mais importantes desse sistema é que ele segue normas internacionais, como a **ISO/TS 14027**, garantindo que as categorias de produtos sejam definidas com base em suas funções e no ciclo de vida, o que permite a comparação e análise de impacto ambiental de forma clara e compreensível.

No contexto da classificação de matérias-primas, a aplicação desse modelo oferecer uma base técnica sólida, pois o desenvolvimento de **PCRs** para cada categoria incluiria os seguintes aspectos essenciais:

1. **Funções primárias e secundárias do produto:** Ao definir a categoria de uma matéria-prima, o sistema GPI permite uma abordagem focada na função que essa matéria-prima

⁸ <https://www.epdbrasil.com.br/>

desempenha dentro de um processo produtivo ou sistema maior. Isso inclui tanto as funções primárias, como a utilização direta no processo, quanto as funções secundárias, como subprodutos ou resíduos gerados.

2. **Elasticidades de preço e substitutibilidade:** O GPI considera a elasticidade de preço entre produtos para avaliar a substitutibilidade, o que poderia ser aplicado para a escolha de matérias-primas alternativas. Esse aspecto é relevante para identificar quando uma matéria-prima pode ser substituída por outra de menor impacto ambiental, com base em critérios econômicos e de viabilidade técnica.
3. **Análise do Ciclo de Vida (ACV):** A inclusão de estudos de ACV existentes é uma parte central do processo, fornecendo dados empíricos para a definição das categorias. No caso de matérias-primas, a integração de dados de ACV poderia melhorar a análise de impacto ambiental de diferentes opções, permitindo uma comparação transparente e informada entre elas.
4. **Códigos CPC da ONU e padrões internacionais:** O uso de códigos **CPC** (Classificação Central de Produtos da ONU) e de padrões internacionais ajuda a garantir que a categorização esteja alinhada com normativas globais. No contexto de matérias-primas, essa abordagem seria útil para garantir consistência e comparabilidade com outros sistemas de rotulagem e certificação ambiental, como os rótulos ambientais de Tipo I ou os critérios de compras públicas verdes.

O sistema GPI caracteriza-se por ser altamente colaborativo, envolvendo um moderador, comitês especializados e diversas partes interessadas na definição do escopo das categorias de produtos. Esse processo colaborativo busca assegurar que a definição das categorias seja prática, viável e representativa das condições do mercado e das necessidades de diferentes indústrias, resultando em um escopo ajustado às realidades setoriais.

Portanto, a aplicação da estrutura de classificação de produtos do **Sistema EPD® Internacional** na categorização de matérias-primas pode proporcionar uma abordagem padronizada e internacionalmente reconhecida. Isso facilita não apenas a comunicação de informações ambientais, mas também incentivaria o desenvolvimento de **PCRs** específicas para matérias-primas, que considerariam tanto o impacto ambiental quanto a viabilidade econômica e técnica, possibilitando uma avaliação robusta e prática das opções disponíveis.

4.5.2 Product Environmental Footprint Category (Europa)

A Pegada Ambiental do Produto (PEF), ou *Product Environmental Footprint*, é uma metodologia desenvolvida pela Comissão Europeia para padronizar a avaliação do impacto ambiental de produtos e organizações. As Regras de Categorias de Produtos (PEFCRs do inglês *Product Environmental Footprint Category Rules*) estão diretamente associadas ao programa PEF e estabelecem diretrizes específicas para diferentes grupos de produtos, com base nas recomendações da Comissão Europeia (European Commission, 2017).

Atualmente, a metodologia PEF encontra-se em fase de transição, um estágio piloto que deve ser concluído até o final de 2024. Durante essa etapa, o uso da metodologia permanece opcional, mas já estabelece um padrão mais rigoroso do que as tradicionais Avaliações do Ciclo de Vida

(ACV). Isso ocorre devido à estrutura única do PEF e à especificidade das PEFCRs, que oferecem maior detalhamento e exigências na coleta e interpretação de dados.

As PEFCRs foram elaboradas para garantir a comparabilidade e reprodutibilidade das análises ambientais dentro de uma mesma categoria de produtos. Derivadas de normas internacionais e metodologias consolidadas, elas respondem à crescente demanda por declarações ambientais padronizadas, como as Declarações Ambientais de Produto (EPD). Sua aplicação harmonizada em toda a União Europeia facilita a medição e a comunicação dos impactos ambientais em setores diversos, incluindo produtos de consumo, serviços e compras públicas sustentáveis (European Commission, 2021).

Combinando rigor metodológico e um banco de dados robusto, a abordagem PEF e suas PEFCRs promovem análises mais consistentes e comparáveis entre produtos de categorias semelhantes, contribuindo para maior transparência e eficiência na avaliação ambiental em diferentes cadeias de fornecimento.

Os métodos comuns para medir o desempenho ambiental do ciclo de vida, tanto para a Pegada Ambiental do Produto (PEF) quanto para a Pegada Ambiental da Organização (OEF), estão descritos na Recomendação da Comissão Europeia 2021/2279, publicada em dezembro de 2021. Esse documento consolida diretrizes fundamentais para harmonizar e padronizar as avaliações ambientais em toda a União Europeia, reforçando a confiabilidade dos resultados e a aplicabilidade prática das metodologias (União Europeia, 2021).

Com relação aos conceitos de resíduos e recicláveis para definição da fronteira do sistema e alocações, a versão 6.3 do guia (European Commission, 2017) apresenta alguns conceitos de resíduo e coproduto para alguns materiais em específico, que se aplicam a matérias-primas exportadas de um sistema produtivo a outro, como para os dejetos animais que são classificados:

Residual (opção padrão): **quando o dejetos não tem valor econômico** na porteira da propriedade rural, ele é considerado residual sem alocação de uma carga a montante. As emissões relacionadas ao manejo do dejetos até a porteira da fazenda são alocadas para as outras saídas da fazenda onde o dejetos é produzido.

Coproduto: quando o dejetos exportado **tem valor econômico na porteira da fazenda**, uma **alocação econômica** da carga a montante deve ser usada para o dejetos usando o valor econômico relativo do dejetos em comparação ao leite e animais vivos na porteira da fazenda. A alocação biofísica com base nas regras da IDF (International Dairy Federation) deve, no entanto, ser aplicada para alocar as emissões restantes entre leite e animais vivos.

Dejetos como resíduo: quando o dejetos é tratado como resíduo (por exemplo, depositado em aterro), o CFF (Fórmula da Pegada Circular do inglês *Circular Footprint Formula*) deve ser aplicado.

Outro documento (EC-JRC, 2012) que especifica regras de alocação cita hierarquias a serem consideradas, sendo que a alocação baseada na massa pode ser modelada usando substituição direta se um produto for diretamente substituído. Um efeito de substituição direta pode ser modelado de forma robusta. Isso pode ser demonstrado provando que: há um efeito de substituição direto e empiricamente demonstrável, e o produto substituído pode ser modelado e

o estoque subtraído de uma maneira diretamente representativa. Um exemplo apresentado pelo guia de é relacionado quando o nitrogênio do dejetos é aplicado em terras agrícolas, substituindo diretamente uma quantidade equivalente do fertilizante nitrogênio específico que o fazendeiro teria aplicado de outra forma, o sistema de criação animal do qual o esterco é derivado é creditado pela produção de fertilizante deslocada (levando em consideração as diferenças em transporte, manuseio e emissões).

A classificação de resíduos e coprodutos na metodologia PEF está alinhada a definições estabelecidas pela ISO 14040 (2006), que oferece uma base conceitual mais robusta para a análise do ciclo de vida.

- **Resíduos:** São definidos como substâncias ou objetos que o detentor pretende ou é legalmente obrigado a descartar. Essa definição abrange materiais sem valor econômico direto no momento de sua saída do sistema produtivo, sendo alocados às emissões das atividades geradoras.
- **Coprodutos:** Referem-se a quaisquer produtos adicionais gerados em conjunto com o produto principal em um mesmo processo ou sistema. Diferente dos resíduos, os coprodutos possuem valor econômico e podem ser sujeitos a alocação de impactos com base em critérios como valor relativo ou funcionalidade no contexto do sistema.

Apesar dessas definições, a PEF apresenta limitações ao tratar de forma genérica a distinção entre resíduos, subprodutos e coprodutos. Isso pode gerar dificuldades na alocação precisa de emissões em sistemas complexos, especialmente na análise de processos com múltiplas saídas. Para maior clareza e consistência, a ISO 14040:2006 é frequentemente utilizada como uma referência complementar, detalhando critérios mais específicos para diferenciar resíduos e coprodutos, com base em fatores como valor econômico, funcionalidade e potencial de reutilização.

5. Visão geral das principais diretrizes

Conforme apresentado nos itens anteriores, existe uma diferença de conceitos abordados pelas diferentes diretrizes e normas para a definição das matérias primas. A Tabela 12 apresenta as principais definições.

Tabela 12. Terminologia e definições para a classificação da matéria-prima

Fonte	Produtos primários		Produtos secundários		
	Produto primário	Co-produto	Subproduto	Resíduo	Lixo (waste)
ISO 14040 (ISO 14040, 2006)		qualquer um entre dois ou mais produtos procedentes do mesmo processo elementar ou sistema de produto			substâncias ou objetos os quais o detentor pretende ou é obrigado a dispor
Ecoinvent				Materiais recicláveis* são aqueles com pouco ou nenhum valor econômico que podem servir como insumo ou recurso para uma atividade de reciclagem; portanto, existe interesse em sua coleta	São materiais sem valor econômico e para os quais não existe interesse na coleta se não houver compensação.
Renewable Energy Directive (RED) (European Commission, 2010)				“Resíduos agrícolas, de aquicultura, de pesca e florestais, e resíduos de processamento. Um resíduo de processamento é uma substância que não é o(s) produto(s) final(is) que um processo de produção busca diretamente produzir. Não é um objetivo primário do processo de produção, e o processo não foi deliberadamente modificado para produzi-lo.”	Qualquer substância ou objeto que o detentor descarte ou pretenda ou seja obrigado a descartar, mas excluindo substâncias que tenham sido intencionalmente modificadas para contar como resíduo”
Renewable Transport Fuel Obligation (RTFO) (Department For Transport, 2011)	“Materiais que representam um valor econômico significativo em relação ao produto principal e que têm outros usos além de aplicações energéticas provavelmente serão considerados produtos. Qualquer material que tenha sido intencionalmente modificado			Igual à RED	

Fonte	Produtos primários		Produtos secundários	
	para ser considerado um resíduo será considerado um produto.”			
ICF International (ICF international, 2015)	<p>“Os produtos primários são os produtos de valor dominante do processo com oferta e demanda elásticas.”</p> <p>O objetivo principal do processo é o(s) material(ais) para o qual o processo é normalmente otimizado. Tais materiais devem ser considerados como produto principal ou coproduto”</p>		Produtos de um processo que têm oferta inelástica com demanda e têm um valor econômico significativo	Produtos de um processo que têm oferta inelástica com a demanda e têm pouco ou nenhum valor econômico
Ecofys (SPÖTTLE <i>et al.</i> , 2013)	<p>“O objetivo principal do processo é o(s) material(ais) para o(s) qual(is) o processo é normalmente otimizado. Tais materiais devem ser considerados como produto principal ou coproduto” “Se um material de um processo constitui um resultado essencial/considerável do processo e este material tem outros usos além de aplicações de energia, ele deve ser considerado como um coproduto”</p>			<p>“Um material pode ser considerado um resíduo se tiver um valor econômico de cerca de 15% ou menos em comparação ao valor total dos produtos principais, coprodutos e resíduos.</p> <p>Igual à RED</p>
FAO**		Qualquer um de dois ou mais produtos provenientes do mesmo processo unitário ou sistema de produto (ISO 14044:2006)	Material produzido durante o processamento (incluindo abate) de um produto animal ou vegetal que não seja o produto primário da atividade (por exemplo, óleo, refeições, vísceras ou peles). A maioria dos subprodutos é considerada de baixo valor econômico ou, pelo menos, inferior ao do produto principal (o produto que impulsiona a produção).	Qualquer material sem valor econômico que deixa o sistema do produto na condição em que foi criado no processo (Observação 1: Materiais com valor econômico são considerados subprodutos).
Canadá: Clean Fuel Regulations - SOR/2022-140 (Government of Canada, 2024)				Substância gerada incidentalmente durante um processo de produção, mas que não é o principal produto desse processo
CORSIA (ICAO, 2023)	São os principais produtos de um processo de produção. Esses produtos têm valor econômico		São produtos secundários com fornecimento e valor	São materiais com oferta inelástica e sem valor econômico.

Fonte	Produtos primários		Produtos secundários	
		significativo e oferta elástica (ou seja, há evidências de que existe um vínculo causal entre os preços da matéria-prima e a quantidade de matéria-prima produzida).	econômico inelásticos.	
IMO (IMO, 2023)			Um resultado de um processo de produção que possui valor econômico e oferta elástica	Inevitavelmente produzido e com valor econômico insignificante, necessitando de processamento adicional para ser usado no processo de conversão principal
PEFCR (Zampori; Pant, 2019)		Quando o material tem valor econômico na porteira da fazenda, uma alocação econômica da carga a montante deve ser usada usando o valor econômico relativo material em comparação aos produtos principais.		Quando o material não tem valor econômico

Fonte: Adaptada de RO; ZHANG; KENDALL (2023).

** Conceito apresentado no documento: *Guidelines on the role of livestock in circular bioeconomy systems*, em fase de consulta pública.

Além das definições apresentadas na Tabela 12, as referências analisadas frequentemente incluem listas específicas que classificam diferentes matérias-primas, destacando tanto os critérios utilizados quanto as abordagens aplicadas na classificação. A Tabela 13 apresenta um resumo consolidado desses resultados.

Tabela 13 Resumo das Abordagens Adotadas em Diferentes diretrizes e calculadoras

	Conceitos	Lista dos principais	Considerações com relação à fronteira	Critério de classificação
Ecoinvent	Matéria prima	Óleo de colza Óleo de soja Óleo de palma Cana de açúcar Glicerina	Considera desde a etapa agrícola de produção da matéria prima.	Critério econômico, sendo considerado se possui valor de mercado (reciclável) ou se não há interesse na coleta sem compensação financeira (resíduo).
	Materiais recicláveis	Caroço de algodão Sebo Dejetos / esterco	Considera desde a etapa do transporte e tratamento do material.	
	Resíduos	Lodo de esgoto Resíduo biológico	Não considera as etapas de transporte e tratamento, estes são alocados ao sistema gerador do resíduo.	

	Conceitos	Lista dos principais	Considerações com relação à fronteira	Critério de classificação
Diretrizes europeias (RED II, RED III e Diretiva 2008/98/CE)	<i>Resíduos</i>	Palha, bagaço, restos de colheitas serragem, resíduos de poda, resíduos de processamento da indústria alimentar e madeireira, fração orgânica de resíduos sólidos urbanos (RSU), lodo de estações de tratamento de esgoto, resíduos da indústria de alimentos e resíduos de óleos usados.	Considera a etapa do transporte e considera a redução de emissões resultante da melhoria da gestão agrícola. Ao usar resíduos de origem animal, como estrume, para geração de biometano, a diretiva adota a abordagem de " fronteira expandida ", que considera os benefícios ambientais além do simples processo de conversão.	Não diferencia resíduo de material reciclável. Por utilizar o conceito de fronteira expandida, considera todos os resíduos como material reciclado.
	<i>Subprodutos</i>			
Estados Unidos (Clean Air Act) Renewable Fuel Standard (RFS)		Resíduos agrícolas e florestais: como restos de colheitas, madeira e resíduos de processamento de alimentos, podem ser classificados como matérias-primas para biocombustíveis. Resíduos sólidos urbanos (RSU): a fração orgânica desses resíduos pode ser usada para produzir biocombustíveis como biogás e biometano. Resíduos industriais: subprodutos de processos industriais, como resíduos da produção de alimentos ou bebidas, também podem ser considerados.	Para se qualificar como um combustível renovável sob o programa RFS, um combustível deve ser produzido a partir de matérias-primas aprovadas além de ter emissões de GEE do ciclo de vida que sejam pelo menos 20 por cento menores do que a gasolina e os combustíveis diesel de base petrolífera. Já os biocombustíveis avançados e o diesel de base biomassa devem ter emissões de GEE do ciclo de vida que sejam pelo menos 50 por cento menores do que os combustíveis de base, enquanto o biocombustível celulósico deve ter emissões do ciclo de vida pelo menos 60 por cento menores do que os combustíveis de base	Pela abordagem da fronteira, considera todos os materiais reaproveitados como "reciclável".
Califórnia – Calculadora do Conselho de Recursos atmosféricos	Matéria prima	Óleo de soja, óleo de canola e óleo de palma		
	Material reciclável*	Óleo de destilação, óleo de cozinha usado, gordura animal Dejetos suínos e de laticínios Resíduo orgânico para biodigestor	Adota-se uma abordagem de expansão do sistema , subtraindo as emissões da linha de base (lagoa coberta) ou o conteúdo de CH ₄ do biometano, o que for de menor valor. Assim como a calculadora de dejetos suínos e bovinos de leite, para os resíduos orgânicos em biodigestores, subtrai as emissões da linha de base, ou seja, as emissões evitadas pelo não aterramento dos resíduos orgânicos.	

	Conceitos	Lista dos principais	Considerações com relação à fronteira	Critério de classificação
Canadá - Clean Fuel Regulations SOE/2022- 140	Resíduo	Lodo de estação de tratamento de efluentes Resíduo sólido urbano	Considera a partir da geração do biogás.	
	Matéria prima	Culturas agrícolas Sorgo	A fronteira inclui desde a etapa agrícola.	
	Resíduo	Resíduos de colheitas ou colheitas danificadas; Resíduos florestais secundários que são subprodutos de operações industriais de processamento de madeira, orgânicos usados ou não comestíveis de uma área residencial, uma loja de varejo, um restaurante, um fornecedor de alimentos ou uma planta de processamento de alimentos, gordura usada e óleos vegetais usados, lixo animal usado, materiais animais, incluindo esterco, efluentes industriais, águas residuais municipais e materiais de construção usados e materiais de demolição, resíduos de uma instalação de processamento de resíduos que produz biogás,	Apresenta o modelo “Fuel LCA Model” Resíduo de gordura animal, conceituado como “reciclável”, considerando desde a etapa de transporte e processamento.	
	Material reciclável	Subprodutos animais Resíduos de colheita	Adota a abordagem de expansão do sistema, aplicada quando um material residual é usado como matéria-prima para a produção de combustível de baixa intensidade de carbono e resulta em reduções reais de metano. Neste caso, o limite do sistema em torno do material residual para produção de combustível deve ser expandido para incluir o diferencial de emissão entre o uso do material residual para produção de combustível e um cenário de linha de base que teria ocorrido se o material residual não fosse usado para produção de combustível.	

	Conceitos	Lista dos principais	Considerações com relação à fronteira	Critério de classificação
CORSIA			Para os resíduos da colheita, uma aplicação adicional de fertilizante nitrogenado (N), necessária devido à remoção dos resíduos.	Com base no critério econômico e demanda de mercado.
	Produtos primários e coprodutos	Melaço Óleo de palma Grão de milho Óleo de colza Óleo de soja Cana de açúcar Culturas energéticas		
	Subprodutos:	Sebo Gorduras animais Destilados		
	Resíduos	Bagaço Casca Espigas Estrumes Estercos Glicerina Lodo de esgoto RSU Óleo de cozinha usado	Considera desde a coleta do material. Para os RSU (orgânicos e recicláveis) adota o conceito de “fronteira expandida”, onde as emissões evitadas do aterro e diferença do consumo energético da reciclagem dos materiais (plástico e metal) em relação à produção do material virgem são subtraídas da intensidade de carbono.	
IMO	Coproducto			Com base no critério econômico e demanda de mercado.
	Resíduo/lixo (waste)		Quando a matéria-prima é um resíduo ou subproduto, as emissões consideradas no ciclo "poço-para-tanque" são contabilizadas a partir do ponto de coleta da matéria-prima até o uso final do combustível ou produto energético.	
PEFCR (Europa)			Adota o conceito de “fronteira expandida”, onde o crédito dos materiais recicláveis é subtraído do resultado final.	Critério econômico

6. Principais considerações e conclusões

A revisão das normativas e diretrizes, assim como das ferramentas de cálculo aplicadas à contabilização das emissões do ciclo de vida dos biocombustíveis, revelou importantes aspectos relacionados à classificação das matérias-primas, em especial a definição de resíduos. A análise demonstrou que a maioria das normativas utiliza uma abordagem atribucional, na qual as emissões são contabilizadas desde o momento da coleta dos resíduos. Entretanto, em casos específicos, como no tratamento de dejetos animais, algumas diretrizes adotam a expansão do sistema, refletindo variações na maneira como diferentes fontes tratam o impacto ambiental desses materiais.

Outro ponto relevante é que, embora muitas dessas normativas classifiquem os substratos como resíduos, as fronteiras de análise do ciclo de vida se assemelham às de materiais reciclados. Isso significa que as emissões associadas são contabilizadas desde a fase de coleta, sublinhando uma abordagem que considera o potencial de reaproveitamento desses materiais.

A abordagem proposta pela CORSIA, que estabelece critérios claros para determinar quando um material deixa de ser considerado resíduo com base em seu valor e uso, mostrou-se particularmente sólida e poderia servir como um modelo eficaz para a classificação de matérias-primas no setor de biocombustíveis. Esses critérios proporcionam maior clareza ao delinear quando um material residual adquire valor agregado, ajudando a diferenciar resíduos de insumos com potencial econômico.

Com base na análise de normativas como RED II e RED III da União Europeia, CORSIA, IMO, CARB-California, Renewable Fuel Standard (RFS), no contexto da Clean Air Act dos EUA e regulamentos do Canadá, observa-se que, embora as metodologias variem, há uma convergência para uma abordagem integrada que considera tanto o ciclo de vida dos materiais quanto o valor residual dos substratos. No entanto, essas normativas enfrentam desafios similares em relação à definição precisa de resíduos. A adoção de critérios específicos, como os aplicados pela CORSIA, reforça a necessidade de um alinhamento internacional para uniformizar a classificação de resíduos e matérias-primas, o que traria maior consistência nas políticas de contabilização das emissões globais.

Por fim, a lista de matérias-primas atualmente utilizada pelo Renovabio pode ser significativamente aprimorada. Incorporar critérios mais detalhados para a classificação de resíduos ou matérias-primas com valor agregado, baseados em abordagens como a do CORSIA, ajudaria a garantir que apenas materiais realmente residuais sejam considerados como tais. Esses aprimoramentos trariam mais rigor à contabilização das emissões e promoveriam uma maior harmonia entre diferentes normativas, facilitando a transição para um uso mais sustentável e eficiente dos biocombustíveis.

Parte 2: Estudo do impacto que a mudança de conceito (resíduo / reciclável / subproduto) causa no renovabio e proposta de uma árvore de decisão

1. Introdução e Contextualização

No setor de biocombustíveis, a classificação correta das **matérias-primas** como **resíduo** ou **produto reciclável** é fundamental para determinar os impactos associados à produção de combustíveis renováveis. As matérias-primas incluem biomassa agrícola, óleos vegetais e resíduos orgânicos, sendo que estas últimas têm ganhado relevância no contexto de uma economia circular, onde os resíduos são reaproveitados como insumos energéticos.

A biomassa agrícola, como cana-de-açúcar e milho, é cultivada com o objetivo de produzir biocombustíveis, sendo geralmente considerada um **produto** de alto valor agregado. Por outro lado, **resíduos orgânicos**, provenientes de subprodutos agroindustriais, urbanos ou animais, frequentemente não possuem valor de mercado significativo em seu estado bruto. Eles são geralmente classificados como **resíduos**, uma vez que sua produção não é intencional e não resulta diretamente em outros produtos. Contudo, quando processados adequadamente, esses materiais podem ser transformados em biocombustíveis, que desempenham um papel crucial na gestão sustentável dos resíduos.

Assim, a classificação de uma matéria-prima como resíduo ou produto pode variar conforme interesses econômicos e condições de mercado. Em muitos casos, materiais inicialmente considerados resíduos sem valor podem se tornar subprodutos com mercado estabelecido à medida que novas tecnologias de aproveitamento emergem e a demanda por soluções sustentáveis cresce.

Em termos de ciclo de vida a distinção entre matérias-primas como produto, subproduto, resíduos ou recicláveis tem implicações diretas nas rotas tecnológicas adotadas e nas responsabilidades legais e ambientais associadas. Essa classificação afeta o tipo de tratamento que deve ser aplicado ao material, influenciando diretamente a responsabilidade dos produtores em relação ao impacto ambiental dos resíduos gerados. Nesse contexto, surge o princípio do **poluidor-pagador**, que estabelece que aqueles que causam danos ao meio ambiente, ao gerar resíduos ou poluição, devem arcar com os custos de mitigação ou compensação desses impactos.

Nesse sentido no setor de biocombustíveis, isso significa que os produtores que utilizam matérias-primas classificadas como resíduos, não teriam o ônus tratamento desses materiais na intensidade de carbono do biocombustível. Já se forem considerados reciclados a fronteira consideraria desde a coleta desse material e posterior tratamento

para a intensidade do biocombustível final. Portanto, a correta classificação dos materiais influencia a responsabilidade legal e econômica das empresas no tratamento dos resíduos. Diante do exposto este capítulo tem como objetivo estudar o impacto das mudanças no conceito de certas matérias-primas como **resíduo, reciclável e produto** no contexto do programa RenovaBio.

2. Classificações de Matérias-Primas para Biocombustíveis nas Resoluções Internacionais e a Resolução N° 758/2018

A Resolução N° 758/2018 apresenta uma lista positiva para resíduos, sendo na prática adotado o conceito de material reciclável, sendo considerado desde a etapa de coleta do material no local de geração. A Tabela 14 compara a classificação desses materiais em relação a diversas resoluções internacionais e calculadoras, a fim de verificar como esses resíduos são classificados em outros países.

Tabela 14 Comparação da classificação das matérias-primas para biocombustíveis das diferentes resoluções internacionais em relação a Resolução Nº 758/2018

Resíduo / Material	RenovaCalc		Europa RED II e RED III		EUA: Renewable Fuel Standard (RFS)		California Air Resources Board – CARB		Canadá: Clean Fuel Regulations		Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA)	
	Classificação	Abordagem / Fronteira considerada	Classificação	Abordagem / Fronteira considerada	Classificação	Abordagem / Fronteira considerada	Classificação	Abordagem / Fronteira considerada	Classificação	Abordagem / Fronteira considerada	Classificação	Abordagem / Fronteira considerada
Palhas de cana-de-açúcar, de milho, de sorgo e de trigo	Resíduos de culturas agrícolas e florestais	“Reciclável” / A partir do transporte	Resíduos e/ou subprodutos listado na Parte A	“Reciclável” / A partir do transporte	Biomassa renovável: Resíduos de colheita	“Reciclável” / A partir do transporte	-	-	Resíduos de colheitas ou colheitas danificadas	“Reciclável” “Carga zero” de produção. Considerando: coleta dos resíduos e aplicação da “carga” adicional de fertilizante.	“Resíduos” agrícolas: Palha	“Reciclável” Coleta, recuperação e processamento são incluídos
Cascas de arroz, de noz, de café e similares	Resíduos de culturas agrícolas e florestais	“Reciclável” / A partir do transporte	Resíduos e/ou subprodutos listado na Parte A	“Reciclável” / A partir do transporte	Biomassa renovável: Resíduos de colheita	“Reciclável” / A partir do transporte	-	-	Resíduos de colheitas ou colheitas danificadas	“Reciclável” “Carga zero” de produção. Considerando: coleta dos resíduos e processamento, se aplicável	“Resíduos” agrícolas: Cascas	“Reciclável” Coleta, recuperação e processamento são incluídos
Sabugo de milho	Resíduos de culturas agrícolas e florestais	“Reciclável” / A partir do transporte	Resíduos e/ou subprodutos listado na Parte A	“Reciclável” / A partir do transporte	Biomassa renovável: Resíduos de colheita	“Reciclável” / A partir do transporte	-	-	Resíduos de colheitas ou colheitas danificadas	“Reciclável” “Carga zero” de produção. Considerando: coleta dos resíduos e processamento, se aplicável	“Resíduos” agrícolas: Espigas	“Reciclável” Coleta, recuperação e processamento são incluídos
Cascas, tocos, ramos, folhas, agulhas, copas de árvores,	Resíduos de culturas agrícolas e florestais	“Reciclável” / A partir do transporte	Resíduos e/ou subprodutos listado na Parte A	“Reciclável” / A partir do transporte	Biomassa renovável: Resíduos de árvores	“Reciclável” / A partir do transporte	-	-	Resíduos florestais secundários que são subprodutos de operações	“Reciclável” “Carga zero” de produção. Considerando: coleta dos resíduos e	“Resíduos” florestais: Casca / Galhos / Aparas de corte / Folhas / Serragem /	“Reciclável” Coleta, recuperação e processamento

Resíduo / Material	RenovaCalc		Europa RED II e RED III		EUA: Renewable Fuel Standard (RFS)		California Air Resources Board – CARB		Canadá: Clean Fuel Regulations		Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA)	
	Classificação	Abordagem / Fronteira considerada	Classificação	Abordagem / Fronteira considerada	Classificação	Abordagem / Fronteira considerada	Classificação	Abordagem / Fronteira considerada	Classificação	Abordagem / Fronteira considerada	Classificação	Abordagem / Fronteira considerada
aparas florestais e serragem provenientes de florestas plantadas ou de florestas nativas									industriais de processamento de madeira	processamento, se aplicável	Copas de árvores	nto são incluídos
Vinhaça e outros efluentes agroindustriais	Resíduos de processamento	“Reciclável” / A partir do transporte	Resíduos e/ou subprodutos listado na Parte A	“Reciclável” / A partir do transporte	-	-	-	-	Efluentes industriais / Resíduos de uma instalação de processamento de resíduos que produz biogás	“Reciclável” “Carga zero” de produção. Considerando: coleta dos resíduos e processamento, se aplicável	-	-
Bagaço de cana-de-açúcar e sorgo;	Resíduos de processamento	“Reciclável” / A partir do transporte	Resíduos e/ou subprodutos listado na Parte A	“Reciclável” / A partir do transporte	-	-	-	-	-	-	“Resíduos “agrícolas: Bagaço	“Reciclável” Coleta, recuperação e processamento são incluídos
Torta de filtro, cinzas e fuligem;	Resíduos de processamento	“Reciclável” / A partir do transporte	Resíduos e/ou subprodutos listado na Parte A	“Reciclável” / A partir do transporte	-	-	-	-	-	-	-	-
Gordura animal;	Resíduos de processamento	“Reciclável” / A partir do transporte	Resíduos e/ou subprodutos listado na Parte A	“Reciclável” / A partir do transporte	Biomassa renovável: Resíduos animais e subprodutos animais.	“Reciclável” / A partir do transporte	Matéria prima para biodiesel e HEFA	“Reciclável” Tratamento do resíduo	Materiais animais, incluindo esterco	“Reciclável” “Carga zero” de produção. Considerado o processamento dos subprodutos animais,	“Subproduto” Gordura de aves / Gordura de porco / Gordura de animais mistos	“Reciclável” Coleta, recuperação e processamento são incluídos

Resíduo / Material	RenovaCalc		Europa RED II e RED III		EUA: Renewable Fuel Standard (RFS)		California Air Resources Board – CARB		Canadá: Clean Fuel Regulations		Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA)	
	Classificação	Abordagem / Fronteira considerada	Classificação	Abordagem / Fronteira considerada	Classificação	Abordagem / Fronteira considerada	Classificação	Abordagem / Fronteira considerada	Classificação	Abordagem / Fronteira considerada	Classificação	Abordagem / Fronteira considerada
										alocados entre a farinha e a gordura e transporte (100 km)		
Outros resíduos de origem animal;	Resíduos de processamento	“Reciclável” / A partir do transporte	Resíduos e/ou subprodutos listado na Parte A	“Reciclável” / A partir do transporte	Biomassa renovável: Resíduos animais e subprodutos animais.	“Reciclável” / A partir do transporte	-	-	Materiais animais, incluindo esterco	“Reciclável” “Carga zero” de produção. Considerando: coleta dos resíduos e processamento, se aplicável	-	-
Borras	Resíduos de processamento	“Reciclável” / A partir do transporte	Resíduos e/ou subprodutos listado na Parte A	“Reciclável” / A partir do transporte	-	-	-	-	Efluentes industriais	“Reciclável” “Carga zero” de produção. Considerando: coleta dos resíduos e processamento, se aplicável	“Resíduos” de processamento	“Reciclável” Coleta, recuperação e processamento são incluídos
Óleo de fritura usado	Resíduos de processamento	“Reciclável” / A partir do transporte	Resíduos e/ou subprodutos listado na Parte B	“Reciclável” / A partir do transporte	Biomassa renovável: Resíduos de jardim ou restos de comida separados, incluindo gordura reciclada de cozinha e de sifão.	“Reciclável” / A partir do transporte	Matéria prima para biodiesel e HEFA	“Reciclável” Tratamento do resíduo	Gordura usada e óleos vegetais usados	“Reciclável” “Carga zero” de produção. Considerando: coleta dos resíduos e processamento, se aplicável	“Resíduos” Óleo de cozinha usado	“Reciclável” Coleta, recuperação e processamento são incluídos

Resíduo / Material	RenovaCalc		Europa RED II e RED III		EUA: Renewable Fuel Standard (RFS)		California Air Resources Board – CARB		Canadá: Clean Fuel Regulations		Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA)	
	Classificação	Abordagem / Fronteira considerada	Classificação	Abordagem / Fronteira considerada	Classificação	Abordagem / Fronteira considerada	Classificação	Abordagem / Fronteira considerada	Classificação	Abordagem / Fronteira considerada	Classificação	Abordagem / Fronteira considerada
Dejetos animais	Outros	“Reciclável”/ A partir do transporte	Resíduos e/ou subprodutos listado na Parte A	“Reciclável”/ A partir do transporte – com bonificação de -45 g CO2eq/MJ pela melhor gestão agrícola e do estrume	Biomassa renovável: Resíduos animais e subprodutos animais.	“Reciclável”/ A partir do transporte	Matéria prima para biometano	Reciclável” A partir do tratamento do resíduo no conceito de “fronteira expandida”, subtraindo o metano evitado / cenário base	Materiais animais, incluindo esterco	“Reciclável” “Carga zero” de produção. Considerando: coleta dos resíduos e processamento, se aplicável	“Resíduos” agrícolas: Esterco Resíduos agrícolas: Estrume	“Reciclável” Coleta, recuperação e processamento são incluídos
Cama de aviário	Outros	“Reciclável”/ A partir do transporte	Resíduos e/ou subprodutos listado na Parte A	“Reciclável”/ A partir do transporte – com bonificação de -45 g CO2eq/MJ pela melhor gestão agrícola e do estrume	Biomassa renovável: Resíduos animais e subprodutos animais.	“Reciclável”/ A partir do transporte	-	-	Materiais animais, incluindo esterco	“Reciclável” “Carga zero” de produção. Considerando: coleta dos resíduos e processamento, se aplicável	“Resíduos” agrícolas: Cascas	“Reciclável” Coleta, recuperação e processamento são incluídos
Resíduos de alimentos em geral	Outros	“Reciclável”/ A partir do transporte	Resíduos e/ou subprodutos listado na Parte A	“Reciclável”/ A partir do transporte	Biomassa renovável: Resíduos de jardim ou restos de comida separados, incluindo gordura reciclada de cozinha e de sifão.	“Reciclável”/ A partir do transporte	Resíduo orgânico para produção de biometano	“Reciclável” A partir do tratamento do resíduo no conceito de “fronteira expandida”, subtraindo o cenário base (aterro sanitário)	Orgânicos usados ou não comestíveis de uma área residencial, uma loja de varejo, um restaurante, um fornecedor de alimentos ou uma planta de	“Reciclável” “Carga zero” de produção. Considerando: coleta dos resíduos e processamento, se aplicável”	Aborda a questão de emissões evitadas, subtraindo as emissões do aterro / consumo energético para recicláveis	“Reciclável” Coleta, recuperação e processamento são incluídos, com subtração do cenário base

Resíduo / Material	RenovaCalc		Europa RED II e RED III		EUA: Renewable Fuel Standard (RFS)		California Air Resources Board – CARB		Canadá: Clean Fuel Regulations		Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA)	
	Classificação	Abordagem / Fronteira considerada	Classificação	Abordagem / Fronteira considerada	Classificação	Abordagem / Fronteira considerada	Classificação	Abordagem / Fronteira considerada	Classificação	Abordagem / Fronteira considerada	Classificação	Abordagem / Fronteira considerada
									processamento de alimentos			
Resíduos sólidos orgânicos de processos industriais com origem biológica	Outros	“Reciclável” / A partir do transporte	Resíduos e/ou subprodutos listado na Parte A	“Reciclável” / A partir do transporte	-	-	Resíduo orgânico para produção de biometano	“Reciclável” A partir do tratamento do resíduo no conceito de “fronteira expandida”, subtraindo o cenário base (aterro sanitário)	Orgânicos usados ou não comestíveis de uma área residencial, uma loja de varejo, um restaurante, um fornecedor de alimentos ou uma planta de processamento de alimentos	“Reciclável” “Carga zero” de produção. Considerando: coleta dos resíduos e processamento, se aplicável	-	-
Esgoto sanitário e lodo de estação de tratamento de efluentes	Outros	“Reciclável” / A partir do transporte	Resíduos e/ou subprodutos listado na Parte A	“Reciclável” / A partir do transporte	-	-	Resíduo para produção de biometano	A partir da geração do biogás	Águas residuais municipais	“Resíduo” “Carga zero”	-	-
Biogás de aterro sanitário	Outros	“Reciclável” / A partir do transporte	-	-	Biointermediário	A partir do upgrading	Resíduo para produção de biometano	A partir da geração do biogás	Resíduos de uma instalação de processamento de resíduos que produz biogás	“Resíduo” “Carga zero”	-	-

Para facilitar a compreensão, a Tabela 15 utiliza indicadores de cores: classificações idênticas são destacadas em azul claro, classificações com adição de impactos em vermelho, e classificações com subtração de impactos em verde.

Tabela 15 Comparação das Classificações de Resíduos com Indicadores por Cor

	RenovaCalc	Europa RED II e RED III	EUA: Renewable Fuel Standard (RFS)	California Air Resources Board – CARB	Canadá: Clean Fuel Regulations	(CORSIA)
Palhas de cana-de-açúcar, de milho, de sorgo e de trigo	“Reciclável”/ A partir do transporte	=	=	NA	+ Carga adicional do fertilizante	=
Cascas de arroz, de noz, de café e similares	“Reciclável”/ A partir do transporte	=	=	NA	=	=
Sabugo de milho	“Reciclável”/ A partir do transporte	=	=	NA	=	=
Cascas, tocos, ramos, folhas, agulhas, copas de árvores, aparas florestais e serragem provenientes de florestas plantadas ou de florestas nativas	“Reciclável”/ A partir do transporte	=	=	NA	=	=
Vinhaça e outros efluentes agroindustriais	“Reciclável”/ A partir do transporte	=	NA	NA	=	NA
Bagaço de cana-de-açúcar e sorgo;	“Reciclável”/ A partir do transporte	=	NA	NA	NA	NA
Torta de filtro, cinzas e fuligem;	“Reciclável”/ A partir do transporte	=	NA	NA	NA	NA
Gordura animal	“Reciclável”/ A partir do transporte	=	=	=	- Impactos alocados entre a gordura e a farinha	=
Outros resíduos de origem animal;	“Reciclável”/ A partir do transporte	=	=	NA	=	NA
Borras	“Reciclável”/ A partir do transporte	=	NA	NA	=	=
Óleo de fritura usado	“Reciclável”/ A partir do transporte	=	=	=	=	=
Dejetos animais	“Reciclável”/ A partir do transporte	- Com crédito de “emissão evitada”	=	- Com crédito de metano evitado / cenário base	=	=
Cama de aviário	“Reciclável”/ A partir do transporte	- Com crédito de “emissão evitada”	=	NA	=	=
Resíduos de alimentos em geral	“Reciclável”/ A partir do transporte	=	=	- Com diminuição do cenário base (aterro)	=	- Com diminuição do cenário base (aterro)
Resíduos sólidos orgânicos de processos industriais com origem biológica	“Reciclável”/ A partir do transporte	=	NA	- Com diminuição do cenário base (aterro)	=	NA
Esgoto sanitário e todo de estação de tratamento de efluentes	“Reciclável”/ A partir do transporte	=	NA	- A partir do upgrading	- Permite o cálculo das emissões evitadas	NA
Biogás de aterro sanitário	“Reciclável”/ A partir do transporte	NA	- A partir do upgrading	- A partir do upgrading	- A partir do upgrading	NA

Embora as classificações sejam, em grande parte, consistentes entre as diferentes diretrizes, a principal divergência está relacionada à definição da fronteira do sistema. Muitas diretrizes adotam a expansão do sistema, especialmente para os dejetos animais e resíduos sólidos orgânicos, como aqueles que seriam destinados a aterros. Nesses casos, considera-se a subtração dos impactos evitados pela mudança de tecnologia, como a valorização energética, que reduzem significativamente os impactos ambientais. Ao incluir esses benefícios, as diferenças nas classificações tornam-se mais evidentes, refletindo as diferentes abordagens metodológicas e prioridades de cada regulamentação, o que pode influenciar diretamente os resultados das análises de impacto.

3. Lista de possíveis resíduos – consulta à ANP

A Agência Nacional do Petróleo tem recebido demandas para consulta relacionada ao enquadramento de materiais, a serem conceituados como “resíduos” e serem contabilizados com “carga zero” no cálculo de intensidade de carbono.

A Tabela 16 apresenta os materiais apresentados para consulta.

Tabela 16. Lista de materiais para consulta quanto à origem (resíduo ou matéria prima) junto à ANP.

Resíduo (possível)	Origem	Sendo usado como matéria prima para:
Óleo Ácido de Milho	Usinas de etanol de milho	Produção de Biodiesel
Ester semiacabado	Refinaria química (o material é produzido a partir de ácidos graxos obtidos através da acidulação da borra/resíduo do refino físico e/ou da neutralização química do óleo de soja e/ou da glicerina bruta de biodiesel	Produção de Biodiesel
Oleína	hidrólise da gordura animal e óleos vegetais após a separação da glicerina , subproduto da produção da produção de biodiesel	Produção de Biodiesel
Ácido graxo	Pré-tratamento físico das matérias primas (gordura animal) (refinaria) resulta no óleo desodorizado e ácido graxo	Produção de Biodiesel
Melaço de soja	Usinas de biodiesel	Produção de Etanol

O **Óleo Ácido de Milho** é um material gerado nas usinas de etanol de milho durante o processo de produção de biocombustíveis. Esse óleo é extraído principalmente da parte rica em gordura presente no milho após a fermentação e destilação do etanol. Comumente, ele é utilizado como insumo em indústrias de biodiesel, ração animal ou em processos químicos industriais devido ao seu teor significativo de ácidos graxos livres.

O **Ester Semiacabado** é um material intermediário resultante de processos químicos na refinação de óleos e gorduras, frequentemente empregado na produção de biodiesel e

outros produtos químicos. Esse material é obtido a partir de ácidos graxos, que podem ser extraídos de diferentes fontes, incluindo a acidulação da borra ou resíduo do refino físico de óleos, a neutralização química do óleo de soja e a glicerina bruta gerada durante a produção de biodiesel.

A **oleína** é uma fração líquida dos óleos vegetais e das gorduras animais, resultante do processo de hidrólise e separação da glicerina, especialmente durante a produção de biodiesel. Este subproduto é amplamente utilizado em diversas aplicações, aproveitando suas propriedades e características químicas.

Os **ácidos graxos** são compostos orgânicos essenciais na química dos lipídios, desempenhando um papel fundamental na produção de biodiesel. Eles podem ser obtidos por meio do pré-tratamento físico das matérias-primas, como gorduras animais, em refinarias. Este processo resulta na produção de óleo desodorizado e ácidos graxos livres, que são cruciais para a produção de biocombustíveis.

O **melaço de soja** é produzido a partir da extração do óleo da soja, durante a fabricação de produtos como óleo de soja e farelo. Durante esse processo, os açúcares e outros compostos não desejados são separados, resultando no melaço, que é uma mistura viscosa e escura rica em carboidratos, aminoácidos, vitaminas e minerais. O melaço de soja pode ser fermentado para produzir etanol, um biocombustível amplamente utilizado. O processo de fermentação envolve a inoculação do melaço com micro-organismos, como leveduras, que convertem os açúcares presentes em etanol e dióxido de carbono. O melaço de soja em sua forma bruta é geralmente vendido por preços baixos, para uso como ingrediente em ração animal (Karp et al., 2016).

Com base na revisão de literatura é possível verificar como as demais diretrizes e calculadoras classificam esses materiais, assim a Tabela 17 apresenta o conceito adotado nessas outras diretrizes e calculadoras para os materiais mencionados.

Tabela 17. Classificações e fronteiras consideradas nas diferentes diretrizes para óleos, ácidos graxos e ésteres como substratos de biocombustíveis.

Resíduo / Material	RenovaCalc		Europa RED II e RED III		EUA: Renewable Fuel Standard (RFS)		California Air Resources Board – CARB		Canadá: Clean Fuel Regulations		Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA)	
	Classificação	Abordagem / Fronteira considerada	Classificação	Abordagem / Fronteira considerada	Classificação	Abordagem / Fronteira considerada	Classificação	Abordagem / Fronteira considerada	Classificação	Abordagem / Fronteira considerada	Classificação	Abordagem / Fronteira considerada
Óleo Ácido de Milho	Matéria prima	Agrícola, processamento, distribuição e uso	Matéria prima	Agrícola, processamento, distribuição e uso	Matéria prima	Agrícola, processamento, distribuição e uso	Matéria prima	Agrícola, processamento, distribuição e uso	Matéria prima	Agrícola, processamento, distribuição e uso	Subproduto	Processamento, distribuição e uso
Ester semiacabado – ácido graxo de gordura animal	Resíduos de processamento	“Reciclável” / A partir do transporte	Resíduos e/ou subprodutos listado na Parte A	“Reciclável” / A partir do transporte	Biomassa renovável: Resíduos animais e subprodutos animais.	“Reciclável” / A partir do transporte	Matéria prima para biodiesel e HEFA	“Reciclável” Tratamento do resíduo	Materiais animais, incluindo esterco	“Reciclável” “Carga zero” de produção. Considerado o processamento dos subprodutos animais, alocados entre a farinha e a gordura e transporte (100 km)	“Subproduto” Gordura de aves / Gordura de porco / Gordura de animais mistos	“Reciclável” Coleta, recuperação e processamento são incluídos
Ester semiacabado – ácido graxo de óleo de soja ou outra cultura	Matéria prima	Agrícola, processamento, distribuição e uso	Matéria prima	Agrícola, processamento, distribuição e uso	Matéria prima	Agrícola, processamento, distribuição e uso	Matéria prima	Agrícola, processamento, distribuição e uso	Matéria prima	Agrícola, processamento, distribuição e uso	Matéria prima	Agrícola, processamento, distribuição e uso
Ester semiacabado – ácido graxo de glicerina	Matéria prima	Agrícola, processamento, distribuição e uso, com alocação aos óleos	Resíduos e/ou subprodutos listado na Parte A	“Reciclável” / A partir do transporte	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Resíduo de processamento	“Reciclável” Coleta, recuperação e processamento são incluídos

Resíduo / Material	RenovaCalc		Europa RED II e RED III		EUA: Renewable Fuel Standard (RFS)		California Air Resources Board – CARB		Canadá: Clean Fuel Regulations		Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA)	
	Classificação	Abordagem / Fronteira considerada	Classificação	Abordagem / Fronteira considerada	Classificação	Abordagem / Fronteira considerada	Classificação	Abordagem / Fronteira considerada	Classificação	Abordagem / Fronteira considerada	Classificação	Abordagem / Fronteira considerada
Oleína – hidrólise de gordura animal	Resíduos de processamento	“Reciclável” / A partir do transporte	Resíduos e/ou subprodutos listado na Parte A	“Reciclável” / A partir do transporte	Biomassa renovável: Resíduos animais e subprodutos animais.	“Reciclável” / A partir do transporte	Matéria prima para biodiesel e HEFA	“Reciclável” Tratamento do resíduo	Materiais animais, incluindo esterco	“Reciclável” “Carga zero” de produção. Considerado o processamento dos subprodutos animais, alocados entre a farinha e a gordura e transporte (100 km)	“Subproduto” Gordura de aves / Gordura de porco / Gordura de animais mistos	“Reciclável” Coleta, recuperação e processamento são incluídos
Oleína – hidrólise de óleos vegetais	Matéria prima	Agrícola, processamento, distribuição e uso	Matéria prima	Agrícola, processamento, distribuição e uso	Matéria prima	Agrícola, processamento, distribuição e uso	Matéria prima	Agrícola, processamento, distribuição e uso	Matéria prima	Agrícola, processamento, distribuição e uso	Matéria prima	Agrícola, processamento, distribuição e uso
Ácido graxo – gordura animal	Resíduos de processamento	“Reciclável” / A partir do transporte	Resíduos e/ou subprodutos listado na Parte A	“Reciclável” / A partir do transporte	Biomassa renovável: Resíduos animais e subprodutos animais.	“Reciclável” / A partir do transporte	Matéria prima para biodiesel e HEFA	“Reciclável” Tratamento do resíduo	Materiais animais, incluindo esterco	“Reciclável” “Carga zero” de produção. Considerado o processamento dos subprodutos animais, alocados entre a farinha e a gordura e transporte (100 km)	“Subproduto” Gordura de aves / Gordura de porco / Gordura de animais mistos	“Reciclável” Coleta, recuperação e processamento são incluídos
Ácido graxo – culturas energéticas	Matéria prima	Agrícola, processamento, distribuição e uso	Matéria prima	Agrícola, processamento, distribuição e uso	Matéria prima	Agrícola, processamento, distribuição e uso	Matéria prima	Agrícola, processamento, distribuição e uso	Matéria prima	Agrícola, processamento, distribuição e uso	Matéria prima	Agrícola, processamento, distribuição e uso

Resíduo / Material	RenovaCalc		Europa RED II e RED III		EUA: Renewable Fuel Standard (RFS)		California Air Resources Board – CARB		Canadá: Clean Fuel Regulations		Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA)	
	Classificação	Abordagem / Fronteira considerada	Classificação	Abordagem / Fronteira considerada	Classificação	Abordagem / Fronteira considerada	Classificação	Abordagem / Fronteira considerada	Classificação	Abordagem / Fronteira considerada	Classificação	Abordagem / Fronteira considerada
Melaço de soja	Matéria prima	Agrícola, processament o, distribuição e uso									Coproducto	Agrícola, processame nto, distribuição e so

4. Taxonomia para classificação de matéria-prima

A implementação de uma árvore de decisão pode ser uma ferramenta útil para a classificação de materiais utilizados para a produção de biocombustíveis, desempenhando um papel na organização e sistematização desse setor. Em um contexto em que a variedade de matérias-primas, produtos, co-produtos, subprodutos e resíduos é vasta, uma árvore de decisão oferece um caminho claro e lógico para a categorização desses elementos. Essa estrutura não apenas facilita o entendimento e a identificação das características dos materiais, mas também promove a padronização das classificações, essencial para garantir a consistência nas comunicações e nas práticas da indústria.

A padronização das classificações é especialmente importante em um cenário onde a discussão sobre biocombustíveis está em constante evolução. Com uma classificação clara e unificada, as partes interessadas, desde produtores e pesquisadores até reguladores e consumidores, podem compartilhar informações de maneira mais eficaz e engajada. Isso contribui para um diálogo mais produtivo sobre o uso sustentável de recursos, o impacto ambiental dos biocombustíveis e as melhores práticas na produção.

Além disso, uma árvore de decisão facilita a tomada de decisões informadas e embasadas em critérios claros, ajudando a promover a transparência na cadeia de produção de biocombustíveis. Ao adotar essa abordagem sistemática, a indústria pode avançar em direção a uma gestão mais eficiente e sustentável dos materiais, incentivando a inovação e a melhoria contínua em um campo que é vital para a transição energética e a mitigação das mudanças climáticas.

- **Clareza e Simplicidade:** A árvore deve ser fácil de entender e aplicar, evitando jargões técnicos excessivos que possam confundir os usuários.
- **Flexibilidade:** Deve ser adaptável a diferentes contextos e tipos de materiais, permitindo ajustes conforme novas informações ou tecnologias surgem.
- **Validação e Revisão:** É importante que a árvore de decisão seja revisada periodicamente para garantir que esteja atualizada com as melhores práticas e inovações na indústria de biocombustíveis.

O CORSIA adota uma árvore de decisão como uma ferramenta para guiar a correta classificação dos materiais utilizados na produção de biocombustíveis como foi apresentado na Figura 4 (na seção 4.5.1). Essa abordagem sistemática permite avaliar as características de cada substância de forma criteriosa, levando em consideração aspectos como elasticidade da oferta, valor comercial ou técnico, e o uso posterior da substância. Ao seguir essa estrutura, as partes envolvidas podem determinar se um material deve ser classificado como produto primário, coproduto, subproduto ou resíduo.

A estrutura é composta por perguntas para a classificação de materiais, mas têm limitações que precisam ser consideradas no contexto de cada indústria. Baseada nas perguntas do fluxograma podemos discutir os pontos fortes e frágeis de cada etapa da tomada de decisão:

1. Existe amplo consenso entre abordagens regulatórias e voluntárias disponíveis ao público?

Pontos Fortes:

- **Clareza regulatória:** Se já há um consenso, a classificação é objetiva e segue diretrizes pré-estabelecidas, facilitando a tomada de decisão.
- **Segurança jurídica:** A existência de um consenso regulatório reduz incertezas e riscos jurídicos, garantindo conformidade com normas vigentes.
- **Simplificação do processo:** Elimina a necessidade de uma análise mais complexa, pois a substância é classificada automaticamente com base em padrões aceitos.

Pontos Fracos:

- **Rigidez:** O uso de regulamentos pode ser limitante em situações em que o consenso regulatório não acompanha inovações tecnológicas ou industriais, dificultando a inclusão de novos usos ou substâncias.
- **Falta de flexibilidade:** Se não há consenso regulatório, a análise precisa continuar, o que pode resultar em demora na tomada de decisão ou em incertezas para os gestores do processo.

2. A substância é produzida deliberadamente no processo?

Pontos Fortes:

- **Intencionalidade clara:** Determinar se a produção é deliberada ajuda a definir o material como um produto. Se a substância é o foco principal do processo produtivo, há fortes indícios de que se trata de um **produto**, e não de um resíduo ou subproduto.
- **Classificação precisa:** Focalizar na intenção da produção permite uma distinção mais clara entre **produtos principais** e **coprodutos**.

Pontos Fracos:

- **Dificuldade em processos complexos:** Em processos industriais com múltiplos produtos e subprodutos, pode ser difícil identificar claramente se uma substância foi "deliberadamente" produzida. Muitos coprodutos e subprodutos são produzidos inevitavelmente, mesmo que não sejam o objetivo principal.
- **Falta de consideração pelo valor secundário:** Apenas perguntar sobre a produção deliberada não leva em conta substâncias com **grande valor secundário**. Um coproduto pode não ser o foco do processo, mas ainda assim ter importância econômica.

3. É certo o uso posterior da substância (além da bioenergia)?

Pontos Fortes:

- **Avaliação de utilidade futura:** Essa pergunta identifica o valor futuro da substância e evita que resíduos sejam classificados como produtos apenas porque têm alguma utilidade (como bioenergia). A substância precisa ter um uso claro, além de simplesmente ser convertida em energia.
- **Segmentação clara de resíduos:** Ao excluir a bioenergia como uso posterior, facilita a separação entre resíduos energéticos e produtos/coprodutos, focando no valor agregado do material.

Pontos Fracos:

- **Falta de clareza em mercados emergentes:** Em setores onde novas formas de reaproveitamento de resíduos ainda estão sendo desenvolvidas, a incerteza quanto ao "uso certo" pode ser um limitador. Tecnologias em desenvolvimento, como a conversão de resíduos em bioplásticos, podem não ser imediatamente reconhecidas como "uso certo" no momento da decisão.

4. A substância pode ser usada diretamente sem processamento adicional, além da prática industrial normal?

Pontos Fortes:

- **Critério objetivo:** Essa pergunta oferece uma medida objetiva para distinguir substâncias que podem ser prontamente utilizadas em comparação àquelas que exigem processamento adicional, o que ajuda a classificá-las como coprodutos ou resíduos.
- **Eficiência do processo:** Ao focar no uso direto, avalia-se a eficiência do processo produtivo e se ele já produz substâncias úteis sem a necessidade de maiores modificações.

Pontos Fracos:

- **Limitação de usos potenciais:** Alguns materiais podem ter valor agregado significativo após **processamento adicional**. Subprodutos que passam por pequenos processos podem ser altamente valorizados em certos setores, mas essa pergunta pode desconsiderar isso, classificando erroneamente esses materiais como resíduos.
- **Variação de padrões industriais:** A "prática industrial normal" pode variar significativamente entre setores. O que é considerado "processamento adicional" em uma indústria pode ser parte do processo padrão em outra, gerando inconsistências na classificação.

5. A substância é parte integrante do processo de produção?

Pontos Fortes:

- **Foco na interdependência:** Essa pergunta reconhece se a substância é essencial para o funcionamento do processo produtivo, ajudando a classificar coprodutos que têm importância operacional dentro do sistema produtivo.
- **Classificação precisa de coprodutos:** Ao avaliar a integração ao processo, garante-se que substâncias indispensáveis ao funcionamento do processo (mesmo que não sejam produtos principais) sejam reconhecidas como coprodutos.

Pontos Fracos:

- **Falta de foco no valor econômico:** Essa pergunta pode não capturar o valor comercial da substância de forma adequada. Mesmo que uma substância seja parte integrante do processo, isso não necessariamente a torna valiosa em termos de mercado.
- **Ambiguidade em processos complexos:** Em sistemas produtivos complexos, várias substâncias podem ser "parte integrante" do processo em diferentes graus. Definir claramente o que é verdadeiramente integrante pode ser desafiador.

Embora a árvore de decisão seja uma ferramenta prática, o CORSIA também estabelece conceitos gerais para a classificação dos materiais. Produtos primários e coprodutos são considerados os principais resultados de um processo produtivo, com valor econômico significativo e oferta elástica, ou seja, sua produção está diretamente ligada à variação de preços. Subprodutos, por outro lado, são classificados como produtos secundários, caracterizados por uma oferta inelástica e um valor econômico reduzido, pois sua produção não responde de forma direta à demanda. Já os resíduos, com oferta inelástica e sem valor econômico, são materiais inevitavelmente gerados em um processo produtivo, sem finalidade comercial, reforçando a importância de categorização precisa para garantir o uso adequado de recursos no contexto dos biocombustíveis.

Esse conceito do CORSIA está claramente alinhado com os princípios da classificação de produtos definidos pela EPD (Declarações Ambientais de Produto), particularmente no que diz respeito à diferenciação entre produtos, coprodutos, subprodutos e resíduos. Ambas as abordagens enfatizam a **relação econômica e funcional** dos materiais dentro do processo produtivo e o impacto disso na sustentabilidade.

Em resumo é possível verificar que a clareza regulatória e a intenção deliberada são critérios objetivos discutidos nas classificações do CORSIA, mas podem deixar de considerar o valor secundário e o uso em mercados emergentes. As questões sobre elasticidade e interdependência fornecem uma análise econômica e técnica mais profunda, mas sua complexidade pode dificultar a aplicação prática em certos setores.

Para aprimorar o fluxo de tomada de decisão com base nos conceitos de **funções primárias e secundárias do produto e elasticidades de preço**, a tomada de decisão poderia incorporar critérios adicionais que considerem o papel específico da matéria-

prima e sua flexibilidade no processo produtivo. Segundo RO et al. (2023) na elaboração de uma árvore de decisão, um limite econômico é comum para distinguir entre coprodutos e subprodutos nas políticas de biocombustível

Nesse sentido, RO et al. (2023) apresentam uma árvore de decisão para designações de produto primário, coproduto, subproduto ou resíduo com base em sete perguntas, com duas perguntas diferentes feitas na quinta etapa, considerando um limite econômico para diferenciar entre as designações (Figura 6).

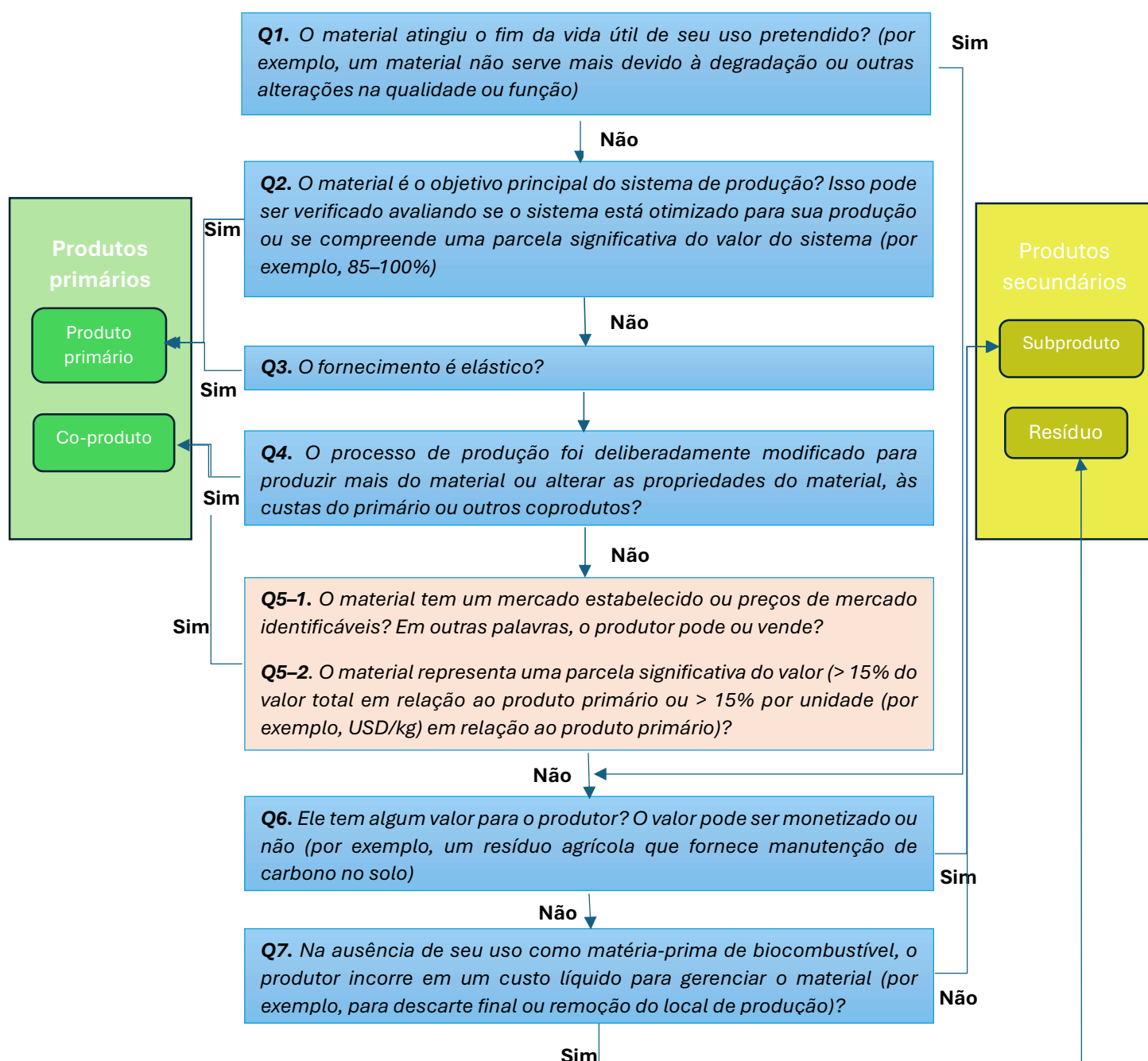


Figura 6 Taxonomia para classificação das matérias-primas para biocombustíveis proposta por RO et al. (2023).

Fonte: adaptado de RO et al. (2023)

O design da árvore de decisão leva a dois ramos que determinam a escolha do método de alocação: **uma abordagem de partição mais créditos de mudança indireta de uso da terra ou deslocamento de coprodutos consequentes para produtos primários e apenas efeitos consequentes para produtos secundários. Como subprodutos e resíduos são tratados como idênticos, eles não são distinguidos nesta taxonomia e apenas subprodutos são mostrados na figura da árvore de decisão.**

Um dos pontos importantes da árvore de decisão está relacionado à diferenciação entre materiais com base em critérios econômicos claros e objetivos. Na quinta etapa, são feitas duas perguntas cruciais: **(1)** "O material tem um mercado estabelecido ou preços de mercado identificáveis? Em outras palavras, o produtor pode ou vende o material?" e **(2)** "O material representa uma parcela significativa do valor (ou >15% do valor total para todos os produtos, ou >15% por unidade em relação ao produto primário)?" A primeira pergunta aborda a existência de mercado e viabilidade de comercialização, enquanto a segunda introduz um limite econômico para diferenciar materiais de baixo valor que possuem mercado, mas não geram receita significativa, de materiais que contribuem de forma substancial para a renda do produtor. Essa distinção é essencial para assegurar uma classificação precisa e funcional, alinhada às práticas de mercado e padrões globais. Os autores ainda destacam que limite econômico de 15% é extraído de padrões atuais; no entanto, a intenção não é sugerir que esse limite específico está correto, mas sim testar o efeito da implementação de um teste de limite econômico nesta taxonomia.

Cada pergunta é projetada para capturar um aspecto importante da categorização de materiais, mas a eficácia depende da disponibilidade de dados e da clareza nos critérios usados. Analisando as perguntas de forma individual é possível discutir os pontos fortes e frágeis de cada etapa da tomada de decisão:

Q1. O material atingiu o fim de sua vida útil?

- **Pontos Fortes:** Direciona a análise inicial, separando resíduos de outros materiais; é claro e objetivo.
- **Pontos Fracos:** Pode ser subjetivo dependendo da definição de "vida útil" e dos critérios de degradação.

Q2. O material é o objetivo primário do sistema de produção?

- **Pontos Fortes:** Ajuda a identificar se o material é um produto principal; essencial para sistemas otimizados para um objetivo específico.
- **Pontos Fracos:** Requer dados claros sobre o sistema de produção, o que pode ser complexo para processos multifuncionais.

Q3. A oferta é elástica?



- **Pontos Fortes:** Relaciona-se diretamente com o impacto econômico e o mercado.
- **Pontos Fracos:** Elasticidade pode ser difícil de medir em sistemas com flutuações sazonais ou falta de dados de mercado.

Q4. O processo foi deliberadamente modificado para produzir mais do material?

- **Pontos Fortes:** Identifica mudanças no sistema produtivo que afetam a categorização; avalia intenção.
- **Pontos Fracos:** Pode ser subjetivo e depender de dados históricos ou detalhes técnicos não disponíveis.

Q5-1. O material possui mercado estabelecido ou preço identificável?

- **Pontos Fortes:** Forte base econômica; foco na viabilidade comercial.
- **Pontos Fracos:** Materiais emergentes ou mercados nicho podem não ter dados claros.

Q5-2. O material representa parcela significativa do valor total?

- **Pontos Fortes:** Quantifica a importância econômica do material no sistema.
- **Pontos Fracos:** A definição de "significativo" pode variar; exige dados financeiros detalhados.

Q6. O material tem valor para o produtor?

- **Pontos Fortes:** Reconhece benefícios não monetários (e.g., manutenção do solo); visão ampla.
- **Pontos Fracos:** Difícil de quantificar valor subjetivo ou indireto.

Q7. A ausência do material gera custos líquidos?

- **Pontos Fortes:** Foca na sustentabilidade econômica e nos custos indiretos de descarte.
- **Pontos Fracos:** Pode subestimar impactos ambientais e sociais que não geram custos diretos ao produtor.

Para validar o modelo de árvore de decisão sugeridos, os autores apresentam testes realizados aplicando a árvore de decisão para 4 matérias primas utilizadas para a

fabricação de biocombustível: palha de milho, óleo de milho destilado, destilado de ácido graxo de palma (PFAD) e lama de trigo no contexto de produção dos Estados Unidos.

A palha de trigo foi considerada como um coproduto em virtude do preço dela representar entre 29 e 56% do grão de milho (pergunta 5.2). O óleo de milho destilado foi considerado um coproduto em virtude de o processo de produção foi deliberadamente modificado para produzir óleo de milho destilado (DCO), e ao fazer isso a quantidade e as características dos grãos de destilaria com solúveis (DGS) são alteradas. O destilado de ácido graxo de palma também foi considerado um coproduto em função das respostas das duas quintas perguntas. O PFAD pode ser usado como ração para gado, como matéria-prima para outros produtos e como combustível, e há um mercado bem estabelecido para essas necessidades. O valor econômico total do PFAD comparado ao do óleo de palma refinado, branqueado e desodorizado (RBD PO) é cerca de 3–4% devido ao volume relativamente pequeno do PFAD, o preço unitário do PFAD é cerca de 80% do RBD PO.

Já a “lama de trigo” foi designada como resíduo. Na resposta da pergunta 6, se entende que por mais que há muitos casos em que é aplicado na terra e, em teoria, poderia substituir as águas de irrigação e fornecer nutrientes aos solos, geralmente é a solução de menor custo para descarte e não está claro se beneficia a terra onde é aplicado.

Analisando essas duas propostas de árvores de decisão é possível verificar que um dos principais desafios na classificação de materiais, especialmente no contexto de biocombustíveis, é justamente equilibrar a precisão técnica com as complexidades econômicas e ambientais envolvidas. A análise de um material não se limita a uma simples categorização, mas envolve uma avaliação mais abrangente, que considera o impacto econômico (como elasticidade e valor de mercado) e as questões ambientais (como o potencial de redução de emissões).

Esse equilíbrio é frequentemente difícil de alcançar, pois os critérios técnicos de produção precisam ser ajustados às realidades de mercado e às metas de sustentabilidade ambiental. Para entender melhor esses sistemas complexos e suas implicações, os estudos de ciclo de vida (LCA - Life Cycle Assessment) têm se tornado cada vez mais utilizados. Esses estudos oferecem uma visão completa do impacto ambiental de um material ou produto, desde a extração das matérias-primas até seu descarte ou reaproveitamento. Dessa forma, é possível realizar uma análise mais detalhada das interações entre a produção de biocombustíveis e o meio ambiente, facilitando a tomada de decisões informadas que consideram todo o ciclo de vida do material.

Segundo RO et al. (2023) a aplicação da árvore de decisão pode enfrentar desafios significativos em situações envolvendo matérias-primas emergentes ou com usos e mercados heterogêneos. A falta de dados concretos e a possibilidade de manipulação nos critérios da árvore de decisão destacam a necessidade de uma análise mais robusta. Nesse contexto, solicitar estudos de Análise do Ciclo de Vida (LCA) para novas rotas de biocombustíveis é fundamental. O LCA complementa a árvore de decisão, fornecendo uma visão abrangente dos impactos ambientais e eliminando lacunas que poderiam comprometer a confiabilidade e a sustentabilidade das classificações propostas.

Por isso, os EUA exigem que, para o desenvolvimento de novas rotas de produção de biocombustíveis, os proponentes forneçam um estudo de ciclo de vida do sistema

proposto. Esse requisito ajuda a garantir que o impacto ambiental e os benefícios econômicos do material sejam cuidadosamente avaliados antes de sua implementação. Isso não apenas facilita a tomada de decisões, mas também promove uma harmonização entre as exigências técnicas, econômicas e ambientais, essencial para o sucesso de uma estratégia de biocombustíveis sustentável.

4.1 Aplicação da árvore de decisão

Esta seção tem como objetivo explorar a aplicação da árvore de decisão apresentada por RO et al. (2023) na classificação das matérias-primas utilizadas no contexto brasileiro, com foco nas especificidades e desafios locais. No Brasil, onde a diversidade de recursos naturais e a complexidade dos sistemas produtivos são marcantes, essa ferramenta pode contribuir significativamente para a criação de uma taxonomia que considere não apenas as características intrínsecas das matérias-primas, mas também as variáveis econômicas e os impactos ambientais associados. A análise proposta visa, portanto, aprimorar a compreensão sobre a classificação das matérias primas, com ênfase naqueles aplicados ao setor de biocombustíveis.

Para avaliar a eficácia da árvore de decisão para a realidade brasileira, foram testados 5 substratos utilizados para fabricação de biocombustíveis:

- Bagaço de cana de açúcar;
- Vinhaça,
- Sebo,
- Óleo técnico de milho – TCO,
- Silicato,
- Dejetos animais,
- Resíduos de alimentos em geral,
- Resíduos sólidos orgânicos e
- Caroço de algodão.

4.1.1 Bagaço de cana de açúcar

Histórico / Visão geral

A cana-de-açúcar contém em média 12% de fibra que no processo de extração do caldo se transforma no bagaço de cana. Esta fibra tem composição química típica, contendo em média 36% de celulose, 31% de hemicelulose, 22% de lignina e 11% de outros constituintes. Sua produção é da ordem de 25% do total da cana moída, e seu consumo é dependente das necessidades energéticas do complexo industrial, podendo haver um excedente de bagaço de até 30% do total produzido. Este poderá ser utilizado para diversos fins, como para co-geração de energia elétrica, biodigestão, ração animal, fertilizante, química fina, matéria plástica, produção de etanol, entre outros (Lopes Silva et al., 2014).(Lopes Silva et al., 2014).

Existem usinas que operam com as duas matérias primas. A Usina Flex, que são aquelas de cana-de-açúcar adequadas para produzir etanol de milho no período da entressafra da cana; e a Usina Flex Full, que são usinas de cana e milho que operam paralelamente. As primeiras usinas flex faziam a produção de etanol de milho durante apenas o período da entressafra, então aproveitavam o bagaço das próprias unidades para poder utilizar essa energia para a produção (Oliveira; Cruz, 2023).

Mercado atual

De acordo com o Jornal Cana (2019), o valor da tonelada de bagaço de cana é em média de R\$ 59,22. Esse valor reflete a demanda e a utilização do bagaço como subproduto na geração de energia e na produção de biocombustíveis, especialmente etanol. No mercado de etanol, o preço do litro é de R\$ 2,9151 (Cepea/Esalq, 2024), considerando o valor líquido, sem a inclusão dos impostos (PIS/Cofins). Quando contabilizados os impostos, o preço do litro sobe para R\$ 4,32 (UNICA, 2024). De acordo com a UNEM, o preço médio nos 11 estados é de R\$4,20 por litro (IMEA/UNEM, 2024).

Em termos de rendimento, a produção de etanol a partir da cana-de-açúcar segue uma relação proporcional: uma tonelada de cana gera entre 70 a 80 litros de etanol, além de produzir entre 250 a 270 kg de bagaço.

Bagaço utilizado para geração de energia elétrica

Após a extração do açúcar e do etanol, o bagaço é queimado em caldeiras para gerar vapor, que, por sua vez, aciona turbinas ligadas a geradores elétricos. Esse processo, conhecido como cogeração, permite que as usinas sucroalcooleiras não apenas abasteçam suas próprias operações, mas também forneçam energia elétrica para a rede pública. A configuração típica de uma usina de cogeração envolve uma caldeira de alta pressão e uma turbina a vapor, sendo que a capacidade de geração pode variar significativamente, com usinas maiores alcançando potências de até 100 MW ou mais. A eficiência desse processo depende de vários fatores, como o tipo de caldeira, a qualidade do bagaço e o processo de combustão, mas em média, as usinas de cogeração com bagaço de cana têm uma eficiência de conversão energética de cerca de 20 a 25% (Dantas; Legey; Mazzone, 2013).

Bagaço para produção de etanol

Em vez de ser queimado para geração de energia, o bagaço pode ser processado através de diferentes tecnologias, como a hidrólise e a fermentação, para a produção de etanol de segunda geração (2G). Nesse processo, o bagaço é primeiramente submetido a uma pré-tratamento, geralmente envolvendo calor, pressão ou enzimas, para quebrar as paredes celulares e liberar os açúcares complexos presentes na biomassa. Esses açúcares são então fermentados por microorganismos, como leveduras, para produzir etanol (De Araujo Guilherme et al., 2019).

A principal vantagem do uso do bagaço para produção de etanol é que ele não compete diretamente com alimentos, pois é um subproduto da produção de açúcar e etanol de primeira geração (1G), aproveitando resíduos que, de outra forma, seriam descartados ou utilizados para gerar energia (Vandenberghe et al., 2022).

A capacidade de produção depende do volume de bagaço disponível, sendo que uma usina de etanol de segunda geração pode processar centenas de toneladas de bagaço por dia. A eficiência da hidrólise da celulose, (processo adotado para obtenção do etanol de segunda geração) é em torno 70% a 80% (Bezerra et al., 2021). Isso significa, que uma tonelada de bagaço seco permitiria a obtenção de cerca de 230 litros de etanol (Chandel et al., 2019).

Resultado da árvore de decisão

Ao aplicar a árvore de decisão, o bagaço foi considerado como um **subproduto**, visto que ele tem algum valor para o produtor e pode ser monetizado. A

Tabela 18 apresenta o fluxo das respostas na árvore de decisão.

Tabela 18 Respostas da árvore de decisão para o bagaço de cana.

Pergunta	Resposta
Q1	Não
Q2	Não, o processo é otimizado para obtenção de etanol
Q3	Não, a oferta de bagaço de cana é inelástica porque o nível de plantio é determinado pelo mercado de cana para produção de açúcar e etanol, não pelo mercado de bagaço de cana
Q4	Não, não há aumento deliberado na produção de bagaço de cana e não houve nenhum esforço para mudar a qualidade ou as propriedades do bagaço de cana.
Q5.1	Sim, há mercados com preços identificáveis para o bagaço de cana
Q5.2	Não, nem o preço unitário nem o valor total ultrapassam 15% da receita da planta
Q6	Sim, existe monetização do bagaço de cana

Para as perguntas Q5.1 e Q5.2, aplicação do limite econômico, a resposta foi negativa aplicando os dois valores de limite: considerando o valor da produção total e valor unitário. Ao considerar a produção total de etanol e bagaço aos processar 1 t de cana, a contribuição do bagaço fica em 4,8%. Considerando o valor unitário, por kg de etanol e bagaço, a contribuição do bagaço fica em 1,1%, ambos abaixo do limite considerado pela árvore, que é de 15%. Na pergunta Q6 o bagaço é classificado como **subproduto** uma vez que é monetizado.

4.2.2 Vinhaça de cana de açúcar

Histórico / Visão geral

A vinhaça representa o resíduo pastoso que sobra após a destilação fracionada do caldo de cana-de-açúcar (garapa) fermentado, para a obtenção do etanol (álcool etílico). Para cada litro de álcool produzido, de 12 a 20 litros de vinhaça são deixados como resíduo. Este

resíduo, caracterizado por seu alto teor de água, compostos orgânicos e nutrientes como potássio, nitrogênio e fósforo, é amplamente utilizado como condicionante agrícola (Buller et al., 2021).

Há usinas que aplicam vinhaça em 70% da sua área de cultivo, e há outras com valores bem menores. De maneira geral, a cada safra, a área com uso de fertirrigação das usinas aumenta na busca do uso racional da vinhaça, visando maior produtividade agrícola e redução no uso de fertilizantes químicos (Nova Cana, 2013). Entretanto esse sistema de manejo, pode promover um impacto significativo no meio ambiente, especialmente quando não respeitado as especificações agronômicas e a capacidade do solo em absorver esses nutrientes (Carpanez et al., 2022).

Devido a isso outras tecnologias, como a digestão anaeróbia vem sendo empregadas para o manejo da vinhaça e outros resíduos gerados, como a torta de filtro, resultantes do processamento da cana-de-açúcar, que podem ser convertidos em biogás. No Brasil, algumas usinas já utilizam biodigestores para tratar esses resíduos, gerando biometano e energia elétrica. Essa prática contribui para a geração de energia renovável e auxilia na gestão ambiental dos resíduos da indústria sucroalcooleira. A conversão de vinhaça em biogás é uma alternativa promissora, pois, além de reduzir os impactos ambientais, pode gerar benefícios econômicos ao fornecer uma fonte adicional de energia para as usinas (Silva et al., 2021).

Mercado atual

Atualmente não existe um mercado estabelecido para a vinhaça, normalmente a vinhaça é um “problema” para o produtor que gera um custo para tratamento e destinação.

Resultado da árvore de decisão

Ao aplicar a árvore de decisão, a vinhaça foi considerada como um **resíduo**, visto que não possui valor no Brasil para o produtor. A Tabela 19 apresenta o fluxo das respostas na árvore de decisão.

Tabela 19 Respostas da árvore de decisão para a vinhaça.

Pergunta	Resposta
Q1	Não
Q2	Não, o processo visa produzir etanol.
Q3	Não, o fornecimento de vinhaça é uma função da quantidade de etanol produzido.
Q4	Não, o processo de produção não foi deliberadamente modificado para produzir vinhaça
Q5.1 Q5.2	Não, não há mercados com preços identificáveis para a vinhaça -

Q6	Não. Por mais que ocorra a recuperação de nutrientes, a aplicação no solo é realizada devido a facilidade de descarte e não necessariamente tem um valor econômico relacionado
Q7	Sim

Atualmente, não existe um valor de mercado para a vinhaça, não sendo possível aplicar o limite econômico proposto pelas perguntas 5. Com relação à pergunta 6 e 7, há muitos casos que a vinhaça é aplicada no solo para substituir a água de irrigação e fornecer nutrientes no solo. No entanto, essa solução é aplicada por ser a de menor custo e pode acarretar a poluição da área de aplicação se não for bem gerenciada.

Etapa de tratamento do resíduo

Muitas diretrizes e calculadoras internacionais, aplicam o conceito de “emissões evitadas”, aplicando crédito para a usina ao utilizar o resíduo para produção de biocombustível.

O Programa de Energia para o Brasil, avaliou as emissões de vinhaça destinadas em lagoas de armazenamento, com base no seu conteúdo de matéria orgânica, e demonstrou que o armazenamento contribui com uma emissão nas lagoas de armazenamento de 17,70 kgCO₂eq./t de vinhaça destinada.

Utilizando os dados repassados pelas indústrias sucroenergéticas (Produto 3 – Aprimoramento da Renovacalc para biometano), a quantidade de vinhaça necessária para produção de 1 MJ de biometano é de 0,0013 t e 0,0030 t, respectivamente para as duas unidades.

Com base nos cálculos realizados para o projeto aprimoramento da renovacalc para o biometano, foram realizadas simulações de cenários para a aplicação do cálculo de intensidade de carbono caso fosse considerado a “fronteira expandida consequencial”, conforme utilizada pela calculadora CARB, onde é subtraída as emissões evitadas: seja o cenário base, emissões de CH₄ da lagoa de armazenamento, ou o CH₄ contido no biometano produzido. O valor aplicado é o mais conservador, ou seja, o que for menor.

Utilizando os valores apresentados pelos cases, as emissões evitadas pela lagoa de armazenamento de vinhaça, considerando um tempo de detenção de 4 dias, seria de 17,70 kg de CO₂eq/t.

Caso fosse consideradas as emissões evitadas pelo “deslocamento” do resíduo, o valor de subtraído pelas emissões evitadas seriam de 23,03 gCO₂/MJ e 53,10 gCO₂/MJ. Pelos valores de intensidade atuais presentes hoje na Renovacalc, os valores de intensidade resultariam em valores negativos.

Caso se aplicasse a fronteira de “resíduos” considerada pelo banco de dados do ecoinvent, a fronteira da carga ambiental aplicada ao biometano seria a partir da geração do biogás, sendo considerado somente o processo de upgrading. As emissões provenientes do transporte e do biodigestor ficariam alocadas para o etanol.

4.2.3 Sebo bovino

Histórico / Visão geral

O sebo bovino, derivado da gordura animal, é uma fonte valiosa de lipídios e tem sido amplamente utilizado em diversas indústrias, incluindo alimentação animal, cosméticos, sabões e detergentes. No contexto dos biocombustíveis, o sebo bovino se destaca como uma matéria-prima potencial para a produção de biodiesel. Sua composição rica em triglicerídeos permite a conversão eficiente em biodiesel por meio do processo de transesterificação, no qual os lipídios presentes no sebo reagem com um álcool (geralmente metanol ou etanol) na presença de um catalisador (Binhweel; Hossain; Ahmad, 2023).

Estima-se que o peso médio de um boi gordo seja de cerca de 468 kg, com aproximadamente 250 kg correspondendo à carne industrializada, já a geração de sebo por animal pode variar, mas a média é de 15-18 kg de sebo por boi (Varão et al., 2017). Esse subproduto, apesar de ser uma quantidade relativamente pequena por animal, quando agregado em grande escala, representa uma quantidade significativa de gordura disponível para a produção de biodiesel. No Brasil, onde a indústria pecuária é uma das maiores do mundo, a utilização do sebo bovino para a produção de biocombustíveis oferece uma oportunidade de valorizar resíduos da produção animal (Jambulingam et al., 2020).

Mercado atual

O sebo animal tem origem nos restos e resíduos provenientes de açougues e subprodutos de frigoríficos, que são direcionados para unidades de renderização. Nessas unidades, ocorre a transformação dessa matéria-prima em dois principais produtos: proteínas e gorduras animais.

De acordo com a Associação Brasileira de Reciclagem Animal (ABRA), o material bruto processado pelas usinas de renderização corresponde a cerca de 5% da receita total dos produtos comercializados pelos frigoríficos.

No mercado atual, conforme levantamento da Scot Consultoria, o preço do sebo bovino no Brasil Central está cotado em R\$ 5,60 por quilo, já descontados os impostos (Torres; Maggiori, 2024). Além disso, o preço da carne pode ser estimado com base no valor do boi gordo, que apresenta uma média de R\$ 313,86 por arroba, segundo dados da mesma consultoria (SCOT, 2024).

Resultado da árvore de decisão

Ao aplicar a árvore de decisão, o sebo foi considerado como um **subproduto**. A Tabela 20 apresenta o fluxo das respostas na árvore de decisão.

Tabela 20 Respostas da árvore de decisão para o sebo bovino.

Pergunta	Resposta
Q1	Não
Q2	Não, o processo visa produzir carne
Q3	Não, o fornecimento de sebo é uma função da quantidade de carne produzida.
Q4	Não, o processo de produção não foi deliberadamente modificado para produzir sebo
Q5.1	Sim, há mercados com preços identificáveis para o sebo
Q5.2	Não, considerando a quantidade total
Q6	Sim, existe monetização do sebo

Com relação à aplicação do limite econômico, o sebo representa 1,7% do valor econômico ao considerar a quantidade total de carne e de sebo gerado por bovino. Caso a consideração levasse em conta o valor unitário, por kg de carne e sebo produzido, a contribuição do sebo bovino seria de 26,8% e o sebo seria considerado como um coproduto.

RO et al. (2023) citam que o relatório da Ecofys (SPÖTTLE *et al.*, 2013) calcula o limite com base no valor total do produto, enquanto o RTFO calcula o limite com base no valor por unidade. Dependendo do uso do valor total ou do valor por unidade, há um potencial para resultados não intencionais. Essa observação ressalta a importância de associar a análise da árvore de decisão a um estudo detalhado sobre a cadeia de origem do material. Isso se deve ao fato de que, nem sempre, a classificação gerada pela árvore de decisão corresponde com precisão à classificação real desse material. Portanto, uma abordagem integrada é essencial para garantir resultados mais confiáveis e condizentes com a realidade.

Etapa de tratamento do resíduo/subproduto

Para a utilização do sebo como matéria prima de produção de biocombustível, é necessária uma etapa adicional de tratamento, a renderização.

A renderização pode ocorrer em uma unidade anexa ao frigorífico ou em uma instalação independente. Estima-se que atualmente no Brasil, 60% é unidade anexo e 40% são unidades independentes.

De acordo com a calculadora R&D GREET 2023, o processo de renderização do sebo bovino possui uma intensidade de carbono de 256,05 gCO_{2e}/kg, considerando o mix de distribuição de energia dos Estados Unidos. Adaptando o mix de eletricidade para o Brasil, esse valor passa para 190,75 gCO₂/kg de sebo.

4.2.4 DDGs

Em uma usina de etanol de milho, as principais saídas, normalmente, são: o etanol (produto principal), DDGs (Dried Distillers Grains), óleo de milho bruto e eletricidade.

O processo de fabricação no Brasil guarda semelhanças com a tecnologia utilizada nos EUA, porém com algumas diferenças importantes. O milho é moído, cozido e liquefeito em água. Em seguida segue para a etapa de fermentação que, com adição de enzimas e leveduras, transforma o amido em açúcares e, posteriormente, em etanol. A Tecnologia de Separação de Fibras permite recuperar fibras e proteínas, resultando na coprodução de produtos ricos em nutrientes comumente conhecidos como DDGs em seu acrônimo em inglês (Oliveira; Cruz, 2023).

Histórico / Visão geral

O Óleo Ácido de Milho é um material gerado nas usinas de etanol de milho durante o processo de produção de biocombustíveis. Esse óleo é extraído principalmente da parte rica em gordura presente no milho após a fermentação e destilação do etanol. Comumente, ele é utilizado como insumo em indústrias de biodiesel, ração animal ou em processos químicos industriais devido ao seu teor significativo de ácidos graxos livres.

O processo de moagem a seco (via seca ou dry-milling) produz etanol, óleo de milho, CO₂ e o DDGs (dried distillers’ grains with solubles - grãos secos de destilaria com solúveis), sendo o processo mais usado em razão dos custos iniciais mais baixos.

Em média, 1000 kg de milho produz cerca de 450 litros de etanol, 240 kg de grãos destilados secos com solúveis (DDGs) e 25 kg de óleo bruto de milho (UNEM; United States Department Agriculture, 2019; POLICY BRIEF; IMPU; AGROICONE, 2018;).

Mercado atual

De acordo com dados repassados pela União Nacional do Etanol de Milho – UNEM, o preço do DDGS é em média de R\$ 1.171,50/t (IMEA/UNEM, 2024).

Para o etanol, o preço médio nos 11 estados é de R\$4,20 por litro (IMEA/UNEM, 2024).

Resultado da árvore de decisão

Ao aplicar a árvore de decisão, o DDGs foi considerado como um **coproduto**. A Tabela 21 apresenta o fluxo das respostas na árvore de decisão.

Tabela 21 Respostas da árvore de decisão para o DDGs

Pergunta	Resposta
Q1	Não
Q2	Não, o processo visa produzir etanol
Q3	Não, o fornecimento de DDGs é uma função da quantidade de etanol produzido.
Q4	Sim, o processo de produção foi deliberadamente modificado para produzir DDGs, com a inclusão das etapas de centrifugação.
Q5.1	-

Q5.2	
Q6	-

Com relação à pergunta 4, considerando que o processo foi modificado para produzir o DDGs, com a inclusão da etapa de centrifugação, o material é conceituado como um **co-produto**.

4.2.5 Óleo técnico de milho – TCO

Histórico / Visão geral

Conforme descrito no item anterior, as usinas de etanol produzem o DDGs e óleo bruto de milho, também chamado de óleo técnico – TCO.

O óleo técnico é produzido juntamente com o DDGs na etapa de centrifugação, pós destilação do etanol.

Em média, 1000 kg de milho produz cerca de 450 litros de etanol, 240 kg de grãos destilados secos com solúveis (DDGs) e 25 kg de óleo bruto de milho (UNEM; United States Department Agriculture, 2019; POLICY BRIEF; IMPU; AGROICONE, 2018).

Mercado atual

De acordo com dados repassados pela União Nacional do Etanol de Milho – UNEM, o preço do DDGS é em média de R\$ 1.171,50/t (IMEA/UNEM, 2024).

Para o etanol, o preço médio nos 11 estados é de R\$4,20 por litro (IMEA/UNEM, 2024). Já para o TCO, o preço considerado foi de R\$ 5,40/kg, de acordo com a apresentado pela INPASA.

Resultado da árvore de decisão

Ao aplicar a árvore de decisão, o óleo técnico de milho foi considerado como um **subproduto**, se a comparação for realizada com o produto principal, etanol. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta o fluxo das respostas na árvore de decisão.

Tabela 22 Respostas da árvore de decisão para o TCO.

Pergunta	Resposta
Q1	Não
Q2	Não, o processo visa produzir etanol
Q3	Não, o fornecimento de TCO é uma função da quantidade de etanol produzido.
Q4	Não, o processo de produção foi deliberadamente modificado para produzir DDGs, com a inclusão das etapas de centrifugação.

Q5.1	Sim
Q5.2	Não, se comparado com o valor do etanol, representa 7% do valor do sistema de produto.
Q6	Sim

Com relação à pergunta 5.2, se a comparação for realizada com o produto principal do sistema produtivo, o etanol, o TCO representa 7% do valor. Caso a comparação for realizada com o coproduto, DDGs, o TCO representa 36% e seria conceituado como um coproduto.

4.2.6 Silicato de Cálcio e Magnésio – corretivo de solo

O silicato de cálcio e magnésio é utilizado como fertilizante agrícola. Optou-se pela aplicação da árvore de decisão pelo uso em áreas agrícolas produtoras de milho e cana, influenciando a intensidade de carbono do etanol.

Histórico / Visão geral

O silicato de cálcio e magnésio é gerado no processo de recuperação de sucatas, do conteúdo da escória de aciaria, que é um material gerado do processo produtivo do aço inox.

Existe uma planta de recuperação de sucatas em MG, que presta serviço para uma indústria de aço inox. No processo de recuperação da sucata é gerada a polpa (silicato de Mg e Ca diluído em água), que passa por um processo de recuperação de metais (silicato de cálcio e magnésio).

Mercado atual

O processo de produção de aço inox produz 1000 kg de inox e 420 kg de escória de aciaria.

Já o processo de reciclagem para recuperação de sucata metálica, gera 100 kg de sucata e 900 kg de polpa de silicato, que produz 1000 kg de silicato de cálcio e magnésio.

O preço do aço inox, vendido pela indústria principal é de R\$ 14.300,00 / t, sendo a sucata recuperada e retornada ao processo pelo valor de R\$ 1.400,00/t.

O silicato de cálcio e magnésio (recuperado do processo de reciclagem) possui um valor de venda de R\$70,00 / t.

Resultado da árvore de decisão

Ao aplicar a árvore de decisão, o silicato foi considerado como um subproduto. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta o fluxo das respostas na árvore de decisão.

Tabela 23 Respostas da árvore de decisão para o silicato de cálcio e magnésio.

Pergunta	Resposta
Q1	Não
Q2	Não, o primário visa produzir aço inox e o secundário visa a reciclagem de sucata.
Q3	Não, o fornecimento de silicato é uma função da quantidade de aço inox (processo primário) produzido.
Q4	Não, o processo de produção não foi deliberadamente modificado para produzir silicato
Q5.1	Sim, há mercados com preços identificáveis para o silicato
Q5.2	Não, aplicando o valor do volume total do sistema e do preço unitário.
Q6	Sim

Com relação à pergunta 5.2, considerando o volume total gerado pelo sistema de produto, o valor do silicato representa 0,2% do valor do aço inox.

Considerando os valores unitários, por kg de produto, o valor do silicato representa 0,5% do valor do aço inox. Com isso, aplicando a árvore de decisão, o silicato é conceituado como um subproduto em virtude do valor econômico.

4.2.7 Dejetos animais

Os dejetos animais podem ser utilizados em biodigestores para a geração de biogás. O biogás passa por um processo de upgrading para geração de biometano.

A Tabela 24 apresenta as respostas da árvore de decisão.

Tabela 24 Respostas da árvore de decisão para dejetos animais.

Pergunta	Resposta
Q1	Sim
Q2	-
Q3	-
Q4	-
Q5.1	-
Q5.2	-
Q6	Não

Como os dejetos animais não possuem valor econômico, ele foi classificado como “resíduo” ao aplicar a árvore de decisão.

4.2.8 Resíduos de alimentos em geral

Os resíduos de alimentos podem ser utilizados em biodigestores para a geração de biogás. O biogás passa por um processo de upgrading para geração de biometano.

A Tabela 25 apresenta as respostas da árvore de decisão.

Tabela 25 Respostas da árvore de decisão para resíduos de alimentos

Pergunta	Resposta
Q1	Sim
Q2	-
Q3	-
Q4	-
Q5.1	-
Q5.2	-
Q6	Não

Como os resíduos de alimentos não possuem valor econômico, ele foi classificado como “resíduo” ao aplicar a árvore de decisão.

4.2.9 Resíduos sólidos orgânicos de processos industriais com origem biológica

Os resíduos sólidos orgânicos podem ser utilizados em biodigestores para a geração de biogás. O biogás passa por um processo de upgrading para geração de biometano.

A Tabela 26 apresenta as respostas da árvore de decisão.

Tabela 26 Respostas da árvore de decisão para resíduos sólidos orgânicos de processos industriais.

Pergunta	Resposta
Q1	Sim
Q2	-
Q3	-
Q4	-
Q5.1	-
Q5.2	-
Q6	Não

Como os resíduos sólidos orgânicos não possuem valor econômico, ele foi classificado como “resíduo” ao aplicar a árvore de decisão.

4.2.10 Caroço de algodão

A pluma é o principal produto da cultura do algodão e dá origem a 25% da fibra que abastece a indústria têxtil em todo o mundo. Protegidas dentro da pluma, as sementes/caroços da planta também têm seu valor e, graças ao alto acúmulo de óleos e proteínas, encontram mercado nas indústrias de alimentos e rações. No Brasil, o óleo do caroço do algodão é utilizado na produção de biodiesel.

Mercado atual

O processo de produção da pluma, produz 40,72% da pluma e 52,66% de caroço.

Conforme dados disponibilizados pelo Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada, o valor médio da pluma nos anos de 2024 à janeiro/2025 é de R\$ 9,01/kg. Já os dados disponibilizados pelo AIBA, esse valor é de R\$ 9,29.

Com relação ao caroço do algodão, conforme dados disponibilizados pelo IMEA, o valor médio no mesmo período considerado pela pluma é de R\$ 0,79/kg. Os valores mostrados pelo AIBA são de R\$ 1,25/kg.

Resultado da árvore de decisão

Ao aplicar a árvore de decisão, o caroço foi considerado como um coproduto. A Tabela 27 apresenta o fluxo das respostas na árvore de decisão.

Tabela 27 Respostas da árvore de decisão para o caroço de algodão.

Pergunta	Resposta
Q1	Não
Q2	Não, o processo primário visa produzir a pluma de algodão.
Q3	Não, o fornecimento caroço é uma função da quantidade de pluma de algodão (processo primário) produzido.
Q4	Não, o processo não foi modificado para produzir mais caroço.
Q5.1	Sim, há mercados com preços identificáveis para o caroço
Q5.2	Sim
Q6	

Com relação à pergunta 5.2, considerando o volume total gerado pelo sistema de produto, o valor do caroço representa 15% do valor da pluma de algodão.

Com isso, aplicando a árvore de decisão, o caroço é conceituado como um coproduto em virtude do valor econômico.

5. Conclusões

Este estudo demonstrou a importância da aplicação de árvores de decisão como uma ferramenta sistemática para a classificação de matérias-primas utilizadas na produção de biocombustíveis. A análise comparativa entre as propostas de classificação do CORSIA e de RO et al. (2023) destacou a relevância de critérios econômicos e funcionais, evidenciando que a categorização de produtos primários, coprodutos, subprodutos e resíduos está intrinsecamente relacionada a fatores como elasticidade de oferta, valor de mercado e intenção deliberada de produção.

Os resultados obtidos ao aplicar a árvore de decisão de RO et al. (2023) a matérias-primas típicas do contexto brasileiro, como bagaço de cana-de-açúcar, vinhaça, sebo bovino, óleo de milho e DDGS, reforçam a necessidade de adaptações locais. A análise revelou que, enquanto algumas matérias-primas apresentam potencial econômico e são classificadas como coprodutos, outras, como a vinhaça, permanecem como resíduos devido à ausência de um mercado estabelecido. Essas variações indicam que o desenvolvimento de uma taxonomia específica para o Brasil, considerando suas particularidades econômicas, ambientais e sociais, é fundamental para garantir a eficiência e a sustentabilidade do setor.

7. Referências

- 42 U.S.C. § 7401 (1970), n.d. 42 U.S.C. Ch. 85: Air Pollution Prevention And Control.
- AGRO2Business, 2024. DDGS FARELO DE MILHO 46 % A 48 % De Proteína Para Ração Animal [WWW Document]. URL <https://agro2business.com/marketplace/1455> (accessed 11.29.24).
- Bezerra, P.X.O., De Farias Silva, C.E., Soletti, J.I., de Carvalho, S.H.V., 2021. Cellulosic Ethanol from Sugarcane Straw: a Discussion Based on Industrial Experience in the Northeast of Brazil. *Bioenergy Res.* 14, 761–773. <https://doi.org/10.1007/s12155-020-10169-w>
- Binhweel, F., Hossain, M.S., Ahmad, M.I., 2023. Recent Trends, Potentials, and Challenges of Biodiesel Production from Discarded Animal Fats: a Comprehensive Review. *Bioenergy Res.* 16, 778–800. <https://doi.org/10.1007/s12155-022-10527-w>
- Brasil, 2017. Lei nº 13576, de 26 de dezembro de 2017. Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências. *Diário Of. da União* 20, 63–71.
- BRASIL, 2018. Resolução ANP Nº 758, de 23 de novembro de 2018. *Diário Of. da União* 1–22.
- BSI, 2011. PAS 2050:2011 Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services. British Standards Institution, London 1–45.
- Buller, L.S., Romero, C.W. da S., Lamparelli, R.A.C., Ferreira, S.F., Bortoleto, A.P., Mussatto, S.I., Forster-Carneiro, T., 2021. A spatially explicit assessment of sugarcane vinasse as a sustainable by-product. *Sci. Total Environ.* 765, 142717. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142717>
- Canada. Environment and Climate Change Canada, 2023. Fuel life cycle assessment model methodology.
- CARB, California Environmental Protection. Method for Estimating Greenhouse Gas Emission Reductions from Diversion of Organic Waste from Landfills to Compost Facilities.
- Carpanez, T.G., Moreira, V.R., Assis, I.R., Amaral, M.C.S., 2022. Sugarcane vinasse as organo-mineral fertilizers feedstock: Opportunities and environmental risks. *Sci. Total Environ.* 832, 154998. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154998>
- Cepea/Esalq, 2024. [Cepea] Liquidez do etanol diminui , mas preços continuam firmes nas usinas [WWW Document]. URL <https://www.novacana.com/noticias/liquidez-etanol-diminui-precos-continuam-firmes-usinas-051124> (accessed 11.29.24).
- Chandel, A.K., Albarelli, J.Q., Santos, D.T., Chundawat, S.P., Puri, M., Meireles, M.A.A., 2019. Comparative analysis of key technologies for cellulosic ethanol production from Brazilian sugarcane bagasse at a commercial scale. *Biofuels, Bioprod. Biorefining* 13, 994–1014. <https://doi.org/10.1002/bbb.1990>
- CHEN, Rui et al. 1 . Energy Consumption of the Beef Tallow Rendering Process. 2017.
- CORSIA, n.d. - Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation [WWW

Document]. URL <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/default.aspx>

Dantas, G.A., Legey, L.F.L., Mazzone, A., 2013. Energy from sugarcane bagasse in Brazil: An assessment of the productivity and cost of different technological routes. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 21, 356–364. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.080>

de Araujo Guilherme, A., Dantas, P.V.F., Padilha, C.E. de A., dos Santos, E.S., de Macedo, G.R., 2019. Ethanol production from sugarcane bagasse: Use of different fermentation strategies to enhance an environmental-friendly process. *J. Environ. Manage.* 234, 44–51. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.12.102>

Department for Transport, 2011. RTFO Guidance Part Two: Carbon and Sustainability Guidance.

DIRETIVA (EU) 2008/98. DIRETIVA 2008/98/CE de 19 de Novembro de 2008 relativa aos resíduos e que revoga certas directivas. *Jornal Oficial da União Europeia*, 2008.

Diretiva (UE) 2018/2001, 2023. Diretiva (UE), DIRETIVA (UE) 2018/2001 DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO de 11 de dezembro de 2018 Renováveis, relativa à promoção da utilização de energia de fontes renováveis.

Diretiva (UE) 2023/2413, 2023. Diretiva (UE)2023/2413 do Parlamento Europeu e do Conselho de de 18 de outubro de 2023 que altera a Diretiva (UE) 2018/2001, o Regulamento (UE) 2018/1999 e a Diretiva 98/70/CE no que respeita à promoção de energia de fontes renováveis e que revoga a Diret, *Jornal Oficial da União Europeia*, 20.9.2023.

EC-JRC. Product Environmental Footprint (PEF) Guide. European Commision Joint Research Centre, p. 154, 2012.

Environmental Protection Agency, 2022. Part 80 - Regulation of Fuels and Fuel Additives, *Federal Register*.

EPA. - Environmental Protection Agency. Lifecycle Analysis of Greenhouse Gas Emissions under the Renewable Fuel Standard.

EUROPEAN COMMISSION. Communication from the Commission on the practical implementation of the EU biofuels and bioliquids sustainability scheme and on counting rules for biofuels. *Official Journal of the European Union*, v. C 160, n. 02, p. 8–16, 2010.

EUROPEAN COMMISSION. PEFCR Guidance document, - Guidance for the development of Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCRs), version 6.3. PEFCR Guidance document, n. February 2019, p. 238, 2017.

European Commission, 2021. Understanding Product Environmental Footprint and Organisation Environmental Footprint methods 1–31.

GHG Protocol, 2011. Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard.

Government of Canada, 2024. Clean fuel regulations. *Canada Gaz.* 154.

HEIJUNGS, Reinout et al. System Expansion and Substitution in LCA: A Lost Opportunity of ISO 14044 Amendment 2. *Frontiers in Sustainability*, v. 2, p. 40, 2021.

- ICAO, 2024. ICAO document 07 - CORSIA Methodology for Calculating Actual Life Cycle Emissions Values.
- ICAO. ICAO document 06 - CORSIA Default Life Cycle Emissions Values for CORSIA Eligible Fuels.
- ICAO, 2023. SAF feedstocks. https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/SAF_Feedstocks.aspx.
- ICF International, 2015. Waste, Residue and By-Product Definitions for the California Low Carbon Fuel Standard. Final Rep.
- IEA, 2024. Carbon Accounting for Sustainable Biofuels.
- IMO. Guidelines on Life Cycle GHG Intensity of Marine Fuels (LCA guidelines).
- IMO. Annex 10. IMO Resolution MEPC.391(81): 2024 Guidelines on Life Cycle GHG Intensity of Marine Fuels. v. 391, n. March, p. 1–67, 2024.
- SO. ISO 14044:2006 - Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines. , 2006.
- ISO. ISO 14044:2006/AMD 2:2020 - Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines — Amendment 2. , 2020.
- ISO 14040, 2006. Environmental management-Life cycle assessment-Principles and framework.
- Jambulingam, R., Srinivasan, G.R., Palani, S., Munir, M., Saeed, M., Mohanam, A., 2020. Process optimization of biodiesel production from waste beef tallow using ethanol as co-solvent. SN Appl. Sci. 2, 1–18. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03243-7>
- JANZEN, H. H. et al. The fate of nitrogen in agroecosystems: An illustration using Canadian estimates. Nutrient Cycling in Agroecosystems, v. 67, n. 1, p. 85–102, 2003.
- Jornal Cana, 2019. Quanto custa o bagaço? J. Cana.
- KARP, Susan Grace et al. Bioethanol from soybean molasses. Green Energy and Technology, v. 0, p. 241–254, 2016.
- Lopes Silva, D.A., Delai, I., Delgado Montes, M.L., Roberto Ometto, A., 2014. Life cycle assessment of the sugarcane bagasse electricity generation in Brazil. Renew. Sustain. Energy Rev. 32, 532–547. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.056>
- Low Carbon Fuel Standard Regulation, 2020. , California Code of Regulations (CCR).
- Matthias Spöttle, Alberici, S., Toop, G., Peters, D., Gamba, L., Ping, S., van Steen, H., Bellefleur, D., 2013. Low ILUC potential of wastes and residues for biofuels Low ILUC potential of wastes and residues for biofuels 168.
- Nova Cana, 2013. Uso da vinhaça na cultura da cana-de-açúcar 1–16.
- Oliveira, L.S.B.L., Cruz, A.J.G., 2023. Techno-economic analysis and carbon intensity of sugarcane-corn flex plants in Brazil. Bioresour. Technol. Reports 24. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101694>
- Policy Brief; Impu; AGROICONE, 2018. ANÁLISE SOCIOECONÔMICA E.

- Ro, J.W., Zhang, Y., Kendall, A., 2023. Developing guidelines for waste designation of biofuel feedstocks in carbon footprints and life cycle assessment. *Sustain. Prod. Consum.* 37, 320–330. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.03.009>
- SCOT, 2024. Cotações – Boi gordo: preço da arroba do boi gordo [WWW Document]. Scot Consult. URL <https://www.scotconsultoria.com.br/cotacoes/boi-gordo/?ref=smnb> (accessed 11.29.24).
- Silva, A.F.R., Brasil, Y.L., Koch, K., Amaral, M.C.S., 2021. Resource recovery from sugarcane vinasse by anaerobic digestion – A review. *J. Environ. Manage.* 295, 113137. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113137>
- THIAGARAJAN, Arumugam et al. Dry matter partitioning and residue N content for 11 major field crops in Canada adjusted for rooting depth and yield. *Canadian Journal of Soil Science*, v. 98, n. 3, p. 574–579, jun. 2018.
- Torres, A., Maggiori, Y., 2024. Carta Conjuntura - Sebo bovino : mercado , exportação e expectativas [WWW Document]. Scot Consult. URL <https://www.scotconsultoria.com.br/noticias/cartas/57671/> (accessed 11.29.24).
- UNIÃO EUROPEIA. RECOMENDAÇÃO (UE) 2021/2279 DA COMISSÃO de 15 de dezembro de 2021 sobre a utilização dos métodos da pegada ambiental para a medição e comunicação do desempenho ambiental ao longo do ciclo de vida de produtos e organizações. *Jornal Oficial da União Europeia*, n. 179, p. 210, 2021.
- UNICA, 2024. UNICAdata - Observatório da Cana e Bioenergia [WWW Document]. União da Indústria Cana-de-Açúcar e Bioenergia. URL <https://unicadata.com.br/listagem.php?idMn=7> (accessed 11.29.24).
- Vandenberghe, L.P.S., Valladares-Diestra, K.K., Bittencourt, G.A., Zevallos Torres, L.A., Vieira, S., Karp, S.G., Sydney, E.B., de Carvalho, J.C., Thomaz Soccol, V., Soccol, C.R., 2022. Beyond sugar and ethanol: The future of sugarcane biorefineries in Brazil. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 167, 112721. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112721>
- Varão, L.H.R., Silva, T.A.L., Zamora, H.D.Z., Pasquini, D., 2017. Vantagens E Limitações Do Sebo Bovino Enquanto Matéria-Prima Para a Indústria Brasileira De Biodiesel. *Holos* 7, 39–54. <https://doi.org/10.15628/holos.2017.5010>
- ZAMPORI, Luca; PANT, Rana. Suggestions for updating the Product Environmental Footprint (PEF) method.

ANEXOS

Tabela 28 Quadro resumo das principais classificações de matérias primas, em termos de produtos primários, coprodutos, subprodutos, resíduos e lixo.

Fonte	Produtos primários		Produtos secundários		
	Produto primário	Co-produto	Subproduto	Resíduo	Lixo (waste)
ISO 14040 (ISO 14040, 2006)		qualquer um entre dois ou mais produtos procedentes do mesmo processo elementar ou sistema de produto			substâncias ou objetos os quais o detentor pretende ou é obrigado a dispor
Ecoinvent				Materiais recicláveis* são aqueles com pouco ou nenhum valor econômico que podem servir como insumo ou recurso para uma atividade de reciclagem; portanto, existe interesse em sua coleta	São materiais sem valor econômico e para os quais não existe interesse na coleta se não houver compensação.
Renewable Energy Directive (RED) (European Commission, 2010)				“Resíduos agrícolas, de aquicultura, de pesca e florestais, e resíduos de processamento. Um resíduo de processamento é uma substância que não é o(s) produto(s) final(is) que um processo de produção busca diretamente produzir. Não é um objetivo primário do processo de produção, e o processo não foi deliberadamente modificado para produzi-lo.”	Qualquer substância ou objeto que o detentor descarte ou pretenda ou seja obrigado a descartar, mas excluindo substâncias que tenham sido intencionalmente modificadas para contar como resíduo”
Renewable Transport Fuel Obligation (RTFO) (Department For Transport, 2011)	“Materiais que representam um valor econômico significativo em relação ao produto principal e que têm outros usos além de aplicações energéticas provavelmente serão considerados produtos. Qualquer material que tenha sido intencionalmente modificado para ser considerado um resíduo será considerado um produto.”			Igual à RED	
ICF International (ICF international, 2015)	“Os produtos primários são os produtos de valor dominante do processo com oferta e demanda elásticas.”		Produtos de um processo que têm oferta inelástica com demanda e têm um	Produtos de um processo que têm oferta inelástica com a demanda e têm pouco ou nenhum valor econômico	

	O objetivo principal do processo é o(s) material(ais) para o qual o processo é normalmente otimizado. Tais materiais devem ser considerados como produto principal ou coproduto”		valor econômico significativo		
Ecofys (SPÖTTLE <i>et al.</i> , 2013)	“O objetivo principal do processo é o(s) material(ais) para o(s) qual(is) o processo é normalmente otimizado. Tais materiais devem ser considerados como produto principal ou coproduto” “Se um material de um processo constitui um resultado essencial/considerável do processo e este material tem outros usos além de aplicações de energia, ele deve ser considerado como um coproduto”			“Um material pode ser considerado um resíduo se tiver um valor econômico de cerca de 15% ou menos em comparação ao valor total dos produtos principais, coprodutos e resíduos.	Igual à RED
Canadá: Clean Fuel Regulations - SOR/2022-140 (Government of Canada, 2024)				Substância gerada incidentalmente durante um processo de produção, mas que não é o principal produto desse processo	
CORSIA (ICAO, 2023)	São os principais produtos de um processo de produção. Esses produtos têm valor econômico significativo e oferta elástica (ou seja, há evidências de que existe um vínculo causal entre os preços da matéria-prima e a quantidade de matéria-prima produzida).		São produtos secundários com fornecimento e valor econômico inelásticos.	São materiais com oferta inelástica e sem valor econômico.	
IMO (IMO, 2023)			Um resultado de um processo de produção que possui valor econômico e oferta elástica		Inevitavelmente produzido e com valor econômico insignificante, necessitando de processamento adicional para ser usado no processo de conversão principal
PEFCR (Zampori; Pant, 2019)		Quando o material tem valor econômico na porteira da fazenda, uma alocação econômica da carga a montante deve ser usada usando o valor econômico relativo material em comparação aos produtos principais.		Quando o material não tem valor econômico	

Fonte: Adaptada de RO; ZHANG; KENDALL (2023).