



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS



MURILO DOS SANTOS OLIVEIRA

GASES DE EFEITO ESTUFA ASSOCIADOS ÀS
OPERAÇÕES DE UMA COOPERATIVA DE MATERIAIS
RECICLÁVEIS

JOÃO PESSOA - PB
2025

PPGER / MESTRADO ACADÊMICO / Nº 124

MURILO DOS SANTOS OLIVEIRA

**GASES DE EFEITO ESTUFA ASSOCIADOS ÀS OPERAÇÕES DE UMA
COOPERATIVA DE MATERIAIS RECICLÁVEIS**

Dissertação apresentado à Universidade Federal da Paraíba, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, área de concentração em Meio Ambiente, Economia e Aproveitamento Energético para a obtenção do título de Mestre.

Orientadora
Prof^ª. Dr^ª. Monica Carvalho

**JOÃO PESSOA - PB
2025**

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

O48g Oliveira, Murilo Dos Santos.
Gases de efeito estufa associados às operações de
uma cooperativa de materiais recicláveis / Murilo Dos
Santos Oliveira. - João Pessoa, 2025.
101 f. : il.

Orientação: Monica Carvalho.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Resíduos sólidos urbanos. 2. Cooperativas de
reciclagem. 3. Coleta seletiva. 4. Avaliação de ciclo
de vida. I. Carvalho, Monica. II. Título.

UFPB/BC

CDU 628.4(043)



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS



ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

ATA nº 124 da Sessão de Defesa Dissertação do Mestrado Acadêmico do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, Universidade Federal da Paraíba.

Ao vigésimo nono dia do mês de julho de dois mil e vinte e cinco foi instalada a Banca de Defesa de Dissertação do Mestrado Acadêmico do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas de forma PRESENCIAL, as 14h00, no Sala 03 do Antigo Bloco da Pós-graduação do CCSA “Prof. Afrânio de Aragão” a que se submeteu a defesa pública de **MURILO DOS SANTOS OLIVEIRA**, matrícula 20231017299, com o título **“GASES DE EFEITO ESTUFA ASSOCIADOS ÀS OPERAÇÕES DE UMA COOPERATIVA DE MATERIAIS RECICLÁVEIS”**. A Comissão Examinadora esteve constituída pelos professores: MONICA CARVALHO (UFPB), JOSE FELIX DA SILVA NETO (UFPB) e EDVALDO PEREIRA SANTOS JUNIOR (UEPB). Concluídos os trabalhos de apresentação e arguição, o candidato foi **aprovado** pela Comissão Examinadora. E, para constar, foi lavrada a presente ata, assinada pelos membros da Comissão.

Observações: Implementação das sugestões e correções indicadas pela banca examinadora.

Membros da Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente
MONICA CARVALHO
Data: 29/07/2025 20:15:03-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profª Drª MONICA CARVALHO
Orientadora



Documento assinado digitalmente
JOSE FELIX DA SILVA NETO
Data: 30/07/2025 21:41:23-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. JOSE FELIX DA SILVA NETO
Examinador Interno



Documento assinado digitalmente
EDVALDO PEREIRA SANTOS JUNIOR
Data: 30/07/2025 08:53:51-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. EDVALDO PEREIRA SANTOS JUNIOR
Examinador Externo

Obs.(1): O discente deverá encaminhar a coordenação do PPGER, no prazo máximo de 45 dias a contar da data da defesa, os exemplares definitivos da dissertação via Sistema SIGAA – Auto depósito (Art. 87 Resolução 54/2024 CONSEPE).

Obs.(2): O docente deverá encaminhar a coordenação do PPGER, no prazo máximo de 20 dias a contar da data da defesa, o relatório de orientação para avaliação do colegiado.



RESUMO

As cooperativas de materiais recicláveis desempenham um papel crucial na promoção da reciclagem e da circularidade dos materiais, gerando economia de recursos e benefícios ambientais; todavia, suas atividades também geram emissões de gases de efeito estufa (GEEs). Essas emissões decorrem do processamento e transporte dos materiais recicláveis. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia vital para identificar os impactos ambientais dos diferentes métodos de tratamento de resíduos, orientando decisões sobre tecnologias e políticas mais sustentáveis. Assim, o objetivo geral deste estudo é avaliar as emissões de GEEs associadas ao processo da coleta de resíduos da cooperativa de reciclagem Itamare, localizada no município de Itabaiana (Paraíba - Brasil) e investigar estratégias para sua mitigação. Para isso, foram definidos três objetivos específicos. O primeiro refere-se a uma revisão sistemática da literatura, que combina bibliometria e análise de conteúdo, aplicada às cooperativas de reciclagem e a ACV. Essa etapa permitiu uma compreensão mais abrangente do estado atual da arte sobre ambas temáticas. Os resultados demonstraram que, dentro de um espectro de 54 artigos que trataram sobre cooperativas de reciclagem, apenas 12% abordaram a metodologia da ACV; destacando um campo em desenvolvimento e uma possível falta de conscientização sobre a importância desse método para o campo estudado. Essa revisão permitiu também a seleção de artigos que forneceram a base necessária para as análises requeridas na concepção do estudo. No segundo momento, foram quantificadas as emissões de GEEs (pegada de carbono) associadas à cooperativa de reciclagem Itamare. Para isso, recorreu-se a metodologia da ACV, considerando os processos de coleta, processamento e transporte dos resíduos destinados às empresas de beneficiamento. Verificou-se que de um total de 194,98 t CO₂-eq emitidos mensalmente, 194,90 t CO₂-eq estão associados à coleta de 150 toneladas de resíduos diversos e a destinação de 40 toneladas de resíduos plásticos, por meio de veículo movido a diesel. Essa parcela correspondeu a mais de 99% das emissões de GEEs, destacando o transporte como o seu principal ponto crítico. Por fim, no terceiro momento, procedeu-se a investigação de alternativas tecnológicas com potencial para reduzir essas emissões. Inicialmente foi considerada a substituição do diesel comum pelo diesel S-10 e, posteriormente, pela mistura do biodiesel (nas proporções de 20%, 25% e 100%). A possibilidade da substituição do caminhão utilizado pela cooperativa por um veículo elétrico também foi considerada. Os resultados demonstraram que o uso de biodiesel a 20% e 25% pode gerar uma redução mensal das emissões de GEEs em até 3,06%, ou 715,04 t CO₂-eq/ano, desde que usados veículos compatíveis. Com biodiesel puro, a redução pode chegar a 29,99%, também dependendo da adaptação do veículo. Os dados levantados podem orientar outras cooperativas e impulsionar práticas sustentáveis no setor, reforçando a importância da integração entre ciência, operação e políticas públicas na transição para uma economia de baixo carbono.

Palavras-Chave: Resíduos sólidos urbanos; Cooperativas de reciclagem; Coleta seletiva; Avaliação de Ciclo de Vida.

ABSTRACT

Recyclable material cooperatives play a crucial role in promoting recycling and material circularity, generating resource savings and environmental benefits; however, their activities also result in greenhouse gas (GHG) emissions. These emissions stem from the processing and transportation of recyclable materials. Life Cycle Assessment (LCA) is a vital methodology for identifying the environmental impacts of different waste treatment methods, guiding decisions on more sustainable technologies and policies. Thus, the overall objective of this study is to assess the GHG emissions associated with the waste collection process of the Itamare recycling cooperative, located in the municipality of Itabaiana (Paraíba – Brazil), and to investigate strategies for their mitigation. To achieve this, three specific objectives were defined. The first involves a systematic literature review that combines bibliometric analysis and content analysis, focusing on recycling cooperatives and LCA. This stage provided a broader understanding of the current state of the art in both areas. The results showed that, within a set of 54 articles addressing recycling cooperatives, only 12% discussed the LCA methodology, highlighting a developing field and a possible lack of awareness regarding the importance of this method for the subject under study. This review also enabled the selection of articles that provided the necessary foundation for the analyses required in the design of the study. In the second stage, GHG emissions (carbon footprint) associated with the Itamare recycling cooperative were quantified. For this purpose, the LCA methodology was applied, considering the processes of collection, processing, and transportation of waste destined for recycling companies. It was found that, from a total of 194.98 t CO₂-eq emitted monthly, 99.9% were associated with the collection of 150 tons of assorted waste and the transportation of 40 tons of plastic waste using a diesel-powered vehicle. This portion accounted for over 99% of the GHG emissions, highlighting transportation as the main critical point. Finally, in the third stage, technological alternatives with the potential to reduce these emissions were investigated. Initially, the replacement of regular diesel with S-10 diesel was considered, followed by blends of biodiesel (at 20%, 25%, and 100% proportions). The possibility of replacing the cooperative's truck with an electric vehicle was also considered. The results showed that using 20% and 25% biodiesel could reduce GHG emissions by up to 3.06% (715.04 t CO₂-eq/year), provided that compatible vehicles are used. With pure biodiesel, the reduction could reach 29.99%, also depending on vehicle adaptation. The data collected may guide other cooperatives and promote sustainable practices in the sector, reinforcing the importance of integrating science, operations, and public policy in the transition to a low-carbon economy.

Keywords: Municipal solid waste; Recycling cooperatives; Selective collection; Life Cycle Assessment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Hierarquia de resíduos.	16
Figura 1.2 Indicadores para os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS).	18
Figura 1.3 Fluxograma da cadeia de reciclagem.	19
Figura 1.4 Total e média per capita de resíduos domiciliares coletada seletivamente por macrorregiões, em 2022.	21
Figura 1.5 Total e média per capita de resíduos domiciliares coletada seletivamente por macrorregiões, em 2022.	23
Figura 1.6 Estrutura da ACV.	26
Figura 2.1 Etapas da pesquisa.	35
Figura 2.2 Distribuição temática dos artigos analisados.	37
Figura 2.3 Evolução anual da quantidade de publicações, por temática predominante.	38
Figura 2.4 Número de publicações sobre cooperativas de reciclagem por países.	39
Figura 2.5 Co-ocorrência de palavras-chave.	40
Figura 2.6 Distribuição percentual das abordagens relacionadas as cooperativa de reciclagem.	42
Figura 3.1 Galpão de triagem da Cooperativa Itamare - Itabaiana (Paraíba).	53
Figura 3.2 Municípios da região metropolitana de Itabaiana atendidos pela cooperativa Itamare (em azul) e localização de sua sede em Itabaiana (marcador vermelho).	54
Figura 3.3 Estrutura geral do processo de coleta, processamento e distribuição de resíduos da Cooperativa Itamare.	55
Figura 3.4 Diagrama do escopo da ACV referente às atividades de coleta, processamento e destinação de resíduos da Cooperativa Itamare.	56
Figura 3.5 Caminhão tipo Delivery utilizado para a coleta de resíduos pela Itamare.	60
Figura 3.6 Prensa hidráulica vertical (a) e triturador forrageiro (b) usados no processamento de resíduos da cooperativa Itamare.	61
Figura 3.7 Fatores de emissões de GEEs relacionados às atividades de coleta e processamento da cooperativa Itamare.	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 Quantidade de cooperativas e associações de catadores atuantes por região do Brasil.....	24
Tabela 1.2 Descrição das normas internacionais referentes à ACV.....	28
Tabela 1.3 Artigos relacionados a aplicações da ACV em unidades de reciclagem.....	30
Tabela 2.1 Artigos sobre cooperativa de reciclagem relacionados à ACV.....	43
Tabela 3.1 Informações coletadas para o ICV da cooperativa Itamare.....	59
Tabela 3.2 Emissões de GEEs mensais associadas às principais atividades da cooperativa Itamare.....	62
Tabela 4.1 Principais informações referentes à ACV da cooperativa Itamare.....	74
Tabela 4.2 Emissões mensais de GEEs associadas aos diferentes tipos de combustíveis e ao caminhão elétrico, considerando o fator de emissão e a mudança relativa em relação ao cenário de referência (diesel comum).....	77

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	11
1.1 INTRODUÇÃO GERAL	11
1.2 OBJETIVOS	14
1.2.1 Objetivo geral	14
1.2.2 Objetivos específicos	14
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	15
1.4 REFERENCIAL TEÓRICO	16
1.4.1 Coleta seletiva	16
1.4.1.1 Cenário brasileiro dos resíduos sólidos	20
1.4.1.2 Políticas públicas de resíduos sólidos no Brasil	21
1.4.2 Reciclagem	23
1.4.3 Avaliação de ciclo de vida	25
1.4.4 ACV em uma unidade de reciclagem	28
CAPÍTULO 2	31
2. ARTIGO: REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA PARA COOPERATIVAS DE RECICLAGEM SOB A ÓTICA DA AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA (ACV): INTER-RELAÇÕES E LACUNAS	31
RESUMO	31
ABSTRACT	32
2.1 INTRODUÇÃO	33
2.2 METODOLOGIA	34
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
2.4 CONCLUSÃO	45
2.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45
CAPÍTULO 3	49
3. ARTIGO: PEGADA DE CARBONO DO PROCESSO DE COLETA, PROCESSAMENTO E DESTINAÇÃO DE RESÍDUOS DA COOPERATIVA DE RECICLAGEM ITAMARE	49
RESUMO	49
3.1 INTRODUÇÃO	51
3.2 MATERIAL E MÉTODOS	53
3.2.1 Caracterização da área estudada	53
3.2.2 Caracterização do processo da coleta seletiva da Itamare	54

3.2.3 Avaliação de Ciclo de Vida	55
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
3.4 CONCLUSÃO	64
3.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64
CAPÍTULO 4	69
4. ARTIGO: ESTRATÉGIAS PARA A REDUÇÃO DA PEGADA DE CARBONO DA COOPERATIVA DE RECICLAGEM ITAMARE.	69
RESUMO	69
ABSTRACT	70
4.1 INTRODUÇÃO	71
4.2 MATERIAL E MÉTODOS	73
4.2.1 Definição de estratégias mitigadoras	75
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	77
4.4 CONCLUSÃO	80
4.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
CAPÍTULO 5	86
5. CONCLUSÕES GERAIS	86
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DA DISSERTAÇÃO	88

CAPÍTULO 1

1.1 INTRODUÇÃO GERAL

Os resíduos sólidos são materiais descartados após serem utilizados e que geralmente não têm valor econômico. Esses resíduos podem ser gerados por atividades residenciais, industriais, comerciais, mineradoras e agrícolas (Beigl *et al.*, 2008). Conforme o relatório do Banco Mundial (Kaza *et al.*, 2018), a urbanização acelerada e o crescimento populacional podem causar um aumento de 70% nos resíduos sólidos globais até 2050, caso não sejam tomadas medidas urgentes. Isso resultaria em um aumento de 2,01 bilhões de toneladas de resíduos, em 2016, para 3,4 bilhões de toneladas, em 2050.

O relatório de Kaza *et al.* (2018) também revelou que 36,7% dos resíduos sólidos no mundo são destinados a aterros sanitários, enquanto 33% acabam em lixões a céu aberto. Apenas uma pequena parte é tratada por outros métodos, como incineração, compostagem e reciclagem. Estima-se que apenas 13,5% dos resíduos são reaproveitados na produção de novos bens ou serviços. Vale salientar que a decomposição desses resíduos resulta na liberação de gases de efeito estufa (GEEs, também referidos como pegada de carbono), que contribuem para as mudanças climáticas (King; Gutberlet, 2013).

Em 2023, estima-se que 69,3 milhões de toneladas de RSU foram destinadas à disposição final no Brasil, das quais 58,5% seguiram para aterros sanitários e mais de 41% ainda tiveram destinação ambientalmente inadequada (ABREMA, 2024). Além de representar ameaças à saúde da população e ao equilíbrio ambiental, essa situação mostra que a gestão de resíduos no Brasil ainda não cumpre plenamente as diretrizes estabelecidas pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (Brasil, 2010).

Nesse contexto, as cooperativas de materiais recicláveis se mostram como fundamentais no processo de reciclagem, promovendo a circularidade desses materiais (Gutberlet *et al.*, 2017). Diversos estudos realizados no Brasil, como os de Ghisolfi *et al.* (2017), Lima e Mancini (2017), Campos (2014), Castilhos Junior *et al.* (2013) e Tirado-Soto e Zamberlan (2013), têm demonstrado que a participação dos catadores na cadeia de reciclagem, através de cooperativas ou associações, pode gerar economia de recursos para o Sistema Municipal de Resíduos Sólidos. Esses pesquisadores destacaram que os catadores reintegraram materiais que, de outra forma, seriam descartados, proporcionando benefícios ambientais e reduzindo os custos de disposição em aterros.

Paralelamente, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é frequentemente empregada para identificar impactos ambientais, indicando os *hotspots* para redução destes. Esta metodologia consegue examinar os problemas mais críticos causados pela escolha de diferentes métodos de tratamento de resíduos. Aplicada à gestão de resíduos, a ACV se transforma em uma ferramenta crucial para mitigar os impactos ambientais, ao identificar os efeitos significativos de sistemas de gestão de resíduos ineficientes (Yadav; Samadder, 2014). Nesse contexto, a ACV é um passo fundamental a ser realizada antes de tomar decisões sobre a escolha de tecnologias, políticas e abordagens para implementação no setor de tratamento de resíduos sólidos.

A aplicação da ACV em cooperativas possibilita identificar os impactos ambientais associados às suas atividades, especialmente no que se refere à emissão de GEEs. Com isso, desenvolver estratégias para reduzir as emissões de GEEs em uma cooperativa de reciclagem é relevante sob perspectivas ambientais, sociais e econômicas. Ambientalmente, mitigar as mudanças climáticas é essencial para combater o aquecimento global e seus impactos negativos nos ecossistemas e padrões climáticos (Ebi; Hess, 2020). Socialmente, a responsabilidade corporativa inclui melhorar a qualidade de vida nas comunidades locais e fortalecer a imagem pública da cooperativa, atraindo investidores e clientes. Desse modo, à medida que mais empresas adotam práticas ambientalmente sustentáveis, a ACV também se revela vantajosa para estratégias de *marketing* e gestão (Mandpe, 2022).

No âmbito econômico, práticas que reduzem emissões podem aumentar a eficiência energética e reduzir custos (Marques; Fuinhas; Tomás, 2019), como o planejamento de rotas de coleta mais eficientes ou a utilização de fontes de energias renováveis. Além disso, em alguns casos, há incentivos financeiros disponíveis para instituições que adotam práticas sustentáveis. Legalmente, a conformidade com leis e regulamentos, influenciados por países que ratificaram o Acordo de Paris (2015), é crucial para evitar penalidades e garantir a continuidade dos negócios.

Alguns dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) também contribuem diretamente para a mitigação das emissões de GEEs, ao estabelecer metas voltadas à preservação ambiental dentro de uma agenda global (ONU, 2023). A ODS 11 propõe o fortalecimento de cidades e comunidades mais sustentáveis, seguras e resilientes, por meio da melhoria da gestão urbana e do tratamento adequado dos resíduos. A ODS 12 destaca a importância de adotar padrões de consumo e produção mais responsáveis, priorizando a redução de resíduos e o uso eficiente dos recursos naturais. Já a ODS 7 reforça a

necessidade de ampliar o acesso à energia limpa, acessível e renovável, favorecendo a redução dos impactos ambientais e incentivando a transição para uma economia de baixo carbono.

Com isso, esse estudo pretende avaliar os GEEs associados à coleta de resíduos da cooperativa de catadores de material reciclável Itamare, localizada no município de Itabaiana (Paraíba, Brasil). Essa avaliação abrange as atividades de coleta, transporte e manejo de resíduos recicláveis pela cooperativa. Além disso, busca-se sugerir estratégias para a mitigação desses GEEs provenientes das atividades da Itamare.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar as emissões de GEEs associadas ao processo de coleta de resíduos da cooperativa de reciclagem Itamare e sugerir estratégias para sua mitigação.

1.2.2 Objetivos específicos

- Realizar uma revisão sistemática da literatura aplicada às cooperativas de reciclagem e a ACV, combinando bibliometria e análise de conteúdo.
- Identificar os procedimentos associados ao funcionamento da cooperativa Itamare e quantificar as emissões de GEEs do processo de coleta de resíduos, empregando o método da ACV.
- Sugerir estratégias para a redução das emissões provenientes da cooperativa Itamare, a partir da identificação dos seus *hotspots* ambientais (com base na ACV) e estimar a pegada de carbono evitada a partir de suas aplicações.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A dissertação segue uma organização em capítulos, onde os capítulos 2, 3 e 4 referem-se a artigos científicos. Esses artigos foram cuidadosamente estruturados para abordar diferentes aspectos do tema em questão, descritos a seguir:

- Capítulo 1: contém a introdução, o objetivo geral e os objetivos específicos que serão explorados ao longo do trabalho, a organização da dissertação, e a fundamentação teórica com os principais conceitos necessários para o entendimento da pesquisa.
- Capítulo 2: apresenta o artigo de revisão bibliográfica acerca das tendências na pesquisa, lacunas e interseções entre cooperativas de reciclagem e a metodologia de avaliação de ciclo de vida.
- Capítulo 3: artigo sobre a avaliação dos impactos ambientais do processo de coleta de resíduos da cooperativa de materiais recicláveis Itamare, a partir do método de ACV.
- Capítulo 4: apresenta o artigo sobre a verificação de estratégias para a redução de pegada de carbono da Cooperativa Itamare.
- Capítulo 5: traz os resultados gerais do trabalho e a listagem das referências utilizadas ao longo da pesquisa.

1.4 REFERENCIAL TEÓRICO

1.4.1 Coleta seletiva

O crescimento populacional mundial resulta em uma rápida industrialização, urbanização e desenvolvimento econômico, fatores que são os principais responsáveis pelo acelerado aumento na geração de RSU em escala global. A má gestão dos resíduos gerados resulta em diversos problemas ambientais, incluindo o aquecimento global, riscos à saúde humana, esgotamento de recursos abióticos e danos aos ecossistemas, entre outros (Khandelwal *et al.*, 2019).

O aterro sanitário ainda é o método mais utilizado para o descarte de resíduos em nível global, mesmo sendo a opção menos preferida na hierarquia de gestão de resíduos (Bhada-Tata; Hoornweg, 2012). Organizada em forma de pirâmide, a hierarquia de resíduos é uma ferramenta utilizada na gestão de resíduos sólidos para priorizar práticas sustentáveis, como reduzir, reutilizar e reciclar (Figura 1.1). Por outro lado, na base da pirâmide, os aterros são considerados uma das maiores fontes antropogênicas de metano, um gás com elevado potencial de aquecimento global, representando riscos significativos ao meio ambiente e à saúde humana ao contaminar o solo e as águas subterrâneas (Couth; Trois, 2012; Duan *et al.*, 2015).



Figura 1.1 Hierarquia da gestão de resíduos sólidos.

Fonte: Traduzido de Bhada-Tata; Hoornweg, 2012.

Para enfrentar esse problema urgente, os países estão implementando mudanças substanciais em suas estratégias de gestão de resíduos sólidos (GRS). Um exemplo disso é

o ambicioso plano da Finlândia de "Eliminar todos os resíduos até 2050" (Abend, 2021). A gravidade da situação demanda um enfoque na conservação, reutilização e reciclagem de recursos, em vez de sua simples eliminação (Bui *et al.*, 2022).

Nessa perspectiva, a criação de indicadores de desenvolvimento sustentável faz parte de uma iniciativa global para concretizar os princípios estabelecidos na Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (1992). Realizada no Rio de Janeiro em 1992, esta conferência teve como foco a interconexão entre meio ambiente, sociedade, desenvolvimento e informações para a tomada de decisões. Este cenário resultou na criação de dois importantes instrumentos: a Agenda 21 (Brasil, 1996) e os Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (Brasil, 2004). Estes documentos, considerados complementares, foram concebidos para promover o desenvolvimento sustentável e foram aprovados e adotados pelos Estados-membros da Organização das Nações Unidas, incluindo o Brasil.

Dessa forma, a Agenda 2030 (ONU, 2015), sucessora da Agenda de Desenvolvimento do Milênio (2000-2015), foi elaborada por meio de um processo global participativo liderado pela ONU, envolvendo governos, sociedade civil, setor privado e instituições de pesquisa. A Agenda 2030 abrange desenvolvimento econômico, erradicação da pobreza e fome, inclusão social, sustentabilidade ambiental, boa governança, paz e segurança. Para isso, inclui 17 objetivos e 169 metas a serem alcançados até 2030, com base nas metas globais (Figura 1.2). O monitoramento e a avaliação dessa agenda são essenciais para sua implementação e devem ser realizados sistematicamente em diferentes níveis, incluindo nacional e regional.

Alguns desses Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) abordam diretamente a problemática dos resíduos sólidos. O ODS 11, "Cidades e comunidades sustentáveis", inclui a meta 11.6, que visa reduzir, até 2030, o impacto ambiental per capita das cidades, focando na gestão de resíduos municipais e na qualidade do ar. O ODS 12, "Consumo e Produção Responsáveis", inclui a meta 12.5, que busca reduzir significativamente a geração de resíduos até 2030, através da prevenção, redução, reciclagem e reuso.



Figura 1.2 Indicadores para os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS).

Fonte: ONU, 2025.

Por outro lado, O ODS 13 aborda a necessidade urgente de combater a mudança global do clima e seus impactos. Este objetivo destaca a importância de integrar medidas climáticas nas políticas, estratégias e planejamentos nacionais, além de aumentar a resiliência e a capacidade de adaptação às adversidades climáticas (ONU, 2023).

Nesse contexto, uma alternativa que vem ganhando destaque para o reaproveitamento eficiente de recursos é a coleta seletiva. Além de uma simples separação de resíduos, a coleta seletiva é entendida como um ciclo contínuo que começa com a geração e descarte do lixo e se completa quando os materiais recicláveis são reintegrados em novos processos produtivos (Silva, 2017; IBAM, 2001). Este processo é iniciado então após o consumo doméstico de produtos ou serviços, onde os resíduos gerados são colocados em frente às casas, em espaços públicos ou em pontos estratégicos de entrega voluntária (PEVs) (Figura 1.3). Alguns lares fazem uma pré-seleção dos resíduos, acondicionando-os de maneira que preserve os materiais recicláveis, disponibilizando-os através de doações.

No sistema regular, caminhões de coleta municipais ou de empresas terceirizadas transportam o lixo para seu destino final, como aterros sanitários, usinas de incineração ou lixões, encerrando assim o ciclo. Na coleta seletiva, o recolhimento pode ser feito porta a porta por veículos oficiais ou catadores, que coletam os resíduos nos espaços públicos, ou através dos PEVs, que são contêineres ou lixeiras acessíveis onde os cidadãos podem

depositar materiais (CEMPRE, 2012; IBGE, 2018; Tchobanoglous, 2009).

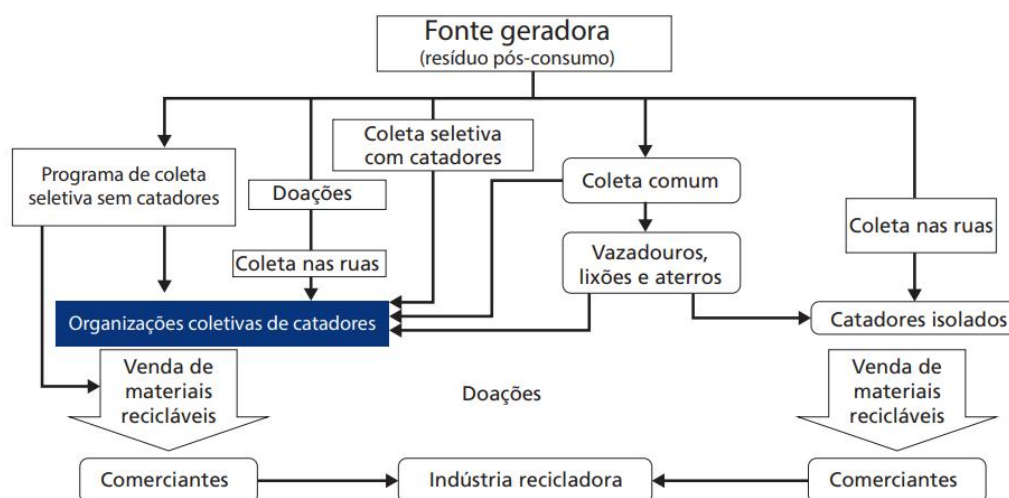


Figura 1.3 Fluxograma da cadeia de reciclagem de RSU.

Fonte: Silva (2017).

Os materiais coletados seletivamente são encaminhados para tratamento. A porção orgânica pode ser compostada, gerando adubos para uso doméstico, agrícola ou jardinagem. Os recicláveis secos vão para usinas de triagem administradas por órgãos municipais ou cooperativas de catadores, onde são separados conforme seu potencial reciclável e comercial (Silva, 2017). Materiais não recicláveis são descartados em aterros, enquanto os recicláveis são vendidos a depósitos e comerciantes, compactados e revendidos às indústrias recicladoras, que os transformam em novos insumos para reinserção no ciclo produtivo.

Com tudo isso, a implementação eficaz da coleta seletiva enfrenta diversos desafios. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2017), em muitos países, especialmente nos em desenvolvimento, a infraestrutura inadequada, a falta de conscientização pública e o apoio governamental insuficiente dificultam a gestão eficiente dos resíduos. Mesmo assim, a coleta de materiais recicláveis em economias em desenvolvimento é essencial para os esforços de redução de resíduos (Shruti *et al.*, 2023). Além disso, promove a geração de empregos (Dutra; Yamane; Siman, 2018), diminui o consumo de recursos naturais (Paes *et al.*, 2020) e contribui para a mitigação da degradação ambiental (Campos, 2014).

1.4.1.1 Cenário brasileiro dos resíduos sólidos

O Brasil ocupa a quinta posição tanto em população quanto em extensão territorial no mundo (IBGE, 2017). Como uma nação que ainda está se integrando às economias industrializadas mais desenvolvidas, o país enfrenta desafios consideráveis na gestão presente e futura dos resíduos sólidos (Alfaia *et al.*, 2017). Sua urbanização foi consequência de um intenso êxodo rural, provocado pela perda da capacidade produtiva e pela dificuldade da população rural em se sustentar, decorrente da industrialização tardia (Fernandes, 2008). Com o desenvolvimento das cidades e a consolidação do consumo impulsionado pela industrialização na sociedade, a produção de resíduos sólidos tornou-se cada vez mais frequente (Marino; Chaves; Santos Junior, 2018). No entanto, o avanço na gestão desses resíduos não acompanhou a mesma intensidade do crescimento das áreas urbanas (Chaves; Batalha, 2006).

No país, a coleta seletiva ainda enfrenta desafios significativos, apesar dos avanços nos últimos anos. A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010, estabelece diretrizes para a gestão integrada de resíduos, incluindo a implementação de sistemas de coleta seletiva (Brasil, 2010). Entretanto, a cobertura e a eficiência desses sistemas variam consideravelmente entre as regiões.

O Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) é uma plataforma do governo brasileiro que coleta, processa e dissemina informações sobre os serviços de saneamento no país. Registros de 2022 mostram que de 63,80 milhões de toneladas de RSU coletados no Brasil, apenas 1,87 milhões referem-se a resíduos provenientes de coleta seletiva (SNIS, 2023). A Figura 1.4 ilustra a massa de resíduos domiciliares coletada seletivamente por macrorregiões em 2022. Necessário considerar que os resíduos sólidos recicláveis secos recuperados em um país incluem não apenas a fração de resíduos sólidos urbanos, mas também resíduos recicláveis pré-consumo, provenientes de processos industriais, e resíduos pós-consumo, que podem ser coletados seletivamente pelos sistemas municipais de gerenciamento de resíduos (BRASIL, 2022).

É importante destacar que, em 2022, o Brasil contava com 1.972 unidades de triagem, das quais a maioria (77,0%) estava concentrada nas regiões Sudeste e Sul, com 818 e 701 unidades, respectivamente. As demais regiões abrigavam 23,0% dessas unidades, sendo a região Norte a de menor concentração, com um total de 62 unidades, correspondendo a apenas 3,1% do total (SNIS, 2023). Além disso, somente 27,5% dos

municípios brasileiros ofereciam serviço de coleta seletiva porta-a-porta à população (SNIS, 2023).

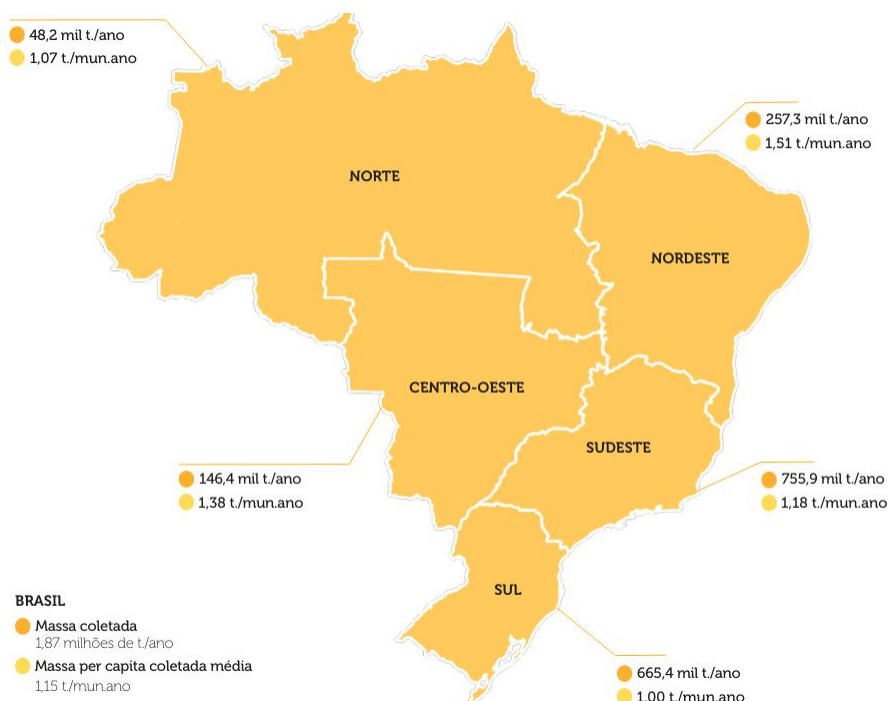


Figura 1.4 Total e média per capita de resíduos domiciliares coletada seletivamente por macrorregiões, em 2022.

Fonte: SNIS, 2023.

No Brasil, a gestão de resíduos sólidos é um desafio tecnológico, político e econômico. Ainda há um longo caminho a percorrer para aumentar a reciclagem e reduzir a quantidade de resíduos enviados para aterros sanitários. É necessário investir em tecnologias e infraestrutura para melhorar a coleta e tratamento de resíduos, além de estimular a participação da sociedade civil e da iniciativa privada na gestão de resíduos (Ibiapina; Oliveira; Leocadio, 2021).

1.4.1.2 Políticas públicas de resíduos sólidos no Brasil

O impacto ambiental dos resíduos sólidos resultou na criação de novas políticas governamentais para a gestão dos RSU (Cetrulo *et al.*, 2018). Depois de um extenso trâmite burocrático no Congresso Nacional do Brasil, foi sancionada, em 2010, a Lei Federal 12.305, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS),

estabelecendo um marco regulatório fundamental para a gestão de resíduos sólidos no país. Esta política define metas, proíbe o descarte inadequado de resíduos e oferece incentivos para a reutilização e reciclagem de materiais (Brasil, 2010).

As PNRS abordam diversos aspectos, incluindo a priorização de ações para a gestão de resíduos, a promoção da inclusão social, o fortalecimento das iniciativas de educação ambiental, a coleta seletiva, a logística reversa e a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos. Além disso, a gestão econômica é considerada crucial para garantir a efetividade da política.

Entre outras exigências, a PNRS estabelece que os municípios devem erradicar os lixões e implantar aterros sanitários destinados exclusivamente aos rejeitos. Para continuarem a receber recursos do Governo Federal, os municípios também precisam elaborar seus Planos Integrados de Gerenciamento de Resíduos Sólidos. Estes planos devem incluir a implementação da coleta seletiva, envolvendo cooperativas ou outras formas de associações de catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis compostas por pessoas de baixa renda (BRASIL, 2010).

De acordo com Silva (2017), as cooperativas são consideradas uma solução eficaz para agregar valor aos produtos recicláveis e aumentar a renda dos catadores. Para apoiar e incentivar o crescimento dessas cooperativas, o governo federal implementou várias ferramentas, incluindo o Decreto nº 7.405/2010 (Brasil, 2010), que estabeleceu o programa Pró Catador e o projeto Logística Solidária Cataforte II. Embora o decreto tenha sido revogado em 2020, um grupo de trabalho sob a nova administração em 2023 elaborou uma proposta para restaurá-lo, através da Portaria nº 2 de 5 de janeiro de 2023 (PORTARIA nº 2, 2023).

O Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima (MMA) também contribuiu para o fortalecimento da reciclagem no Brasil por meio da Portaria GM/MMA nº 1.250/2024 (Brasil, 2024), que define os critérios para submissão, avaliação, aprovação, acompanhamento, prestação de contas e análise dos resultados de projetos vinculados à Lei de Incentivo à Indústria e à Cadeia Produtiva da Reciclagem. Dessa forma, os projetos podem abranger iniciativas que ampliem a atuação de catadores de materiais recicláveis, desenvolvam redes de comercialização ou fortaleçam cadeias produtivas no setor de reciclagem. Esses esforços visam diminuir a geração de resíduos, incentivar a reutilização de materiais e gerar benefícios ambientais e sociais significativos (ABRERPI, 2024). Uma linha do tempo com as principais normas relacionadas às cooperativas de reciclagem no

Brasil está ilustrada na Figura 1.5.



Figura 1.5 Linha temporal das principais normas envolvendo as cooperativas de reciclagem no Brasil.

De maneira geral, a legislação brasileira abrange o planejamento das atividades relacionadas ao manejo de resíduos sólidos, incluindo coleta, transporte, tratamento e disposição final. Entretanto, a implementação dessas políticas enfrenta desafios significativos. Muitos municípios ainda carecem de infraestrutura adequada e recursos financeiros para cumprir as exigências da PNRS. De acordo com o levantamento do SNIS, em 2020, cerca de 40% dos resíduos sólidos urbanos ainda eram destinados a lixões ou aterros controlados, em desacordo com a legislação vigente (SNIS, 2021).

1.4.2 Reciclagem

Na economia atual, prevalece um modelo de produção de bens predominantemente linear. Isso significa que os recursos são extraídos, os produtos são fabricados e, eventualmente, após cumprirem seu propósito, são descartados como resíduos. Esse modelo enfrenta não apenas o desafio da grande quantidade de resíduos gerados, mas também a escassez de recursos disponíveis (Lieder; Rashid, 2016). Por outro lado, a economia circular é caracterizada como um sistema regenerativo que busca minimizar o uso de recursos, a geração de resíduos, as emissões e a perda de energia (Geissdoerfer *et al.*, 2017). Esse objetivo é alcançado por meio da reutilização, redução de resíduos, refabricação, melhoria do design dos produtos e reciclagem (Liu; Adams; Walker, 2018).

Nesse sentido, a reciclagem é fundamental para evitar o esgotamento e a degradação dos recursos naturais, reintegrando resíduos sólidos e materiais ao seu estado

original (Bui *et al.*, 2022). A PNRS segue os princípios dos 4Rs (reduzir, reutilizar, reciclar e recuperar), promovendo a mínima geração de resíduos (Campos, 2014; Batista *et al.*, 2021). Conforme esses princípios, a PNRS define reciclagem como o processo que transforma resíduos sólidos, modificando suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas, para criar novos materiais ou produtos, atendendo aos requisitos e padrões estabelecidos pelos órgãos administrativos competentes (Brasil, 2010).

Dessa forma, a reciclagem de resíduos é considerada uma grande fonte de economia de energia e promotora de recuperação de CO₂. Um percentual de 64% das estações de triagem municipais está sob a administração de associações ou cooperativas de catadores. Em 2022, computou-se um total de 38.999 catadores associados em 1.921 entidades associativas ou cooperativas presentes em 1.372 municípios, conforme apresentado na Tabela 1.1 (SNIS, 2023).

Tabela 1.1 Quantidade de cooperativas e associações de catadores atuantes por região do Brasil.

Macrorregião	Quantidade de cooperativas/ associações de catadores	Percentual de entidades (%)	Quantidade de associados	Percentual de associados (%)
Sudeste	709	36,9	13.079	33,5
Sul	605	31,5	10.802	27,7
Nordeste	381	19,8	10.088	25,9
Centro-oeste	147	7,7	3.247	8,3
Norte	79	4,1	1.783	4,6
Total	1.921	100,0	38.999	100,0

Fonte: Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - SNIS, 2023.

Na macrorregião Sudeste estão sediadas 36,9% das associações ou cooperativas de catadores do país, com mais de 13 mil catadores, representando 33,5% da força de trabalho. No Sul, há 31,5% das organizações e 29,1% dos catadores (10.802 trabalhadores). As demais macrorregiões somam 31,6% das organizações e 38,8% dos trabalhadores.

Fernández-González *et al.* (2017) concluíram que a reciclagem contribui significativamente para a proteção ambiental e a sustentabilidade humana, reduzindo as emissões de carbono conforme avaliado pelo método da ACV. De acordo com Bing *et al.* (2015) e Sanjeevi e Shahabudeen (2015), o atual risco do aquecimento global é atribuído ao aumento das emissões de carbono, resultante do elevado consumo de energia e combustíveis fósseis, problemas que podem ser mitigados através de práticas de reciclagem.

1.4.3 Avaliação de ciclo de vida

A implementação sustentável de diferentes opções de sistemas integrados de gestão de resíduos requer uma compreensão adequada do desempenho ambiental de cada alternativa. Os impactos ambientais desses sistemas têm sido amplamente estudados por meio de metodologias como a ACV, que considera todas as entradas e saídas de materiais e energia e pode incluir desde a produção até a eliminação final, ou seja, do berço ao túmulo (Yay, 2015; Jeswani e Azapagic, 2016). A crescente utilização dessa abordagem para analisar diferentes sistemas de gestão de RSU é evidenciada por diversos artigos publicados (Zhao *et al.*, 2009; Arena *et al.*, 2014; Ferronato *et al.*, 2020; Çetinkaya; Bilgili; Kuzu, 2018; Kulczycka *et al.*, 2015;).

A estrutura da ACV está normatizada internacionalmente pela Organização Internacional de Padronização (*International Organization for Standardization*, ISO) em suas normas ISO 14040 (2006a) e 14044 (2006b). A norma ISO 14040 (2006a) identifica quatro etapas principais dentro de um estudo de ACV: (a) definição dos parâmetros da avaliação, abrangendo o objetivo, o escopo e a descrição do processo ou das atividades de gestão; (b) análise detalhada do Inventário do Ciclo de Vida (ICV); (c) avaliação dos impactos gerados ao longo do ciclo de vida; e (d) interpretação e discussão dos resultados obtidos. A Figura 1.6 ilustra a estrutura da ACV baseada na ISO 14040 (2006a).

A primeira fase, definição do objetivo e escopo, estabelece o propósito do estudo e os limites do sistema a ser analisado. Nessa etapa, são definidos os objetivos específicos, o público-alvo e as fronteiras do sistema, como os processos e fluxos de materiais incluídos. A precisão e clareza na definição do objetivo e escopo são cruciais para garantir que o estudo atenda às expectativas e forneça resultados úteis para a tomada de decisão.

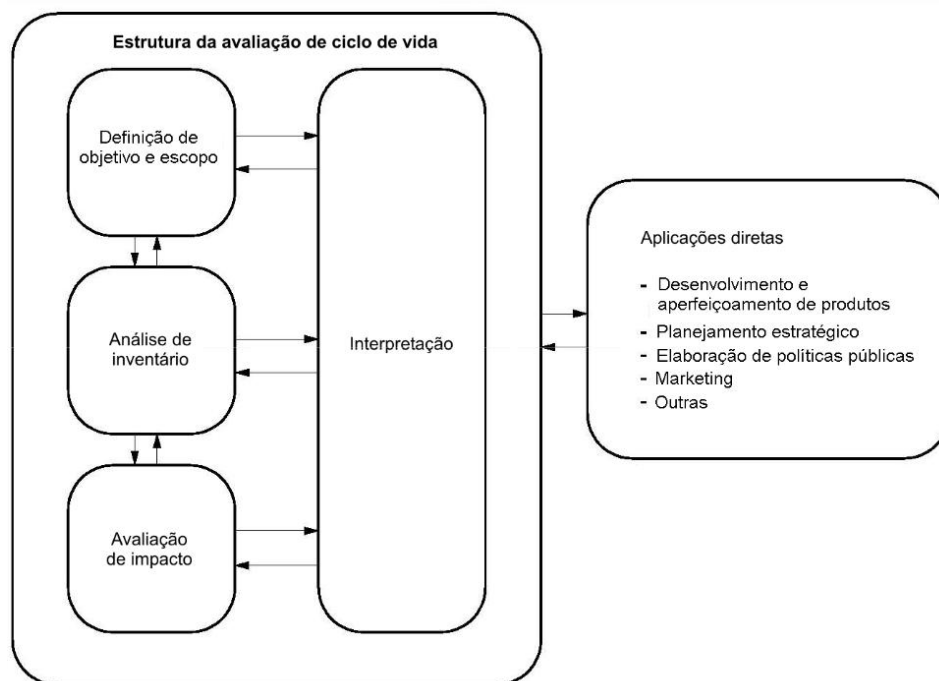


Figura 1.6 Estrutura da ACV.

Fonte: ISO 14040, 2006.

Os limites do sistema de ACV podem ser classificados conforme os objetivos de avaliação: (1) Do berço ao portão, abrangendo da extração da matéria-prima até a fábrica, sem incluir o descarte (Messagie *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2021). (2) Do berço ao berço, considerando a reciclagem e reutilização de resíduos, relevante diante da escassez de recursos (Porzio e Scown, 2021). (3) Portão a portão, cobrindo todas as etapas da fabricação, incluindo energia e materiais (Ahmad *et al.*, 2014; Flor *et al.*, 2017). (4) Do berço ao túmulo, englobando desde a extração até o descarte, analisando todo o ciclo de vida (Accardo *et al.*, 2021). Dependendo do escopo da análise, outras fronteiras podem ser delimitadas para o estudo.

Na fase de análise do ICV, todos os fluxos de entrada e saída relacionados ao sistema são identificados e quantificados. Isso inclui a coleta de dados sobre o consumo de recursos, energia, emissões, resíduos e outros aspectos ambientais ao longo de todo o ciclo de vida do produto. O inventário detalhado fornece a base quantitativa para a avaliação de impacto subsequente, exigindo um esforço significativo na obtenção de dados precisos e relevantes.

Os dados de ICV incluem dados de primeiro plano e de segundo plano. (1) Os dados de primeiro plano vêm de fontes como literatura, livros, dados práticos, relatórios e

patentes (Lai *et al.*, 2022; Spreafico *et al.*, 2023). Dados incorretos podem levar a resultados errados na ACV. (2) Os dados de segundo plano estão disponíveis em bancos de dados comerciais como Ecoinvent (Suíça), GaBi (Alemanha), NREL-USLCI (Estados Unidos), CLCD (China) e Simapro (Holanda), que incluem softwares de LCA como GaBi e eBalance (Herrmann; Moltesen, 2015; Pauer *et al.*, 2020).

A avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) é a terceira fase, onde os dados do inventário são analisados para determinar os impactos ambientais potenciais. Este processo relaciona os dados de inventário com categorias específicas de impacto ambiental e seus respectivos indicadores de categoria (ISO 14040, 2006). Os impactos são categorizados em diferentes áreas, como mudanças climáticas, esgotamento de recursos, toxicidade, entre outros. Métodos e modelos específicos são usados para traduzir os dados do inventário em indicadores de impacto ambiental, permitindo uma compreensão mais profunda das consequências ambientais associadas às atividades analisadas.

A última fase da ACV é a interpretação, que consiste em identificar, quantificar, verificar e avaliar os dados do ICV e da AICV. Esta etapa tem como objetivo aprimorar processos produtivos, desenvolver planejamentos estratégicos e criar políticas públicas. O processo de interpretação inclui: (1) Identificar questões relevantes nas fases de ICV e AICV de uma ACV; (2) Avaliar a pesquisa através de verificações de integridade, sensibilidade e consistência; (3) Resumir as conclusões, explicitar as limitações e apresentar sugestões (Cao, 2017). Nesta etapa, são identificadas as áreas de maior relevância ambiental, as incertezas e as limitações do estudo. A transparência e a comunicação clara dos resultados são essenciais para que os interessados possam compreender e utilizar as informações de maneira eficaz.

As normas internacionais sobre ACV estão divididas em cinco partes (Tabela 1.2), desenvolvidas em diferentes anos: em 1997, foi lançada a ISO 14040, que aborda os princípios gerais; em 1998, a ISO 14041, que trata da definição de objetivo, escopo e ICV; em 2000, foram publicadas a ISO 14042, sobre AICV, e a ISO 14043, que foca na interpretação; e em 2006, a ISO 14044, que detalha os requisitos e diretrizes. No Brasil, a ABNT adotou essas normas como NBR 14040 e NBR 14044 (NBR ISO 14040a, 2014; NBR ISO 14044, 2014b).

Tabela 1.2 Descrição das normas internacionais referentes à ACV.

Normas	Descrição
ISO 14040	Define princípios e critérios para a realização e apresentação de estudos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), sem prescrever procedimentos específicos de avaliação.
ISO 14041	Complementa a ISO 14040 ao definir os requisitos e procedimentos para determinar o objetivo, escopo, fronteiras temporais e geográficas de uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), além de orientar a compilação, interpretação e comunicação do Inventário do Ciclo de Vida (ICV).
ISO 14042	Guia a coleta e quantificação de todas as variáveis ao longo do ciclo de vida de um produto.
ISO 14043	Auxilia na identificação e análise dos resultados obtidos durante avaliações ou inventários.
ISO 14044	Trata de estudos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e de Inventário do Ciclo de Vida (ICV).

Desse modo, os modelos de ACV podem ser aplicados para analisar diversos sistemas de gestão de resíduos e os impactos ambientais a eles associados (Anunay *et al.*, 2016; Khandelwal *et al.*, 2019). Aplicada à gestão de resíduos, a ACV se torna uma ferramenta crucial para diminuir os impactos ambientais ao identificar os efeitos significativos de sistemas de gestão de resíduos ineficientes (Yadav; Samadder, 2014).

1.4.4 ACV em uma unidade de reciclagem

A ACV é uma metodologia de destaque no planejamento de sistemas de gestão de resíduos sólidos urbanos (GRSU). Essa abordagem é particularmente útil para identificar alternativas que evitem ou reduzam os impactos ambientais adversos (Laurent *et al.*, 2014), para examinar estratégias de recuperação de materiais e energia dos resíduos (Giugliano *et al.*, 2011), e para comparar os impactos potenciais das diferentes tecnologias disponíveis para valorização dos resíduos (Khoo, 2009).

Sendo incentivada pela PNRS, sua utilização é essencial na gestão de resíduos, pois permite reduzir impactos ambientais ao identificar problemas significativos de sistemas de gestão ineficientes (Carvalho *et al.*, 2019; Yadav; Samadder, 2014). Dessa forma, sua integração nas atividades das cooperativas de materiais recicláveis oferece várias vantagens, que podem ser divididas em três categorias principais: melhoria ambiental,

eficiência econômica e benefícios sociais.

- **Melhoria Ambiental:** A aplicação da ACV permite que cooperativas identifiquem pontos críticos de impacto ambiental em suas operações, facilitando estratégias de mitigação. Segundo Abd Manaf; Samah; Zukki (2009), essa abordagem avalia os potenciais impactos ambientais de diferentes cenários de tratamento de resíduos. Entre as várias categorias de impacto, as mudanças climáticas se destacam devido a métricas robustas e ao reconhecimento das emissões antropogênicas de CO₂ como um grande desafio (IPCC, 2013; Steffen *et al.*, 2015). Portanto, a ACV é essencial para orientar decisões sobre tecnologias, políticas e abordagens a serem implementadas;
- **Eficiência Econômica:** Práticas que reduzem emissões têm potencial para aumentar a eficiência energética e reduzir custos (Marques; Fuinhas; Tomás, 2019). A modernização do transporte de carga com tecnologias de baixo carbono, por exemplo, pode trazer benefícios econômicos a longo prazo, como economia de combustível e menor custo de manutenção (Matura; Singh; Kumar, 2025). Além disso, governos de diferentes regiões têm adotado medidas mais rigorosas para controlar as emissões de gases poluentes, promovendo incentivos financeiros para isso (Haywood; Jakob, 2023).
- **Benefícios Sociais:** As cooperativas de reciclagem têm um forte componente social, proporcionando emprego e melhorando as condições de vida de muitos trabalhadores (Silva, 2017). A ACV pode contribuir para a promoção da responsabilidade social corporativa, ao garantir que as práticas das cooperativas sejam sustentáveis e que os benefícios sociais sejam quantificados e valorizados. Dessa forma, à medida que mais empresas adotam práticas ecologicamente corretas, a ACV se torna uma ferramenta valiosa tanto para o *marketing* quanto para a gestão (Mandpe, 2022).

Portanto, relacionar cooperativas de reciclagem à metodologia de ACV é essencial para promover práticas mais sustentáveis, melhorar a eficiência operacional e garantir a conformidade com regulamentações ambientais, enquanto se comunica de forma transparente sobre o desempenho ambiental da cooperativa. Na Tabela 1.3 são elencados seis estudos que ilustram a aplicação da ACV em unidades de reciclagem.

Tabela 1.3 Artigos relacionados a aplicações da ACV em unidades de reciclagem.

Título	Autoria e ano	Categoria de impacto	Principais conclusões
<i>Comparing the environmental performance of distributed versus centralized plastic recycling systems: Applying hybrid simulation modeling to life cycle assessment</i>	Kerdlap <i>et al.</i> (2022)	Gestão de resíduos	Utilizando uma modelagem híbrida integrada à ACV, o trabalho mostra que os sistemas distribuídos de reciclagem têm maiores impactos ambientais negativos devido ao uso de veículos comerciais, apesar de reduzirem as distâncias de transporte. Dessa forma, é necessário equilibrar proximidade e eficiência ambiental nas estratégias de reciclagem.
<i>Environmental life cycle cost assessment: Recycling of hard plastic waste collected at Danish recycling centres</i>	Faraca <i>et al.</i> (2019)	Custos envolvidos	Por meio de uma ACV, o estudo avaliou os impactos ambientais e financeiros da reciclagem de uma tonelada de resíduos plásticos rígidos coletados na Dinamarca, comparando três cenários: dois de reciclagem mecânica (simples e avançada) e um de reciclagem por pirólise. O cenário da reciclagem mecânica apresentou os melhores resultados em termos de redução do impacto ambiental, incluindo emissões de GEEs, além de menores custos. A análise também mostrou que a qualidade do plástico reciclado, a eficiência da triagem e os rendimentos técnicos são fatores-chave para alcançar benefícios ambientais e econômicos significativos.
<i>Occupational exposure to hazards and volatile organic compounds in small-scale plastic recycling plants in Thailand by integrating risk and life cycle assessment concepts</i>	Ansar <i>et al.</i> (2021)	Saúde ocupacional	Avalia os riscos à saúde dos trabalhadores expostos a compostos orgânicos voláteis (COVs) e outros perigos em pequenas centros de reciclagem na Tailândia, propondo medidas para melhorar a segurança dos trabalhadores e a sustentabilidade ambiental dos processos de reciclagem. A ACV foi utilizada para analisar como os poluentes químicos liberados no ambiente afetam a saúde humana.
<i>Application of a life cycle assessment for assessing municipal solid waste management systems in Bolivia in an international cooperative framework</i>	Ferronato <i>et al.</i> (2020)	Gestão de resíduos	Realiza uma avaliação dos sistemas de gestão de resíduos sólidos urbanos na Bolívia usando a ACV dentro de um quadro de cooperação internacional. A problemática central é analisar e comparar os impactos ambientais das diferentes estratégias de gestão de resíduos, com o objetivo de identificar práticas mais sustentáveis e eficientes. O estudo enfatiza a importância da colaboração internacional para melhorar a gestão de resíduos e reduzir os impactos ambientais na Bolívia.
<i>Steps towards more environmentally sustainable municipal solid waste management – A life cycle assessment study of São Paulo, Brazil</i>	Liikanen <i>et al.</i> (2018)	Impactos ambientais	A partir da ACV foi possível identificar uma maneira mais eficiente de reduzir os impactos ambientais da gestão de RSU em São Paulo a partir da adoção da digestão anaeróbica dos resíduos orgânicos (previamente separados na origem) e do tratamento mecânico-biológico (MBT) dos resíduos. Entretanto, para isso, é necessário que o combustível gerado a partir dos rejeitos seja destinado à indústria cimenteira em substituição ao uso do carvão.
<i>Life cycle assessment of post-consumer plastics production from waste electrical and electronic equipment (WEEE) treatment residues in a Central European plastics recycling plant</i>	Wäger, Hischier (2015)	Triagem de materiais/ Reciclagem eletrônica	O estudo avalia os impactos ambientais da produção de plásticos reciclados a partir de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos em uma planta de reciclagem na Europa Central. Os resultados da ACV indicaram que a reciclagem é significativamente mais vantajosa do que a incineração ou a produção de plásticos virgens, com impactos até 10 vezes menores em algumas categorias. A abordagem utilizada permite comunicar de forma mais eficaz os benefícios ambientais a diferentes partes interessadas. No entanto, o estudo reconhece limitações, como a falta de dados detalhados sobre substâncias perigosas nos resíduos, apontando a necessidade de mais pesquisas.

CAPÍTULO 2

2. ARTIGO: COOPERATIVAS DE RECICLAGEM SOB A ÓTICA DA AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA (ACV): UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

RESUMO

O aumento desordenado de resíduos sólidos no mundo é uma questão complexa que abrange diversos aspectos ambientais, sociais e econômicos. Em contrapartida, as cooperativas de materiais recicláveis, por meio da coleta seletiva, representam uma abordagem pragmática e eficaz para lidar com esses resíduos, ao mesmo tempo em que promovem a inclusão social e a proteção ambiental. Nesse sentido, um dos possíveis artifícios estratégicos para auxiliar nessa empreitada é a utilização da ACV: metodologia que avalia os impactos ambientais de um produto, processo ou serviço ao longo de todas as etapas do seu ciclo de vida. Portanto, vincular cooperativas de reciclagem a este recurso é fundamental para impulsionar práticas sustentáveis, otimizar operações e cumprir regulamentações ambientais, enquanto se comunica de forma transparente sobre seu desempenho. Dessa forma, o objetivo deste trabalho é conduzir uma revisão sistemática abrangente sobre as interseções entre cooperativas de reciclagem e a ACV, visando entender o panorama atual do conhecimento, identificando lacunas da pesquisa e explorando sinergias entre esses dois campos. A metodologia da pesquisa baseia-se em uma revisão sistemática da literatura, combinando bibliometria e análise de conteúdo. Criou-se, então, um portfólio contendo 54 artigos cujo foco são temas relacionados às cooperativas de reciclagem. Os dados analisados demonstraram que apenas 12% desses trabalhos os relacionam a ACV, sugerindo um campo vasto para futuras pesquisas. O foco central desses artigos resultantes divide-se entre os seguintes temas: emissões de GEEs e outras poluições (29%), triagem de materiais reciclados (29%), custos envolvidos no processo de reciclagem (14%), exposição ocupacional (14%) e gestão dos resíduos (14%). Os resultados reforçam a importância de incentivar pesquisas e ações que promovam o uso da ACV nas cooperativas, contribuindo para práticas mais sustentáveis e aumentando a transparência e a confiabilidade em relação ao seu desempenho ambiental.

Palavras-chave: Sustentabilidade; Economia circular; Coleta seletiva; Resíduos sólidos.

ABSTRACT

The uncontrolled increase in solid waste worldwide is a complex issue that involves multiple environmental, social, and economic dimensions. In contrast, recyclable material cooperatives, through selective collection, offer a practical and effective approach to managing this waste, while also promoting social inclusion and environmental protection. In this context, one strategic tool to support this effort is the use of Life Cycle Assessment (LCA)—a methodology that evaluates the environmental impacts of a product, process, or service throughout all stages of its life cycle. Linking recycling cooperatives to this tool is therefore essential to foster sustainable practices, improve operational efficiency, and ensure compliance with environmental regulations, while enabling transparent communication of their environmental performance. The aim of this study is to conduct a comprehensive systematic review of the intersections between recycling cooperatives and LCA, in order to understand the current state of knowledge, identify research gaps, and explore potential synergies between these two fields. The research methodology is based on a systematic literature review, combining bibliometric and content analysis. A portfolio of 54 articles focused on topics related to recycling cooperatives was compiled. The analysis showed that only 12% of these studies directly address LCA, indicating a wide field for future research. The main topics of these studies are distributed as follows: greenhouse gas emissions and other forms of pollution (29%), sorting of recyclable materials (29%), costs involved in the recycling process (14%), occupational exposure (14%), and waste management (14%). The findings highlight the need to encourage further research and initiatives that promote the use of LCA in cooperatives, supporting the development of more sustainable practices and enhancing transparency and trust in their environmental performance. The results reinforce the importance of encouraging research and actions that promote the use of LCA in cooperatives, contributing to more sustainable practices and enhancing transparency and reliability regarding their environmental performance.

Keywords: Sustainability; Circular economy; Selective collection; Solid waste.

2.1 INTRODUÇÃO

Na sociedade contemporânea, um dos desafios mais significativos é o aumento contínuo do volume de resíduos sólidos. Este problema é exacerbado pela gestão inadequada desses resíduos e pela escassez de locais apropriados e seguros para sua disposição final (Zolnikov *et al.*, 2018). À medida que as populações urbanas crescem e os padrões de consumo se intensificam, a geração de resíduos atinge níveis sem precedentes.

Sob essa ótica, é crescente a preocupação global com a gestão adequada dos resíduos sólidos motivada pela urgência em reduzir os danos ambientais causados pelo descarte inadequado de materiais. Esses resíduos representam uma das principais fontes de impacto nas mudanças climáticas, pois liberam gases de efeito estufa (GEEs) durante seu processo de decomposição, como o metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) e óxido nitroso (N₂O). As mudanças climáticas e o efeito estufa têm impactos indiretos significativos na saúde pública, por meio das transformações nos ecossistemas. Essas mudanças podem prolongar invernos, influenciar a proliferação de vetores e, conseqüentemente, aumentar a incidência de doenças infectocontagiosas (Mesquita *et al.*, 2023).

Nesse contexto, as cooperativas de materiais recicláveis emergem como peças-chaves na busca por soluções eficazes e sustentáveis. Através da coleta seletiva, prática amplamente reconhecida como essencial para minimizar o desperdício e preservar os recursos naturais, tais cooperativas desempenham um papel essencial na cadeia de reciclagem, agregando valor tanto ambiental quanto social. Para isso, muitas vezes, envolvem membros de comunidades locais que, de outra forma, poderiam enfrentar dificuldades econômicas (Dias; Alves, 2008).

Apesar de seu potencial transformador, essas cooperativas enfrentam uma série de desafios significativos. A falta de infraestrutura adequada, a escassez de financiamento e o acesso limitado aos mercados são apenas alguns dos obstáculos enfrentados por essas organizações (Gutberlet, 2016). Além disso, a falta de políticas públicas eficazes e o baixo reconhecimento institucional, muitas vezes, dificultam a sustentabilidade e o crescimento dessas cooperativas.

Por outro lado, emergindo como um artifício estratégico, a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) se mostra como uma metodologia que analisa o impacto ambiental de um produto, processo ou serviço ao longo de todas as etapas do seu ciclo de vida. Esta análise

abrange a produção, transporte, uso e descarte, considerando os recursos naturais utilizados, as emissões de poluentes e os resíduos gerados. Desse modo, a ACV possibilita a mensuração de todos os efeitos ambientais significativos de um sistema ao longo de sua vida útil, visando, dessa maneira, uma abordagem abrangente (Laurent *et al.*, 2014); podendo, inclusive, auxiliar na tomada de decisões mais sustentáveis.

Estabelecer conexões entre estudos que abordam cooperativas de reciclagem e a metodologia de ACV é fundamental para promover a compreensão detalhada do impacto ambiental das operações de reciclagem, orientando a tomada de decisões no gerenciamento de resíduos. Ao aplicar esta metodologia às operações de uma cooperativa de reciclagem, é possível identificar e quantificar os impactos ambientais associados à coleta, triagem, processamento e redistribuição de materiais recicláveis. Isso não apenas fornece uma visão abrangente do desempenho ambiental da cooperativa, mas, também, ajuda a identificar oportunidades de melhoria e otimização em suas operações. Além disso, a ACV pode auxiliar na tomada de decisões informadas, permitindo que as cooperativas priorizem iniciativas que tenham o maior potencial de redução de impacto ambiental.

Nessa perspectiva, realizou-se uma revisão abrangente sobre as interseções entre cooperativas de reciclagem e ACV, com o propósito de compreender o panorama atual do conhecimento nessa área, identificando lacunas de pesquisa e explorando possíveis sinergias entre esses dois campos.

2.2 METODOLOGIA

O estudo foi estruturado em três etapas (Figura 2.1) utilizando a base de dados Scopus, acessada por meio do portal de periódicos CAPES. A Scopus contém artigos e revistas acadêmicas de alto impacto de várias disciplinas e campos, além de ser uma fonte amplamente utilizada de informações de citação no mundo (Wang; Waltman, 2016).

Para tratamento dos dados obtidos, utilizou-se o *software* VOSviewer (Van Eck; Waltman, 2020) que trata-se de uma ferramenta comumente usada em pesquisa científica, especialmente em campos como bibliometria e ciência da informação. A escolha do *software* se deu por tratar-se de um programa de código aberto e que engloba os formatos das principais bases de dados consolidadas academicamente.

tempo quanto ao período inicial da pesquisa. Limitando-se a artigos publicados em inglês e definidos como artigos completos ou de revisão, publicados em periódicos, a seguinte *string* foi utilizada: *TITLE-ABS-KEY (("selective collection" OR "recycling" OR "selective waste collection") AND ("recycling cent*" OR "recycling facility" OR "cooperative" OR "collector*") AND ("LIFE CYCLE" OR "EMISSION*" OR "CARBON FOOTPRINT*" OR "LCA" OR "ENVIRONMENT* IMPACT*"))*.

Visando uma delimitação do número de documentos obtidos, procedeu-se a leitura dos títulos e resumos dos mesmos, conforme a etapa dois. Foi utilizado o gerenciador de referências Mendeley (MENDELEY DESKTOP, 2008), em que foi realizada uma triagem inicial das pesquisas a fim de dissociar temas divergentes. Como resultado dessa triagem e análise do conteúdo dos trabalhos, com base nos critérios previamente estabelecidos, foram excluídos 275 documentos que não tratavam diretamente do tema proposto, totalizando 211 publicações selecionadas para análise.

Posteriormente, dentro da plataforma, foram criadas pastas para agrupar artigos que tratam de temas similares. A classificação dos temas - gestão de resíduos (71), resíduos eletrônicos (55), poluição ambiental (18) e logística reversa (13) - foi realizada a partir de uma análise temática dos 211 artigos selecionados após a triagem, com foco em identificar os principais assuntos abordados nas publicações relacionadas à reciclagem e à sustentabilidade. Para essa categorização, foram considerados os seguintes critérios:

- Objetivo principal do estudo: os artigos foram classificados de acordo com o foco central de suas investigações. Por exemplo, estudos que tratavam da organização, planejamento ou avaliação de políticas públicas e estratégias para manejo de resíduos foram agrupados na categoria gestão de resíduos.
- Tipo de resíduo abordado: os trabalhos que analisavam especificamente o tratamento, impacto ou reciclagem de materiais eletrônicos - como baterias, computadores, celulares e eletrodomésticos - foram alocados sob a temática de resíduos eletrônicos, devido à necessidade de tratamento diferenciado por seu potencial tóxico e valor agregado.
- Escopo ambiental do impacto avaliado: artigos que discutiam diretamente os efeitos nocivos ao meio ambiente - como emissão de poluentes, contaminação do solo, da água ou do ar - foram incluídos na categoria de poluição ambiental.
- Foco em sistemas de retorno de produtos e materiais ao ciclo produtivo:

estudos voltados para práticas de logística reversa, como o retorno de embalagens, eletrônicos ou outros resíduos para reaproveitamento pelos fabricantes, foram reunidos nessa categoria específica, dada sua abordagem sistêmica e sua ênfase em economia circular.

A terceira etapa compreendeu o tratamento e análise bibliométrica dos dados resultantes da etapa três. A partir da tabulação dos dados obtidos (autores, filiação, região demográfica, etc), procedeu-se a análise e mapeamento, examinando coautores, cocitações, *links* bibliográficos e redes de co-ocorrência de palavras-chave.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A busca realizada na base de dados Scopus, por meio da *string* definida na metodologia, resultou na detecção de 486 publicações, sendo 453 artigos (93,2%) e 33 revisões (6,8%). Após os procedimentos metodológicos realizados na etapa Leitura e seleção de artigos verificou-se que 54 trabalhos tiveram como foco principal as cooperativas de reciclagem. Os demais abordaram outros temas relevantes, a saber: gestão de resíduos (71), resíduos eletrônicos (55), poluição ambiental (18) e logística reversa (13), conforme ilustrado na Figura 2.2.

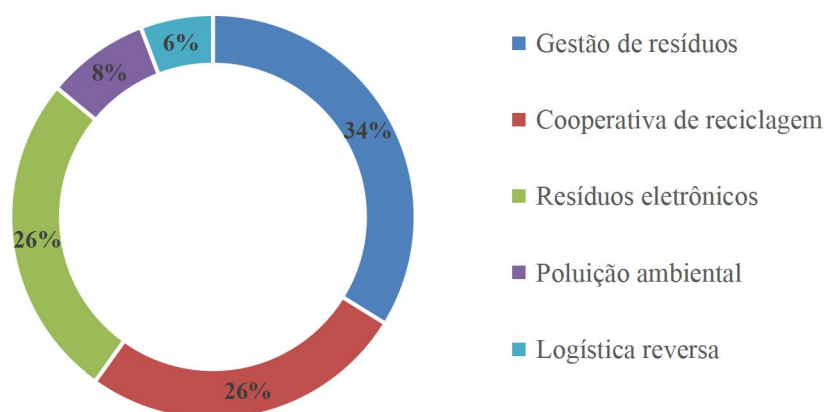


Figura 2.2 Distribuição temática dos artigos analisados.

De acordo com os dados apresentados, observa-se que 34% dos artigos estão relacionados a uma temática mais ampla: gestão de resíduos. Essa significativa parcela

indica uma tendência na literatura científica em direção a esse campo de estudo, refletindo a importância da gestão adequada de resíduos em contextos globais de sustentabilidade e preservação ambiental.

As frações relacionadas às cooperativas de reciclagem e resíduos eletrônicos somam 52% do total, indicando uma priorização significativa nessas áreas. Isso demonstra um compromisso consciente com as atividades de coleta, triagem, processamento e reciclagem de materiais, incluindo resíduos eletrônicos. Esse foco reflete a crescente preocupação com a destinação adequada de equipamentos eletrônicos obsoletos, os quais, frequentemente, contêm materiais tóxicos e poluentes, requerendo abordagens específicas para tratamento e reciclagem (Hanser *et al.*, 2022; Makuza *et al.*, 2021).

A produção de artigos científicos envolvendo os temas destacados apresentou crescimento entre os anos de 1989 a 2023 (Figura 2.3). É observado que as publicações com foco na gestão de resíduos mantêm-se de forma intermitente durante todo o período analisado. Por outro lado, a temática de resíduos eletrônicos ganha destaque nos últimos quatro anos, com um pico de 16 publicações no ano de 2023, revelando um crescente interesse de pesquisas na área. As investigações relacionadas às cooperativas de reciclagem iniciaram-se no final da década de 1990 e progrediram de maneira gradual, com uma expansão mais significativa no ano de 2022, quando foram registradas 10 publicações sobre o tema.

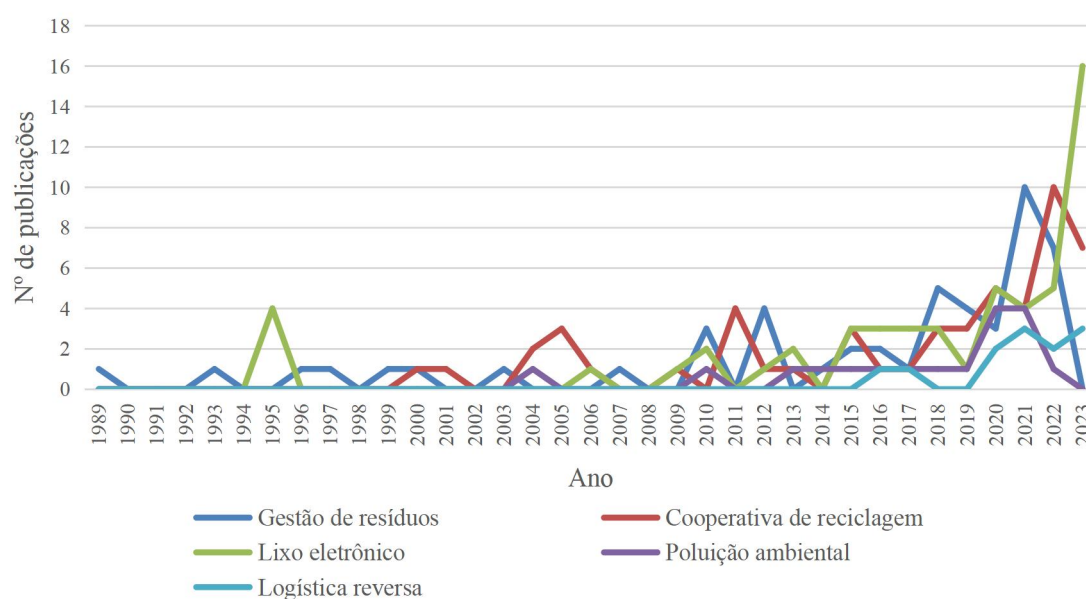


Figura 2.3 Evolução anual da quantidade de publicações, por temática predominante.

Levando em consideração a proposta deste estudo, tem-se, então, um portfólio bibliográfico constituído por 54 artigos focados em pesquisas sobre cooperativas de reciclagem. O periódico *Waste Management* destacou-se em relação ao número de pesquisas relacionadas ao tema, detendo 11 artigos no período de 2004 a 2023. Dentre eles, o mais citado do conjunto é o artigo dos autores suíços Wäger e Hirschier (2015), que contabiliza 113 citações. Outras revistas que também sobressaíram, com três publicações cada, foram: *Waste Management and Research*, *Journal of Cleaner Production*, *Journal of Hazardous Materials*, e *Science of the Total Environment*. O restante dos artigos está vinculado a um único periódico cada.

Quanto à distribuição geográfica dos estudos, os 54 artigos do portfólio são derivados de estudos de 25 países (Figura 2.4). Observa-se que a maioria dos países da América do Sul e da África apresenta pouca ou nenhuma produção, o que indica um menor envolvimento nessas discussões e menos colaborações internacionais sobre o tema. O Reino Unido concentrou o maior número de trabalhos, totalizando seis publicações. Dentre eles, o trabalho mais citado foi o dos pesquisadores Speirs e Tucker (2001), com 27 citações. Na sequência, com quatro publicações cada, estão os países: Brasil, China e Estados Unidos. A publicação com o maior número de citações é o do autor Chi *et al.* (2011), de origem australiana, possuindo 439 citações.

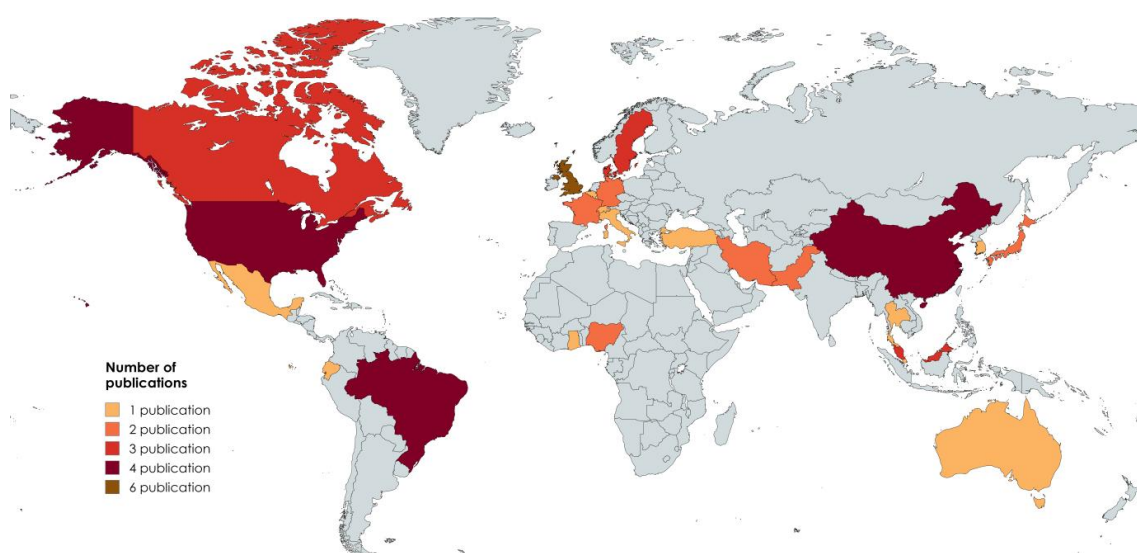


Figura 2.4 Número de publicações sobre cooperativas de reciclagem por países.

De acordo com o mapeamento realizado no VOSviewer (VOSviewer, Versão 1.6.20, Elsevier, 2023), observa-se que a palavra-chave com maior destaque é “*recycling*”,

situada próxima de palavras proporcionalmente frequentes: “*waste disposal*”, “*waste mangement*” e “*environmental impact*”, indicando a ligação indissociável das cooperativas com a gestão de resíduos sólidos e, simultaneamente, com as questões ambientais (Figura 2.5). Segundo Mesquita *et al.* (2023), após a avaliação do impacto da reciclagem na redução das emissões de GEEs, através de uma cooperativa de catadores, verificou-se sua significativa contribuição na redução dos gases e na economia de energia.

A frequente ocorrência das palavras “*risk assessment*”, “*occupational risks*” e “*occupational exposure*” demonstram a preocupação no desenvolvimento de estudos relacionados à saúde e bem-estar dos catadores de materiais reciclados. Segundo pesquisadores, as atividades de coleta estão associadas a uma série de exposições perigosas (através do contato com metais pesados, materiais cortantes e infectados), podendo resultar em doenças respiratórias, infecções oculares, problemas estomacais, febre tifoide, diarreia, distúrbios musculoesqueléticos, efeitos carcinogênicos e outras doenças, acidentes, mutilações e até mortes (Gutberlet; Baeder, 2008; Mol *et al.*, 2017; Chokhandre; Singh; Kashyap, 2017; Jayakrishnan; Jeeja; Bhaskar, 2013).

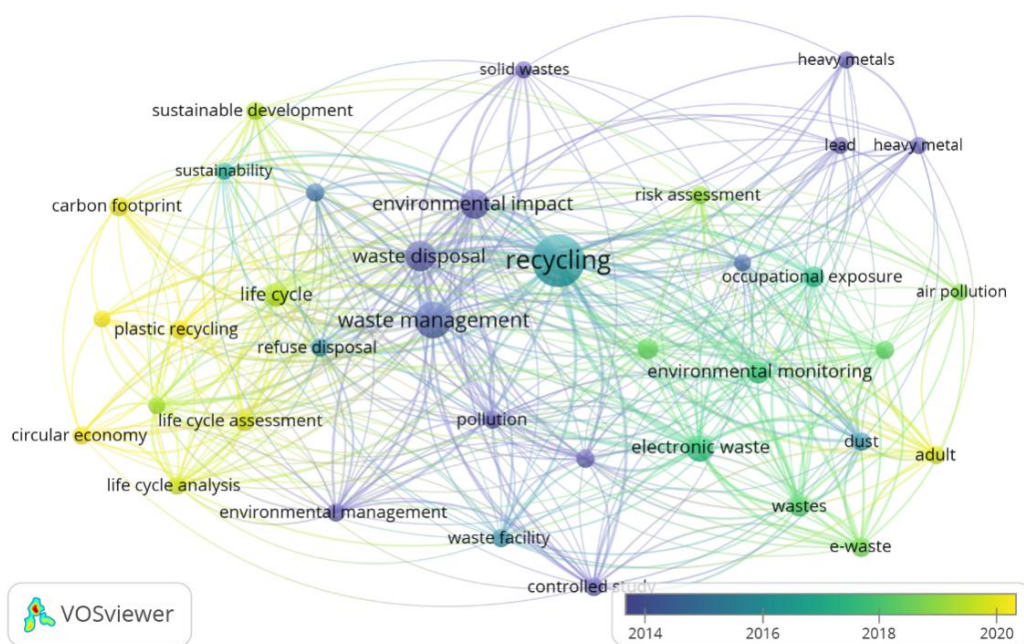


Figura 2.5 Co-ocorrência de palavras-chave.

Fonte: VOSviewer (2024).

É importante destacar que, em 2010, foi promulgada a Política Nacional de Resíduos Sólidos no Brasil, estabelecida pela Lei nº 12.305/10 (Brasil, 2010), que visa

incorporar os catadores como peças fundamentais na gestão sustentável de resíduos. Isso proporciona reconhecimento, inclusão social e econômica, valoriza o trabalho desses profissionais e contribui, de forma significativa, para a preservação do meio ambiente.

É observado, também, através do cluster amarelo, na Figura 2.5, alguns termos utilizados em publicações mais recentes, ganhando destaque nos últimos quatro anos, como: “*life cycle analysis*”, “*cycle assessment*” e “*circular economy*”. Enquanto a ACV se mostra como uma ferramenta crucial na gestão ambiental, permitindo uma avaliação abrangente e sistemática dos impactos ambientais associados a um produto, processo ou atividade; a economia circular propõe um contexto estratégico para promover a sustentabilidade por meio da gestão eficiente dos recursos. Relacionar esses termos a estudos sobre cooperativas de reciclagem pode indicar que estão sendo cada vez mais incorporados às maneiras como as empresas operam, como os governos fazem políticas e, até mesmo, como os pesquisadores direcionam seus estudos.

Termos como “*waste*” e “*eletronic waste*” também ganharam destaque. Nessa temática, Hanser *et al.* (2022) indicaram que, na França, aproximadamente 1.500 milhões de baterias foram comercializadas em 2019, representando 273 mil toneladas de material eletrônico a ser descartado. O estudo do impacto das atividades de desmantelamento e reciclagem de lixo eletrônico na contaminação por retardadores de chama bromados (BFR) tem sido realizado em várias regiões da Ásia e da África, com destaque para a China, que é a área mais amplamente pesquisada nesse contexto (Ma *et al.*, 2021; Ma *et al.*, 2022).

Ainda dentro do portfólio analisado, é evidente a preocupação em destacar algumas questões relacionadas à infraestrutura física das cooperativas. Na Suécia, os pesquisadores Sundin *et al.* (2011) listam uma variedade de problemas, como: filas de visitantes, sobrecarga de material e triagem inadequada. Por outro lado, no Paquistão, não existem instalações formais de reciclagem e o processo ocorre informalmente, sem quaisquer orientações ou medidas de segurança. (Iqbal *et al.*, 2017; Umair; Anderberg; Potting, 2016). A abordagem dos autores sobre as questões relacionadas às instalações das cooperativas de reciclagem, além de custos associados, condições de trabalho de catadores e impacto das atividades relacionadas, está detalhada na Figura 2.6.

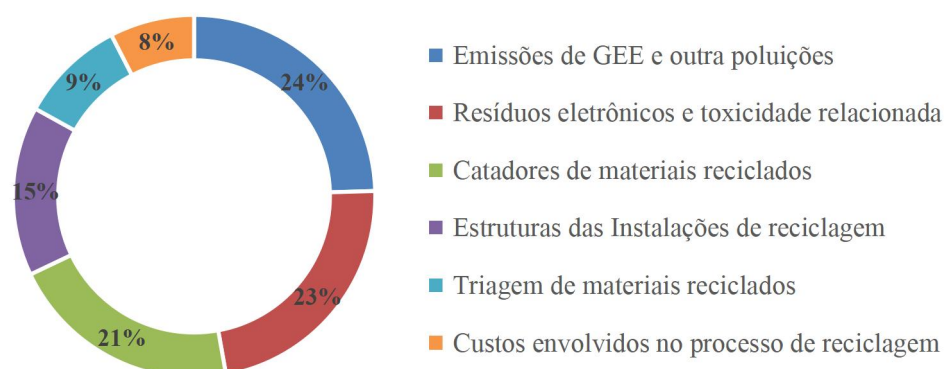


Figura 2.6 Distribuição percentual das abordagens relacionadas as cooperativa de reciclagem.

Ao identificar as emissões de GEEs como uma área prioritária de investigação e intervenção, verifica-se que os autores estão reconhecendo a necessidade de abordar medidas para minimizar este impacto ambiental através das atividades de reciclagem. Ainda dentro dessa parcela, alguns pesquisadores tratam de outras formas de poluição ambiental. Por exemplo, Kerdlap *et al.* (2022), ao comparar sistemas de reciclagem de plásticos, expõem alguns impactos nas alterações climáticas. Por outro lado, Symanski *et al.* (2023) tratam de um plano de ação para reduzir emissões de aerossóis metálicos provenientes de instalações de reciclagem de metais.

Vinte e três por cento das publicações relacionam cooperativas de reciclagem a resíduos eletrônicos, validando a urgência em tratar dessa demanda crescente, especialmente no que diz respeito à gestão adequada dos materiais tóxicos e perigosos presentes, a exemplo do chumbo, cobre, cobalto, bário, arsênico, cádmio, cromo, ferro e níquel (Kumari; Yadav, 2023). As porções menos representativas do gráfico estão relacionadas a aspectos internos específicos das cooperativas, abrangendo tópicos como a organização de suas estruturas físicas e *layout*, o processo de triagem de materiais reciclados e custos associados a suas operações.

Os trabalhos que correlacionam cooperativas de reciclagem e a metodologia de ACV foram compilados na Tabela 2.1. Os sete artigos representam apenas 12% dos trabalhos que foram publicados no período de 2015 a 2022. Essa escassez pode indicar que a utilização da abordagem da ACV ainda não foi amplamente investigada, e, consequentemente, a conscientização sobre sua importância e seus benefícios. Vale

salientar que, ao utilizar essas ferramentas, as cooperativas de reciclagem podem identificar áreas para aprimorar sua eficiência, além de diminuir impactos ambientais adversos. Isso pode resultar na melhoria da logística de coleta, na adoção de tecnologias mais eficientes em termos de energia e água, e na minimização do desperdício durante o processo de reciclagem.

Tabela 2.1 Artigos sobre cooperativa de reciclagem relacionados à ACV.

Autoria e ano	Título	Periódico	Abordagem
Kerdlap <i>et al.</i> , 2022	<i>Comparing the environmental performance of distributed versus centralized plastic recycling systems: Applying hybrid simulation modeling to life cycle assessment</i>	<i>Journal of Industrial Ecology</i>	Impactos ambientais
Ansar <i>et al.</i> , 2021	<i>Occupational exposure to hazards and volatile organic compounds in small-scale plastic recycling plants in Thailand by integrating risk and life cycle assessment concepts</i>	<i>Journal of Cleaner Production</i>	Exposição ocupacional de catadores
Ferronato <i>et al.</i> , 2020	<i>Application of a life cycle assessment for assessing municipal solid waste management systems in Bolivia in an international cooperative framework</i>	<i>Waste Management and Research</i>	Gestão de resíduos
Rojas <i>et al.</i> , 2018	<i>The potential benefits of introducing informal recyclers and organic waste recovery to a current waste management system: The case study of Santiago de Chile</i>	<i>Resources</i>	Impactos ambientais
Faraca <i>et al.</i> , 2019	<i>Combustible waste collected at Danish recycling centres: Characterisation, recycling potentials and contribution to environmental savings</i>	<i>Waste Management</i>	Triagem de materiais reciclados
Faraca; Martinez-Sanchez; Astrup, 2019	<i>Environmental life cycle cost assessment: Recycling of hard plastic waste collected at Danish recycling centres</i>	<i>Resources, Conservation and Recycling</i>	Custos envolvidos
Wäger; Hirschier <i>et al.</i> , 2015	<i>Life cycle assessment of post-consumer plastics production from waste electrical and electronic equipment (WEEE) treatment residues in a Central European plastics recycling plant</i>	<i>Science of the Total Environment</i>	Triagem de materiais reciclados

Dos artigos listados na Tabela 2.1, o trabalho com maior relevância, de acordo com o número de citações, é conferido aos suíços Wäger e Hirschier (2015), que detiveram 113 citações. O artigo emprega a abordagem da ACV para estimar os efeitos ambientais ligados ao processo de reciclagem de resíduos eletrônicos triturados, que contêm uma quantidade significativa de plásticos, provenientes das operações de tratamento de resíduos de

equipamentos elétricos e eletrônico. Destacam-se, também, os autores dinamarqueses Faraca *et al.*, (2019) que, através de dois artigos publicados no mesmo ano (um deles em coautoria com Martinez-Sanchez e Astrup) conduziram estudos sobre a triagem de resíduos e custos envolvidos, utilizando o método da ACV.

Observa-se que a utilização da ACV abrange diversos aspectos relacionados às cooperativas de reciclagem, com ênfase na triagem de materiais reciclados e impactos ambientais (dois artigos cada), além de custos envolvidos, exposição ocupacional de catadores e gestão de resíduos (um artigo cada). Sobre os impactos ambientais, Rojas *et al.* (2018) tratam da análise dos efeitos ambientais de diferentes opções viáveis para a coleta, tratamento e recuperação de resíduos sólidos urbanos usando a ACV. Enquanto Kerdlap *et al.* (2022), ao se utilizarem dessa abordagem, destacam os efeitos ambientais dos sistemas de reciclagem de plástico, como as mudanças climáticas e a ecotoxicidade do solo.

Segundo Faraca *et al.* (2019), essa metodologia oferece uma abordagem mais abrangente para avaliar como os sistemas de gestão de resíduos impactam o meio ambiente. Dessa forma, fornece uma base sólida para a tomada de decisões, permitindo uma compreensão mais profunda do desempenho ambiental e das consequências de diferentes abordagens de gestão de resíduos.

Embora ainda pouco aplicada - presente em apenas 12% dos estudos revisados - a ACV vem sendo integrada às políticas públicas, assumindo funções específicas conforme o contexto nacional. Na Alemanha, serve de base para definir cotas obrigatórias de reuso e reciclagem; na França, orienta certificações ambientais, aplicáveis a todos os produtos industrializados; já no México, no Peru e no Chile, sua adoção é exigida pela legislação voltada aos biocombustíveis (Coelho Filho; Saccaro Junior; Luedemann, 2016).

Os dados apresentados mostram que o uso da ACV pode trazer ganhos relevantes para o desempenho ambiental e operacional das cooperativas de reciclagem. Essa ferramenta permite identificar falhas nos processos, como o uso excessivo de recursos e a geração de resíduos, além de apontar caminhos para melhorar a logística, economizar água e energia e adotar tecnologias mais eficientes. Com isso, a ACV também pode ser uma ferramenta útil para comunicar os esforços de sustentabilidade das cooperativas de reciclagem aos *stakeholders*, como clientes, parceiros comerciais e órgãos reguladores. A transparência em relação aos impactos ambientais e às práticas de gestão pode aumentar a confiança e a credibilidade da cooperativa na comunidade.

Os exemplos analisados mostram que a combinação entre cooperativas e

ferramentas como a ACV favorece uma gestão mais estratégica e alinhada com os princípios da sustentabilidade. Além disso, reforçam a necessidade de políticas públicas que promovam o fortalecimento dessas organizações por meio de melhores estruturas, apoio técnico e reconhecimento do seu papel na economia circular.

2.4 CONCLUSÃO

Por meio da revisão bibliométrica acerca do mapeamento da literatura sobre as cooperativas de reciclagem e sua conexão com a metodologia de ACV, foi possível identificar que há poucos trabalhos relacionando os termos. Apenas 12% dos artigos identificados pela revisão conectam essas duas temáticas. Essa carência revela uma lacuna pouco explorada, além da falta de conscientização sobre esta metodologia e sua relevância para as cooperativas de reciclagem.

No entanto, apesar dos desafios, é importante reconhecer o potencial significativo que uma abordagem de ACV pode oferecer às cooperativas de reciclagem. Ao destacar os benefícios desta abordagem em termos de melhorias na eficiência operacional, redução de impactos ambientais e comunicação transparente, pode-se esperar um aumento no interesse e na pesquisa sobre esse tema no futuro. Isso pode ser alcançado por meio da disseminação de estudos que evidenciem a importância da ACV, bem como de incentivos e apoio para que as cooperativas de reciclagem apliquem essa metodologia em suas operações.

Dessa forma, estabelecer uma conexão entre cooperativas de reciclagem e a metodologia de avaliação do ciclo de vida é crucial para impulsionar a adoção de práticas mais sustentáveis, aprimorar a eficiência operacional e assegurar a conformidade com as normas ambientais. Além disso, essa abordagem incentiva a comunicação sobre o desempenho ambiental do grupo, fortalecendo a confiança e o comprometimento com a proteção ambiental.

2.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSAR, Muhammed Ayaj *et al.* Occupational exposure to hazards and volatile organic compounds in small-scale plastic recycling plants in Thailand by integrating risk and life cycle assessment concepts. **Journal of Cleaner Production**, v. 329, p. 129582, 2021.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 03

mai. 2024.

CHI, Xinwen *et al.* Informal electronic waste recycling: A sector review with special focus on China. **Waste management**, v. 31, n. 4, p. 731-742, 2011.

CHOKHANDRE, Praveen; SINGH, Shrikant; KASHYAP, Gyan Chandra. Prevalence, predictors and economic burden of morbidities among waste-pickers of Mumbai, India: a cross-sectional study. **Journal of occupational medicine and toxicology**, v. 12, p. 1-8, 2017.

COELHO FILHO, Osmar; SACCARO JUNIOR, Nilo Luiz; LUEDEMANN, Gustavo. A avaliação de ciclo de vida como ferramenta para a formulação de políticas públicas no Brasil. Brasília, DF: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – Ipea, 2016. (Texto para Discussão, n. 2205).

DIAS, Sonia Maria; ALVES, Fábio Cidrin Gama. Integration of the informal recycling sector in solid waste management in Brazil. **Study prepared for GTZs sector project “Promotion of concepts for pro-poor and environmentally friendly closed-loop approaches in solid waste management**, 2008.

FARACA, Giorgia *et al.* Combustible waste collected at Danish recycling centres: Characterisation, recycling potentials and contribution to environmental savings. **Waste management**, v. 89, p. 354-365, 2019.

FARACA, Giorgia; MARTINEZ-SANCHEZ, Veronica; ASTRUP, Thomas F. Environmental life cycle cost assessment: Recycling of hard plastic waste collected at Danish recycling centres. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 143, p. 299-309, 2019.

FERRONATO, Navarro *et al.* Application of a life cycle assessment for assessing municipal solid waste management systems in Bolivia in an international cooperative framework. **Waste Management & Research**, v. 38, n. 1, p. 98-116, 2020.

GUTBERLET, Jutta; BAEDER, Angela M. Informal recycling and occupational health in Santo André, Brazil. **International journal of environmental health research**, v. 18, n. 1, p. 1-15, 2008.

GUTBERLET, Jutta. **Recovering resources-recycling citizenship: Urban poverty reduction in Latin America**. Routledge, 2016.

HANSER, Ogier *et al.* Occupational exposure to metals among battery recyclers in France: biomonitoring and external dose measurements. **Waste Management**, v. 150, p. 122-130, 2022.

IQBAL, Mehreen *et al.* E-waste driven pollution in Pakistan: the first evidence of environmental and human exposure to flame retardants (FRs) in Karachi City. **Environmental science & technology**, v. 51, n. 23, p. 13895-13905, 2017.

JAYAKRISHNAN, Thayyil; JEEJA, Mathummal Cherumanalil; BHASKAR, Rao.

Occupational health problems of municipal solid waste management workers in India. **International Journal of Environmental Health Engineering**, v. 2, n. 1, p. 42, 2013.

KERDLAP, Piya *et al.* Comparing the environmental performance of distributed versus centralized plastic recycling systems: applying hybrid simulation modeling to life cycle assessment. **Journal of Industrial Ecology**, v. 26, n. 1, p. 252-271, 2022.

KUMARI, Hina; YADAV, Sudesh. A comparative study on metal pollution from surface dust of informal and formal e-waste recycling sectors in national capital region of New Delhi and associated risk assessment. **Science of The Total Environment**, v. 904, p. 166791, 2023.

LAURENT, Alexis *et al.* Review of LCA studies of solid waste management systems–Part II: Methodological guidance for a better practice. **Waste management**, v. 34, n. 3, p. 589-606, 2014.

MA, Yulong *et al.* Formal waste treatment facilities as a source of halogenated flame retardants and organophosphate esters to the environment: A critical review with particular focus on outdoor air and soil. **Science of the Total Environment**, v. 807, p. 150747, 2022.

MA, Yulong *et al.* Human exposure to halogenated and organophosphate flame retardants through informal e-waste handling activities-A critical review. **Environmental Pollution**, v. 268, p. 115727, 2021.

MAKUZA, Brian *et al.* Pyrometallurgical options for recycling spent lithium-ion batteries: A comprehensive review. **Journal of Power Sources**, v. 491, p. 229622, 2021.

MENDELEY DESKTOP. [s.l.]: Mendeley Ltd., 2008. Disponível em: <https://www.mendeley.com>. Acesso em: 13 jun. 2024.

MESQUITA, Julia Luz Camargos *et al.* Greenhouse Gas Emission Reduction Based on Social Recycling: A Case Study with Waste Picker Cooperatives in Brasília, Brazil. **Sustainability**, v. 15, n. 12, p. 9185, 2023.

MOL, Marcos PG *et al.* Assessment of work-related accidents associated with waste handling in Belo Horizonte (Brazil). **Waste Management & Research**, v. 35, n. 10, p. 1084-1092, 2017.

ROJAS C, Ailyn *et al.* The potential benefits of introducing informal recyclers and organic waste recovery to a current waste management system: The case study of Santiago de Chile. **Resources**, v. 7, n. 1, p. 18, 2018.

SPEIRS, D.; TUCKER, P. A profile of recyclers making special trips to recycle. **Journal of Environmental Management**, v. 62, n. 2, p. 201-220, 2001.

SUNDIN, Erik *et al.* Improving the layout of recycling centres by use of lean production principles. **Waste Management**, v. 31, n. 6, p. 1121-1132, 2011.

SYMANSKI, Elaine *et al.* Data to action: community-based participatory research to address concerns about metal air pollution in overburdened neighborhoods near metal recycling facilities in Houston. **Environmental Health Perspectives**, v. 131, n. 6, p. 067006, 2023.

UMAIR, Shakila; ANDERBERG, Stefan; POTTING, José. Informal electronic waste recycling in Pakistan. **The Journal of Solid Waste Technology and Management**, v. 42, n. 3, p. 222-235, 2016.

VAN ECK, Nees Jan; WALTMAN, Ludo. VOSviewer manual: Manual for VOSviewer version 1.6. 15. Leiden: Centre for Science and Technology Studies (CWTS) of Leiden University, 2020.

WÄGER, Patrick A.; HISCHIER, Roland. Life cycle assessment of post-consumer plastics production from waste electrical and electronic equipment (WEEE) treatment residues in a Central European plastics recycling plant. **Science of the Total Environment**, v. 529, p. 158-167, 2015.

WANG, Q.; WALTMAN, L. Large-scale analysis of the accuracy of the journal classification systems of Web of Science and Scopus. **Journal of Informetrics**, v. 10, n. 2, p. 347–364, 2016.

ZOLNIKOV, Tara Rava *et al.* Ineffective waste site closures in Brazil: A systematic review on continuing health conditions and occupational hazards of waste collectors. **Waste management**, v. 80, p. 26-39, 2018.

CAPÍTULO 3

3. ARTIGO: PEGADA DE CARBONO DO PROCESSO DE COLETA, PROCESSAMENTO E DESTINAÇÃO DE RESÍDUOS DA COOPERATIVA DE RECICLAGEM ITAMARE

RESUMO

O propósito desse trabalho foi analisar os procedimentos operacionais da cooperativa de materiais recicláveis Itamare e quantificar os gases de efeito estufa (GEEs) emitidos, considerando os processos de coleta, processamento e transporte dos resíduos destinados às empresas de beneficiamento. Para isso, recoreu-se a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), seguindo as diretrizes estabelecidas pela norma ISO 14040 (2006). A investigação baseou-se em dados primários coletados por meio de manuais, faturas e entrevistas técnicas realizadas com os gestores e operadores da cooperativa. Os resultados indicaram que o processo de transporte de resíduos representa a principal fonte emissora de GEEs, sendo responsável por mais de 99% das emissões totais, que somam aproximadamente 194,9 t CO₂-eq por mês. Identificou-se uma emissão média de 1,29 t CO₂-eq por tonelada de resíduo coletada. A etapa de processamento, que envolve o uso de energia elétrica e água, apresentou impacto ambiental significativamente menor comparado ao transporte, devido à carga transportada e a distância percorrida que potencializam a queima de combustível fóssil. Esse cenário aponta para a necessidade de direcionar estratégias de mitigação, especialmente para a etapa do transporte de resíduos, com vistas à redução das emissões e ao avanço em direção a uma possível descarbonização.

Palavras-chave: Logística reversa; Resíduos sólidos; Economia circular; Transporte de resíduos.

ABSTRACT

The purpose of this study was to analyze the operational procedures of the Itamare recyclable materials cooperative and to quantify the greenhouse gas (GHG) emissions associated with the collection, processing, and transportation of waste destined for processing companies. To achieve this, a Life Cycle Assessment (LCA) was conducted,

following the guidelines established by ISO 14040 (2006). The investigation was based on primary data collected through manuals, invoices, and technical interviews with the cooperative's managers and operators. The results indicated that the transportation of waste is the main source of GHG emissions, accounting for over 99% of the total emissions, which amount to approximately 204.34 tons of CO₂-equivalent per month. An average emission of 1.46 tons of CO₂-equivalent was identified per ton of waste collected. The processing stage, which involves the use of electricity and water, showed a significantly lower environmental impact compared to transportation, due to the volume transported and the distance covered, which intensify fossil fuel combustion. This scenario highlights the need to focus mitigation strategies particularly on the waste transportation stage, aiming to reduce emissions and move toward potential decarbonization.

Keywords: Reverse logistics; Solid waste; Circular economy; Waste transportation.

3.1 INTRODUÇÃO

O crescimento recente na produção mundial de resíduos foi impulsionado principalmente pelo aumento populacional, a industrialização e a expansão econômica (Chien *et al.*, 2023). Projeções realizadas pela Conferência das Nações Unidas sobre Comércio e Desenvolvimento (UNCTAD) mostram que essa tendência permanecerá, com a previsão que a população mundial ultrapasse 9,8 bilhões de pessoas em 2050, juntamente com o crescimento de economias emergentes na Ásia Oriental, América Latina e África (UNCTAD, 2020). Como resultado, de acordo com o relatório do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente - UNEP (2024), estima-se que a quantidade de resíduos sólidos urbanos produzidos mundialmente deve crescer de 2,1 bilhões de toneladas em 2023 para aproximadamente 3,8 bilhões de toneladas até o ano de 2050.

No Brasil, o descarte inadequado de resíduos representa uma séria ameaça ambiental e de saúde pública. Apenas em 2022, mais de 82 milhões de toneladas de resíduos urbanos foram produzidas no país (ABRELPE, 2022). Desses, 40,5 % foram dispostos de forma inadequada por 3.001 municípios, contabilizando 29,5 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos descartados em lixões ou aterros controlados (ABRELPE, 2022). Esses locais, em sua grande maioria, não disponibilizam de sistemas e medidas para a preservação da saúde pública e do meio ambiente (De Almeida *et al.*, 2021).

Inúmeros processos relacionados à produção e manipulação de resíduos sólidos urbanos (RSU) resultam na emissão de gases de efeito estufa (GEEs, também referidos como pegada de carbono), que intensificam o efeito estufa (King; Gutberlet, 2013). A pegada de carbono agrupa os GEEs em uma métrica comum (CO₂-eq), sendo os principais GEEs: metano, dióxido de carbono e óxido nitroso (Gautam; Agrawal, 2020; Wünsch; Kocina, 2019). Associados às mudanças climáticas, os GEEs têm um potencial devastador sob a saúde pública, na medida em que alteram os ecossistemas, prolongam estações e influenciam a proliferação de vetores, podendo aumentar a incidência de doenças infecciosas e o agravamento de enfermidades crônicas (Ebi; Hess, 2020).

Diante dessas reações desencadeadas pelo descarte inadequado de RSU, as cooperativas de reciclagem se mostram como fundamentais no processo de reprocessamento de resíduos, promovendo a circularidade (Gutberlet *et al.*, 2017). Ou seja, ao alterarem o fluxo linear tradicional, as cooperativas direcionam os resíduos dentro do conceito de economia circular. Esta abordagem adota o princípio do berço ao berço,

permitindo que produtos e materiais descartados sejam reintegrados ao processo produtivo (Kirchherr; Reike; Hekkert, 2017).

As cooperativas são idealizadas como um meio para valorizar produtos recicláveis e aumentar a renda dos trabalhadores catadores (Silva, 2017). No entanto, essas prestadoras de serviços se utilizam, muitas vezes, de formas de transporte e processamento de resíduos que liberam GEEs ao utilizarem veículos e máquinas movidas à combustíveis fósseis. Para reduzir o impacto gerado durante esse processo, é essencial identificar onde ocorrem essas emissões e entender seu real potencial de nocividade. Neste contexto, existem técnicas de gestão ambiental eficazes que possibilitam uma visão abrangente sobre os potenciais impactos presentes desde a extração da matéria-prima até a disposição final de um produto, oferecendo benefícios além daqueles inerentes ao campo ambiental (Finnveden *et al.*, 2009).

A lei da PNRS (Brasil, 2010) também traz como um dos seus objetivos o estímulo à implementação da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Esse método é largamente empregado para a identificação e minimização dos impactos ambientais (Carvalho *et al.*, 2019), avaliando os problemas mais relevantes associados a escolha de diferentes alternativas de tratamento para os resíduos gerados (Nóbrega *et al.*, 2019). No cenário de gestão de resíduos, a ACV é uma ferramenta crucial para diminuição de impactos ambientais ao identificar efeitos relevantes, por exemplo, de sistemas ineficientes de resíduos (Araújo; Souza; Carvalho, 2024).

No contexto das cooperativas de reciclagem, diferentes autores têm descrito abordagens baseadas na aplicação da ACV, que apresenta diversas possibilidades de uso. Liikanen *et al.* (2018) identificaram uma forma mais eficaz de mitigar os impactos ambientais da gestão de RSU em São Paulo a partir da adoção da digestão anaeróbica dos resíduos orgânicos previamente separados na origem, aliada ao tratamento mecânico-biológico (MBT). Em outra perspectiva, Faraca *et al.* (2019) analisaram os impactos ambientais e econômicos da reciclagem de uma tonelada de resíduos plásticos rígidos coletados na Dinamarca, comparando três cenários distintos: dois de reciclagem mecânica (convencional e avançada) e um de reciclagem por pirólise. Além disso, outros estudos têm aplicado a ACV em diferentes enfoques, como a gestão de resíduos, a saúde ocupacional de catadores e os processos de triagem de materiais (Kerdlap *et al.*, 2022; Ansar *et al.*, 2021; Wäger; Hischier, 2015).

Considerando a importância de quantificar as emissões de GEEs associadas às

cooperativas de reciclagem, esse trabalho tem um duplo propósito. O primeiro é analisar os procedimentos associados ao funcionamento da cooperativa de catadores de material reciclável Itamare, localizada no município de Itabaiana (Paraíba, Brasil). O segundo é quantificar as emissões de GEEs por meio da metodologia da ACV, considerando os processos de coleta, processamento e transporte dos resíduos destinados às empresas de beneficiamento.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Caracterização da área estudada

A pesquisa tem como objeto de estudo a cooperativa de catadores de material reciclável, Itamare (Figura 3.1), situada na área rural de Granja Esperança, Rodovia PB 066, Itabaiana. Fundada em 2010, a Itamare é uma sociedade cooperativa limitada, sem fins lucrativos, que recolhe materiais recicláveis de diversos municípios da região metropolitana de Itabaiana (FNEM, 2024) e do Tribunal Regional do Trabalho (TRT) da 13ª Região, em João Pessoa (Paraíba).



Figura 3.1 Galpão de triagem da Cooperativa Itamare - Itabaiana (Paraíba).

Fonte: Autor (2024).

A organização social, composta por 12 cooperados, tem sede própria e um conjunto de máquinas e equipamentos destinados à prensagem e trituração de materiais recicláveis, além de um caminhão utilizado no processo de coleta e transporte. Com isso, a cooperativa

atende alguns municípios situados na região metropolitana de Itabaiana como Ingá, Mogeiro, Salgado de São Félix, Pilar e Juripiranga, conforme destacado em azul na Figura 3.2. A localização da sua sede, dentro do município de Itabaiana, também está identificada por meio de um marcador vermelho.

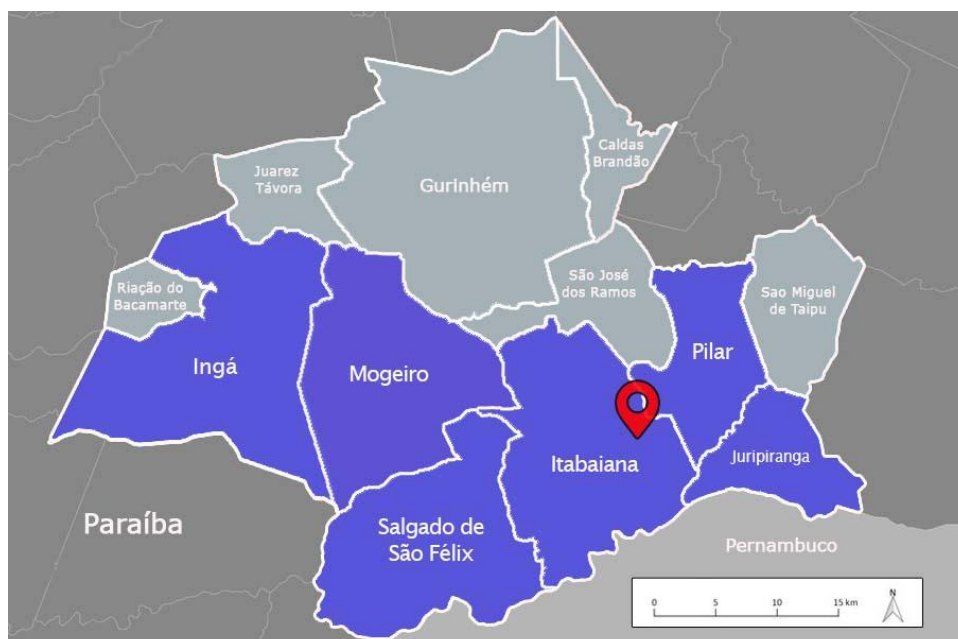


Figura 3.2 Municípios da região metropolitana de Itabaiana atendidos pela cooperativa Itamare (em azul) e localização de sua sede em Itabaiana (marcador vermelho).

Fonte: Adaptado de Fórum Nacional de Entidades Metropolitanas - FNEM (2024).

O município de Itabaiana tem uma população residente de 23.182 pessoas, em uma área de 210,6 km², com uma densidade populacional de 110,09 hab/km² (IBGE, 2022). Além disso, somando-se as cidades circunvizinhas destacadas, a cooperativa realiza, mensalmente, a coleta e transporte dos resíduos recicláveis do Tribunal Regional do Trabalho da 13^a Região, situado na cidade de João Pessoa (Paraíba), que fica a aproximadamente 82,8 km do município de Itabaiana.

3.2.2 Caracterização do processo da coleta seletiva da Itamare

A Figura 3.3 mostra a estrutura do processo da coleta seletiva, que se inicia com o recolhimento de materiais passíveis de reciclagem (papel, plástico e metais ferrosos e não ferrosos) nas residências da cidade de Itabaiana, com o auxílio do caminhão da cooperativa (a). Esse processo se dá no momento anterior a passagem do caminhão da coleta regular.

Nas cidades circunvizinhas o recolhimento de resíduos é realizado semanalmente, com exceção de João Pessoa, que é atendida de forma mensal. Na sequência, os resíduos são transportados ao galpão da Itamare (b), onde passam por uma triagem inicial e são classificados de acordo com o tipo do material. Após o processamento (separação, trituração e compactação), os materiais são vendidos para empresas de beneficiamento de materiais reciclados (c), localizadas nos estados da Paraíba (João Pessoa e Juripiranga) e Pernambuco (Goiana), onde serão beneficiados e vendidos para indústrias responsáveis por processarem a matéria prima (d).

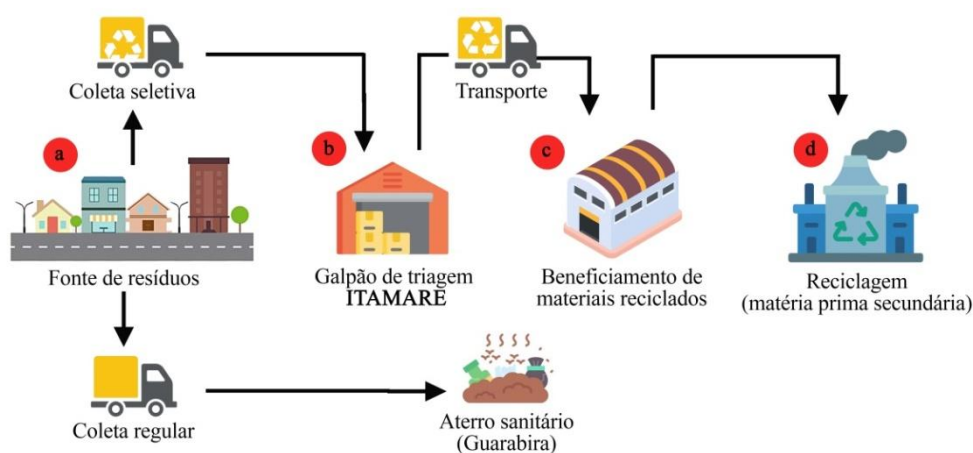


Figura 3.3 Estrutura geral do processo de coleta, processamento e distribuição de resíduos da Cooperativa Itamare.

Recolhendo aproximadamente 150 toneladas de resíduos recicláveis por mês, a Itamare também dispõe do suporte indireto de 20 catadores autônomos, os quais comercializam seus materiais reciclados à cooperativa por um valor dobrado em relação ao que receberiam ao vender para outro intermediário. Estes catadores operam nas cidades próximas ao município de Itabaiana.

3.2.3 Avaliação de Ciclo de Vida

A metodologia empregada na ACV do processo de coleta seletiva da cooperativa Itamare seguiu as diretrizes da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT - ISO 14040 (2014a) e ISO 14044 (2014b), que são as versões traduzidas das normas internacionais da International Organization for Standardization (ISO) 14040 (2006a) e 14044 (2006b).

Segundo as normas, as quatro etapas básicas de uma ACV são: a definição dos objetivos e escopo; a análise do inventário do ciclo de vida (ICV); a avaliação de impactos; e a interpretação dos resultados. Para o escopo (Figura 3.4) foram levadas em consideração as seguintes fases:

- Coleta e transporte dos resíduos recicláveis (das residências das cidades contempladas pela Itamare e também do TRT) até o galpão da Itamare, com auxílio do caminhão da cooperativa;
- Separação dos resíduos no galpão pelos catadores (assim como sua preparação para a comercialização);
- Transporte do material processado referente ao percurso realizado pelo caminhão da Itamare à empresa de beneficiamento.

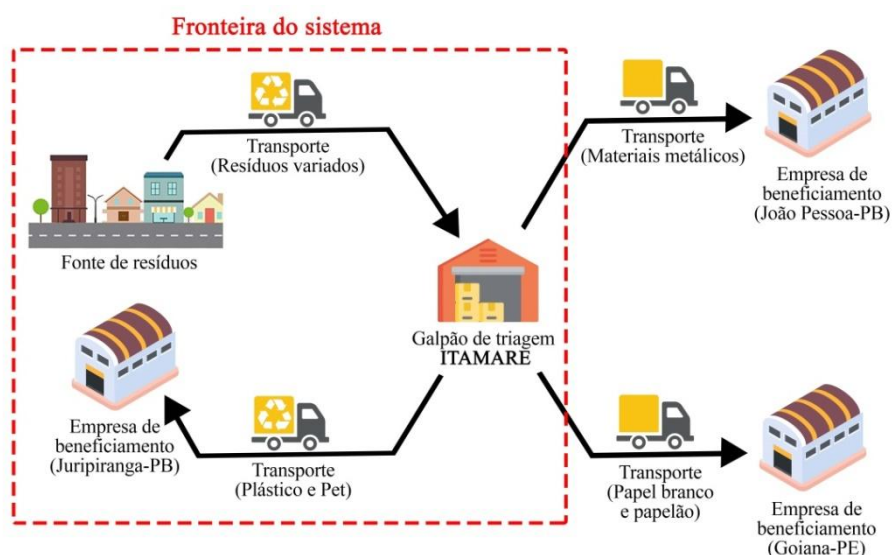


Figura 3.4 Diagrama do escopo da ACV referente às atividades de coleta, processamento e destinação de resíduos da Cooperativa Itamare.

Após a definição das fronteiras do sistema, procedeu-se à elaboração do ICV, que envolve a coleta de dados e a utilização de métodos de cálculo para quantificar as entradas (como energia, água, materiais) e saídas (como GEEs e poluentes) relevantes de um sistema de produto (ISO 14.040, 2014a). A construção do ICV foi baseada na coleta de dados primários por meio de manuais, faturas, aplicativo de geolocalização e consultas técnicas com os gestores e operadores da cooperativa. Dessa forma as informações foram organizadas em quatro categorias principais: coleta de materiais, transporte, processamento

e destinação (Tabela 3.1). Para cada uma, foram registrados parâmetros específicos, como os tipos e origens dos resíduos, municípios atendidos, rotas, consumo de combustível, métodos de processamento e os destinos finais dos materiais recicláveis.

Os dados quantitativos, como consumo de energia elétrica e combustível, foram obtidos a partir de faturas e registros internos da cooperativa. Já as informações qualitativas, como os itinerários e métodos de processamento, foram confirmadas com os responsáveis técnicos e operadores dos equipamentos. A identificação do quantitativo de resíduos coletados pela cooperativa, bem como informações sobre sua destinação para as empresas de beneficiamento foram obtidas juntamente com a administração da Itamare.

A quantificação do consumo de diesel utilizado em todo o processo de coleta e destinação de resíduos foi realizada com base em dados fornecidos pelo setor responsável pelo transporte. Os itinerários realizados compreendem as rotas que abrangem os municípios por proximidade, com exceção de João Pessoa que está localizado em uma direção diferente. Conforme estabelece a Resolução CNPE nº 6/2025 (CNPE, 2025), o diesel vendido no Brasil possui 15% de biodiesel em sua composição.

Para o consumo de eletricidade, considerou-se a metodologia de Carvalho e Delgado (2017) para quantificação das emissões e o mix elétrico brasileiro. Dessa forma, leva-se em conta a composição da matriz elétrica nacional, formada por 62,18% de geração hidrelétrica, 15,32% eólica, 10,60% solar fotovoltaica, 4,38% a gás natural, 3,67% por biomassa, 2,36% nuclear, 1,30% a carvão e 0,19% por óleo combustível, conforme dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2024).

Para realizar a avaliação de impactos e interpretação dos resultados utilizou-se o *software* Simapro 9.6.0.1 (PréSustainability, 2024), que é reconhecido como líder mundial e está em conformidade com as normas ISO 14040 (2006) e ISO 14044 (2006). A base de dados utilizada foi a Ecoinvent (2023) com o método de avaliação de impacto ambiental IPCC 2021 GWP 100a (IPCC, 2021), que agrupa os GEEs em termos de CO₂-eq com base nos relatórios emitidos pelo IPCC. A base de dados Ecoinvent (2023) foi adaptada para contemplar o caso do diesel brasileiro, que contém 15% de biodiesel. Na falta de um processo representativo do diesel na base de dados, modelou-se um processo com base no biodiesel apresentado por Santos (2014).

Na última etapa da ACV, foi realizada a interpretação dos resultados, na qual foram identificadas, quantificadas e analisadas as informações provenientes do ICV e da ACV. Nessa fase, foi possível analisar os principais processos associados à gestão de resíduos da

cooperativa e identificar as etapas que tiveram maior influência na emissão dos GEEs.

Tabela 3.1 Informações coletadas para o ICV da cooperativa Itamare.

CATEGORIA	PARÂMETRO	DESCRIÇÃO	UNIDADE	FONTE DE DADOS
Coleta de materiais	Tipo de material coletado	Papel, plástico e metais (ferrosos e não ferrosos)	-	Itamare
	Origem do material (doméstico, comercial, industrial)	Doméstico e comercial	-	Itamare
	Municípios atendidos	1- Itabaiana, 2- Ingá, 3- Mogeiro, 4- Salgado de S. F., 5- Pilar, 6- Juripiranga, 7- João Pessoa	-	Itamare
	Frequência da coleta	(1) - diário; (2, 3, 4, 5, 6) - semanal; (7) - mensal	-	Itamare
	Qtd. mensal coletada	150	t	Itamare
	Percentual de eficiência do material (quantidade de resíduos coletados que podem ser vendidos):	100	%	Itamare
Transporte	Tipo do transporte	Caminhão VW 8.160 <i>Delivery advantech</i> 2013		Itamare
	Capacidade	5	t	Manual VW
	Itinerários realizados (galpão - cidades - galpão)	I. Itabaiana > Ingá > Mogeiro > Itabaiana II. Itabaiana > Salgado S. F. > Itabaiana III. Itabaiana > Pilar > Juripiranga > Itabaiana IV. Itabaiana > João Pessoa > Itabaiana	-	Itamare
	Distâncias percorridas (média semanal)	1.300	km	Google Maps
	Tipo de combustível	Diesel	-	
	Consumo semanal de combustível	120	l	Itamare
Processamento	Métodos utilizados	Trituração Prensagem	-	
	Tempo e frequência de uso	Triturador forrageiro: 8h/dia Prensa: 8h/dia	h	Itamare
	Potência/ Eficiência	Triturador: 2 CV (1,471 kW) Prensa: 10 CV (7,355 kW)	kW	Manual Hidromiza
	Fonte de alimentação	Energia elétrica (Concessionária)		
	Consumo mensal de energia (galpão)	545,61	kWh	Fatura de luz
	Consumo mensal de água (galpão)	10	m ³	Itamare
Destinação	Outros insumos			
	Destino dos materiais	1- João Pessoa-PB, 2- Goiana-PE, 3- Juripiranga-PB	-	Itamare
	Itinerários realizados	(1,2) - Material recolhido pela empresa contratante (3)- Itabaiana> Juripiranga > Itabaiana		Itamare
	Distância percorrida (média)	(1,2) - Não se aplica (3)- 19,1	km	Google Maps
	Frequência	(1,2) - Não se aplica (3)- 8 vezes por mês	-	Itamare
	Qtd. mensal destinada	(1,2) - Não se aplica (3) - 40	t	Itamare

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da análise do ICV verificou-se, dentro da categoria coleta de materiais, que o volume total de resíduos, coletados mensalmente, é de 150 toneladas, divididos entre papel, plástico e metais (ferrosos e não ferrosos). O transporte é realizado por um caminhão operando em sua capacidade máxima, carregando 5 toneladas por deslocamento. Além disso, o processo apresenta uma eficiência de coleta de 100% em relação aos materiais aptos para comercialização, indicando que todos os resíduos coletados possuem potencial de reciclagem e venda.

Para realizar o transporte dos resíduos, a cooperativa opera um caminhão tipo *Delivery* (Figura 3.5), ano 2013, que percorre uma distância média semanal de 1.300 km. Para isso consome uma média semanal de 120 litros de diesel, abastecido pela prefeitura municipal de Itabaiana.



Figura 3.5 Caminhão tipo *Delivery* utilizado para a coleta de resíduos pela Itamare.

Fonte: Autor (2024).

Durante a etapa de processamento, verificou-se que os equipamentos destinados à trituração e prensagem dos resíduos operam com uma carga horária de 8 horas/dia (Figura 3.6). O consumo energético desses equipamentos está incluído na demanda total de 545,61 kWh registrada junto à concessionária de energia elétrica. Além disso, a cooperativa utiliza mensalmente um volume de 10 m³ de água para suas atividades operacionais.



Figura 3.6 Prensa hidráulica vertical (a) e triturador forrageiro (b) usados no processamento de resíduos da cooperativa Itamare.

Fonte: Autor (2024).

Dentro da categoria destinação de materiais, os resíduos são comercializados para empresas de beneficiamento conforme seu tipo. Os plásticos são transportados pelo caminhão da Itamare para uma unidade de beneficiamento localizada em Juripiranga (Paraíba), totalizando, em média, 40 toneladas por mês. Esse volume é distribuído em oito viagens mensais e foi estimado pelo presidente da cooperativa para períodos regulares, sem festividades que possam aumentar a geração de resíduos. Para o carregamento de todo esse volume o caminhão realiza um percurso total de 152,8 km por mês.

Cerca de 70 toneladas de resíduos metálicos, em sua maioria ferrosos, são comercializadas para uma empresa de beneficiamento localizada em João Pessoa (Paraíba). Entretanto, apesar de serem coletados pela cooperativa Itamare, esses materiais são transportados pela própria empresa compradora, excluindo-se, assim, da fronteira estabelecida para a ACV. Da mesma forma, aproximadamente 40 toneladas de papel recolhidas são destinadas a uma empresa de beneficiamento em Goiana (Pernambuco), que também assume a responsabilidade pelo transporte, permanecendo fora do escopo da ACV (Figura 3.4).

A Tabela 3.2 mostra a especificação das emissões associadas às principais atividades relacionadas ao gerenciamento dos resíduos pela cooperativa.

Tabela 3.2 Emissões de GEEs mensais associadas às principais atividades da cooperativa Itamare.

Categoria	Fontes emissoras	Emissões mensais de GEEs (kg CO₂-eq)	Representatividade das emissões (%)
Coleta de materiais	Transporte dos resíduos até o galpão da Itamare	193.505,00	99,240
Processamento	Consumo de eletricidade	76,39	0,039
Processamento	Consumo de água	6,64	0,003
Destinação de materiais	Transporte dos resíduos até a empresa de beneficiamento	1.399,65	0,718
Total		194.987,68	100,00

A categoria de processamento, que envolve o consumo de eletricidade e água, emite um total de 83,03 kg CO₂-eq/mês. Comparando-se com a fase da coleta de materiais, observa-se que este valor é pouco expressivo, o que indica um impacto reduzido do consumo de energia elétrica e água no total das emissões. Essa grande diferença se dá pela coleta de materiais, onde a carga transportada e a distância percorrida são os principais fatores que potencializam a queima de combustíveis fósseis (diesel), que emite 0,229 kg CO₂-eq por tonelada-quilômetro transportada - este valor foi obtido como resultado da ACV para o processo do diesel brasileiro, que contém 15% de biodiesel. Por outro lado, para o consumo de eletricidade, as emissões são de 0,140 kg CO₂-eq/kWh consumido, e para o consumo de água, as emissões são de 0,664 kg CO₂-eq/ m³ (Figura 3.7).



Figura 3.7 Fatores de emissões de GEEs relacionados às atividades de coleta e processamento da cooperativa Itamare.

Fonte: Construída a partir da base de dados Ecoinvent (2023).

A etapa de destinação de materiais também apresenta uma baixa emissão em comparação à fase da coleta, totalizando 1.399,65 kg CO₂-eq/mês, em razão do menor

volume da carga transportada e da distância percorrida. Considerando que nessa etapa são movidas mensalmente 40 toneladas de plástico, tem-se uma emissão média de 34,99 kg CO₂-eq por tonelada destinada às empresas de beneficiamento. Já para a coleta, considerando a emissão de 193.505,00 kg CO₂-eq/mês (a partir do transporte mensal de 150 toneladas de resíduos diversos), tem-se uma emissão média de 1.290,03 kg CO₂-eq por tonelada coletada.

As emissões totais associadas ao transporte de resíduos, abrangendo as etapas de coleta e destinação, correspondem a 194.904,65 kg CO₂-eq por mês. Com isso, observa-se que o transporte de resíduos é a principal fonte emissora de GEEs da Itamare, revelando onde devem ser priorizadas as estratégias para minimizar as emissões, com vistas a uma possível descarbonização. Essa geração de GEEs se deve, principalmente, ao uso diário de caminhões movidos a combustíveis fósseis, como o diesel, para o transporte de grandes quantidades de resíduos por longas distâncias - prática comum entre organizações do setor e reconhecidamente responsável por grande parte das emissões de GEEs, conforme apontado por Branco *et al.* (2025).

Para reverter esse cenário é essencial adotar uma abordagem integrada, que inclua a implementação de tecnologias de baixa emissão, a transição para combustíveis alternativos e a aplicação de medidas para compensar as emissões residuais (Akimoto *et al.*, 2022; Hossain *et al.*, 2023a; Hossain, 2023b). Pesquisa realizada por Alonso *et al.* (2025) no estado de São Paulo (Brasil) indica que a descarbonização do transporte rodoviário até 2050 dependerá da combinação de diversas soluções tecnológicas, como a eletrificação das frotas, o uso de biocombustíveis, biometano e hidrogênio, aliada a políticas públicas consistentes, incentivos financeiros e à cooperação entre os setores público e privado.

No cenário mundial, o setor de transportes responde por cerca de 22% das emissões totais de GEEs. Esse dado o posiciona como um dos principais responsáveis pela atual crise climática. Dentro desse setor, os veículos de categoria pesada, a exemplo dos caminhões utilizados para o transporte de resíduos, emitem 25% do total de GEEs resultantes de todos os veículos motorizados (EPA, 2024). Assim, o setor de transportes, por ser um dos que mais emitem, se mostra como um grande desafio para o desenvolvimento sustentável (Fan *et al.*, 2023; Ge; Friedrich; Vigna, 2020; Weger; Leitão; Lawrence, 2021).

Diversas razões estão ligadas a essa dificuldade de descarbonização, como a forte dependência de veículos, a rápida ampliação da frota mundial, a grande disponibilidade de

motores a combustão, o preço acessível do petróleo e a falta de alternativas viáveis aos combustíveis fósseis (De Las Nieves Camacho; Jurburg; Tanco, 2022). Diante desse panorama, é fundamental implementar estratégias de curto, médio e longo prazo para reduzir as emissões de CO₂ e mitigar as mudanças climáticas.

3.4 CONCLUSÃO

A partir desse estudo foi possível identificar os procedimentos relacionados ao funcionamento da cooperativa Itamare e quantificar sua pegada de carbono por meio do método da ACV. Foi constatado que o transporte de resíduos é a principal fonte de emissões de GEEs de todo o processo operacional da cooperativa, responsável por mais de 99% do total de GEEs emitidos.

O total mensal de emissões da cooperativa foi de aproximadamente 194,98 t CO₂-eq, dos quais 194,90 t CO₂-eq estão associados ao uso do veículo a diesel para transporte dos resíduos coletados. Considerando a coleta mensal de 150 t de resíduos, foi obtida uma emissão média de 1,29 t CO₂-eq por tonelada de resíduo coletada.

Dessa forma, um cenário planejado a partir de estratégias mitigadoras dessas emissões pode trazer alguns benefícios para a cooperativa como a melhoria da sua imagem institucional e também a conquista de incentivos governamentais. Para isso, a ACV se mostra como essencial, pois possibilita uma melhora contínua na medição, na apresentação e na conferência das emissões de GEEs em toda sua cadeia produtiva.

Dentre as sugestões para trabalhos futuros está a investigação de cenários para a mitigação das emissões, possivelmente com a utilização de biodiesel para substituir o diesel. Além disso, recomenda-se o desenvolvimento de análises econômicas comparativas para avaliar o custo-benefício da adoção de diferentes combustíveis e tecnologias de transporte; a aplicação de análises de sensibilidade para verificar o impacto de variações nos parâmetros operacionais e de consumo; e a exploração de estudos que relacionem essas mudanças a políticas públicas e estratégias de gestão nacional, considerando o papel das cooperativas no cumprimento das metas climáticas e de economia circular do país.

3.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil: 2022**. São Paulo: Abrelpe, dez. 2022. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7758785/mod_resource/content/1/Panorama_Abr_elpe_2022.pdf. Acesso em: 4 jan. 2025.

AKIMOTO, Keigo; SANO, Fuminori; NAKANO, Yuko. Assessment of comprehensive energy systems for achieving carbon neutrality in road transport. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 112, p. 103487, 2022.

ALONSO, Rafael Herrero *et al.* Energy transition and decarbonization of road transportation: A case study of São Paulo's Race to Zero by 2050, Brazil. **Case Studies on Transport Policy**, p. 101365, 2025.

ARAÚJO, Yuri Rommel Vieira; SOUZA, Bartolomeu Israel; CARVALHO, Monica. Greenhouse Gas Emissions Associated with Tree Pruning Residues of Urban Areas of Northeast Brazil. **Resources**, v. 13, n. 9, p. 127, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) (2014). NBR ISO 14040: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2014a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) (2014). NBR ISO 14044: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2014b.

BRANCO, José Eduardo Holler *et al.* Evaluation of the greenhouse gas emissions of the Brazilian biodiesel and the impact of the mandatory blending of the biofuel into commercial diesel fuel. **Chemosphere**, v. 376, p. 144268, 2025.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 03 mai. 2024.

CARVALHO, M. *et al.* Urban pruning waste: carbon footprint associated with energy generation and prospects for clean development mechanisms. **Revista Árvore**, v. 43, p. e430405, 2019.

CARVALHO, M.; DELGADO, D.B.M. Potential of photovoltaic solar energy to reduce the carbon footprint of the Brazilian electricity matrix. **LALCA: Revista Latino-Americana em Avaliação do Ciclo de Vida**, v. 1, n. 1, p. 64-85, 2017.

CHIEN, Chen-Fu *et al.* Solid waste management in emerging economies: Opportunities and challenges for reuse and recycling. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 188, p. 106635, 2023.

Conselho Nacional de Política Energética (CNPE). Resolução nº 6, de 19 de fevereiro de 2025. Estabelece o teor obrigatório de biodiesel no óleo diesel comercializado no território

nacional. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 20 fev. 2025. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-cnpe-n-6-de-19-de-fevereiro-de-2025-541122710>. Acesso em: 6 ago. 2025.

DE ALMEIDA, Ronei; DE SOUZA, Roberta Guimarães; CAMPOS, Juacyara Carbonelli. Lessons and challenges for the recycling sector of Brazil from the pandemic outbreak of COVID-19. **Waste Disposal & Sustainable Energy**, v. 3, n. 2, p. 145-154, 2021.

DE LAS NIEVES CAMACHO, María; JURBURG, Daniel; TANCO, Martín. Hydrogen fuel cell heavy-duty trucks: Review of main research topics. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, n. 68, p. 29505-29525, 2022.

ECOINVENT, 2023. Ecoinvent Database. Disponível em: <https://ecoinvent.org/> acesso em 18 de junho de 2024.

EBI, Kristie L.; HESS, Jeremy J. Health Risks Due To Climate Change: Inequity In Causes And Consequences: Study examines health risks due to climate change. **Health Affairs**, v. 39, n. 12, p. 2056-2062, 2020.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). *Inventory of U.S. greenhouse gas emissions and sinks: 1990-2020*. Disponível em: <https://www.epa.gov/ghgemissions/inventory-us-greenhouse-gas-emissions-and-sinks-1990-2020>. Acesso em: 17 nov. 2024.

FAN, Jianqiang *et al.* A review of transportation carbon emissions research using bibliometric analyses. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 2023.

FINNVEDEN, Göran *et al.* Recent developments in life cycle assessment. **Journal of environmental management**, v. 91, n. 1, p. 1-21, 2009.

FNEM – Fórum Nacional de Entidades Metropolitanas. Disponível em: <https://fnembrasil.org/regiao-metropolitana-de-itabaiana-pb/>. Acesso em: 01 mai. 2024

GAUTAM, Meenu; AGRAWAL, Madhoolika. Greenhouse gas emissions from municipal solid waste management: A review of global scenario. **Carbon footprint case studies: municipal solid waste management, sustainable road transport and carbon sequestration**, p. 123-160, 2020.

GE, Mengpin; FRIEDRICH, Johannes; VIGNA, Leandro. Charts explain greenhouse gas emissions by countries and sectors. **World Resources Institute**, v. 6, p. 2020, 4.

GUTBERLET, Jutta *et al.* Waste picker organizations and their contribution to the circular economy: Two case studies from a global south perspective. **Resources**, v. 6, n. 4, p. 52, 2017.

HOSSAIN, MD Shouquat *et al.* Narrowing fossil fuel consumption in the Indian road transport sector towards reaching carbon neutrality. **Energy Policy**, v. 172, p. 113330, 2023a

HOSSAIN, MD Shouquat *et al.* The role of electric vehicles in decarbonizing India's road passenger toward carbon neutrality and clean air: a state-level analysis. **Energy**, v. 273, p. 127218, 2023b.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades e Estados. IBGE. 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pb/itabaiana.html>. Acesso em: 01 mai. 2024.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO. **ISO 14040:** Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. Geneva, 2006a.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO. **ISO 14044:** Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines, Geneva, 2006b.

IPCC - Intergovernmental Panel On Climate Change -. Climate Change 2021. The Physical Science Basis. Summary for Policymakers. Available at: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf. acesso em 18 de junho de 2024.

KING, Megan F.; GUTBERLET, Jutta. Contribution of cooperative sector recycling to greenhouse gas emissions reduction: A case study of Ribeirão Pires, Brazil. **Waste management**, v. 33, n. 12, p. 2771-2780, 2013.

KIRCHHERR, Julian; REIKE, Denise; HEKKERT, Marko. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. **Resources, conservation and recycling**, v. 127, p. 221-232, 2017.

NOBREGA, C.C. *et al.* Avaliação do ciclo de vida da coleta seletiva de papel e papelão no núcleo do Bessa, município de João Pessoa (PB), Brasil. Engenharia Sanitaria e Ambiental, v. 24, p. 875-886, 2019.

ONS – Operador Nacional do Sistema. Resultados da Operação. Dados gerais. (2024). Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/dados-gerais>. Acesso em 15 de maio de 2025.

PRÉ SUSTAINABILITY, 2023. Simapro Software. Disponível em: <https://simapro.com/> acesso em 18 de junho de 2024.

Santos, T. B. (2014). Análise das emissões gasosas e desempenho de grupo gerador operando com combustíveis de mistura diesel e biodiesel. Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial da Universidade Federal da Bahia.

SILVA, Sandro Pereira. A organização coletiva de catadores de material reciclável no Brasil: dilemas e potencialidades sob a ótica da economia solidária. Texto para Discussão, 2017.

UNCTAD. *Economic trends in Africa*. Genebra: United Nations Conference on Trade and Development, 2022. Disponível em: https://unctad.org/system/files/official-document/tdstat45_FS11_en.pdf. Acesso em: 7 jan. 2022.

UNEP - United Nations Environment Programme. Global Waste Management Outlook 2024. UNEP, 2024. Disponível em: <https://www.unep.org/ietc/resources/report/global-waste-management-outlook-2024>. Acesso em: 1 abr. 2025.

WEGER, Lindsey B.; LEITAO, Joana; LAWRENCE, Mark G. Expected impacts on greenhouse gas and air pollutant emissions due to a possible transition towards a hydrogen economy in German road transport. **International journal of hydrogen energy**, v. 46, n. 7, p. 5875-5890, 2021.

WÜNSCH, Christoph; KOCINA, Robin. Global development of greenhouse gas emissions in the waste management sector. **Detritus**, v. 7, p. 104-118, 2019.

CAPÍTULO 4

4. ARTIGO: ESTRATÉGIAS PARA A REDUÇÃO DA PEGADA DE CARBONO DA COOPERATIVA DE RECICLAGEM ITAMARE.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo apresentar estratégias voltadas à mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEEs) associadas às atividades da cooperativa de reciclagem Itamare, além de estimar a sua pegada de carbono evitada. Com base na Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) previamente realizada, foram quantificadas as emissões e identificados os principais pontos críticos (*hotspots*). Destacou-se o transporte de resíduos como a principal fonte de emissões, responsável por mais de 99% do total dos GEEs mensais gerados, o que equivale a 204,3 t CO₂-eq. Com base nesse diagnóstico, o estudo avaliou alternativas para a substituição tanto do combustível quanto do veículo atualmente utilizados, priorizando alternativas com menores emissões de GEEs. Sobre o combustível, os resultados indicaram que o diesel B-15 e o biodiesel puro apresentam as menores emissões em comparação ao cenário atual, possibilitando reduções de 15,50% e 29,99%, respectivamente. No entanto, a adoção dessas opções exige a aquisição de veículos de combustão interna compatíveis com tais combustíveis. A adoção de veículos elétricos se mostrou ainda mais eficaz, com potencial de redução de 88,48% das emissões do cenário atual. Por fim, concluiu-se que políticas públicas e incentivos tecnológicos são essenciais para viabilizar a transição energética e promover práticas sustentáveis no setor de reciclagem.

Palavras-chaves: Biocombustíveis, Mobilidade elétrica, Mitigação, Sustentabilidade.

ABSTRACT

This study aims to present strategies for mitigating greenhouse gas (GHG) emissions associated with the activities of the Itamare recycling cooperative, as well as to estimate its avoided carbon footprint. Based on a previously conducted Life Cycle Assessment (LCA), emissions were quantified and key hotspots were identified. Waste transportation emerged as the main source of emissions, accounting for more than 99% of the total monthly GHG emissions, equivalent to 204.3 t CO₂-eq. Based on this diagnosis, the study evaluated alternatives for replacing both the fuel and the vehicle currently in use, prioritizing options with lower GHG emissions. Regarding fuel, the results indicated that B-15 diesel and pure biodiesel present the lowest emissions compared to the current scenario, enabling reductions of 15.50% and 29.99%, respectively. However, adopting these options requires the acquisition of compatible vehicles. Replacing the current vehicle with an electric mobility model demonstrated the greatest mitigation potential, with an estimated reduction of 88.48% in emissions compared to the current scenario. Finally, the study concludes that public policies and technological incentives are essential to enable the energy transition and promote sustainable practices in the recycling sector.

Keywords: Biofuels, Electric mobility, Mitigation, Sustainability.

4.1 INTRODUÇÃO

O controle das emissões de gases de efeito estufa (GEEs) é um dos maiores desafios ambientais e sociais enfrentados pelo mundo atualmente, exigindo uma resposta coordenada e urgente da comunidade internacional. Atividades humanas como o desmatamento, a industrialização e a queima de combustíveis fósseis têm contribuído para o aumento da concentração desses gases na atmosfera (Miklautsch; Woschank, 2022). Esse acúmulo tem provocado um desequilíbrio no sistema climático, o que tem levado ao aumento da temperatura média do planeta (Sippel *et al.*, 2020). Diante desse cenário, a adoção de políticas e acordos ambientais, como o Acordo de Paris (2015), é fundamental para limitar o aumento da temperatura global e promover a transição para uma economia de baixo carbono.

No âmbito nacional, muitos países implementaram políticas e regulamentações próprias para atingir essas metas de descarbonização. No Brasil, a Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009, institui a Política Nacional sobre Mudanças Climáticas (PNMC) (Brasil, 2009), que tem como objetivo principal favorecer o equilíbrio entre o desenvolvimento econômico e social com a proteção ao sistema climático. Entre suas diretrizes está a promoção e o desenvolvimento de pesquisas científico-tecnológicas, bem como a disseminação de tecnologias, processos e práticas voltadas para mitigar as mudanças climáticas, reduzindo as emissões de origem humana e ampliando a remoção dos GEEs por meio de sumidouros (Brasil, 2009).

O Brasil também é signatário do Acordo de Paris (2015), um tratado internacional que reúne vários países comprometidos a limitar o aquecimento do planeta a menos de 2 °C, com esforços para não ultrapassar 1,5 °C, além de reduzir as emissões de GEEs. No entanto, os dados recentes sobre as emissões de GEEs indicam que o país está se distanciando de forma progressiva das suas metas (Climate Action Tracker, 2023). Esses gases podem ser liberados durante os processos de transporte, tratamento e descarte de resíduos sólidos urbanos (RSU) (Bunsan *et al.*, 2013; Miller; Ramaswami; Ranjan, 2013; Nóbrega *et al.*, 2019).

Diante desse cenário global de crescente preocupação com as mudanças climáticas e da necessidade de reduzir as emissões de GEEs, é fundamental analisar setores e atividades que possam contribuir para essa mitigação no contexto nacional. Entre eles, a gestão de resíduos sólidos urbanos se destaca como um campo estratégico, no qual ações

eficientes podem gerar impactos positivos diretos (Miklautsch; Woschank, 2022).

Nesse contexto, as cooperativas de reciclagem desempenham um papel fundamental, sendo responsáveis pelo destino de uma grande quantidade de resíduos que passam por processos de reciclagem e transformação. Esse processo agrega valor aos materiais descartados, permitindo que sejam reintegrados à cadeia produtiva (Mesquita *et al.*, 2023). Para isso, utiliza-se da 'logística reversa', premissa da economia circular que envolve a coleta, triagem e transporte de materiais recicláveis, reintegrando-os na cadeia produtiva (Prajapati; Kant; Shankar, 2019; Rebehy *et al.*, 2019). De acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão de Resíduos Sólidos (SINIR), a logística reversa atua como um mecanismo de desenvolvimento econômico e social, permitindo a coleta e devolução de materiais ao setor empresarial para reutilização, recondicionamento ou reciclagem (SINIR, 2024).

Entretanto, grande parte das cooperativas carece de uma infraestrutura organizada e procedimentos operacionais padronizados para realizar a gestão dos resíduos, desde a triagem e classificação até o processamento e a distribuição dos resíduos recicláveis (Fattor; Vieira, 2019; Bercegol; Cavé; Huyen, 2017; Zolnikov *et al.*, 2018). Para realizarem o transporte diário de grandes quantidades de resíduos por de longas distâncias, essas organizações utilizam caminhões movidos a combustíveis fósseis, especialmente o diesel, responsável por grande parte das emissões de GEEs (Branco *et al.*, 2025). No Brasil, esse tipo de veículo foi responsável, em 2019, por uma parcela de 40% de um total de 196,5 milhões de toneladas de CO₂-eq emitidos por todo o setor de transporte, segundo o Sistema Brasileiro de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG, 2020).

Diante da possibilidade de quantificar e reduzir as emissões associadas às atividades das cooperativas é essencial identificar seus impactos ambientais causados. Essa busca não se limita à esfera ambiental, pois também envolve aspectos econômicos e sociais, mostrando, dessa forma, a complexidade do tema para essas organizações.

No contexto ambiental, a implementação de tecnologias de baixo carbono está diretamente relacionada à mitigação das mudanças climáticas, visto que um dos principais contribuintes para o aquecimento global é o aumento nas emissões de GEEs (Pal; Gopal; Ramkumar, 2023). Vale salientar que os efeitos negativos do aquecimento global vão muito além da saúde humana, impactando também na agricultura (Tubiello *et al.*, 2015), na flora, na fauna e nos níveis de evaporação e no fluxo das águas (Miles-Novelo; Anderson,

2019).

No âmbito econômico, a modernização e o desenvolvimento de tecnologias de baixo carbono relacionado ao transporte de carga se mostra financeiramente compensatório a longo prazo, por meio da economia de combustível e redução de gastos com manutenção (Matura; Singh; Kumar, 2025). Da mesma forma, a transição de veículos convencionais movidos a combustível fóssil para elétricos pode ser economicamente benéfica, visto que estes, tendem a ter custos de manutenção mais baixos. Além disso, em vários locais, os governos vêm trabalhando para a implementação de padrões mais rígidos em relação à emissão de gases, oferecendo incentivos financeiros para a produção e compra de veículos de baixa emissão (Haywood; Jakob, 2023).

Por fim, a responsabilidade social corporativa (RSC) é uma questão importante a ser considerada. Reduzir as emissões de GEEs faz parte de uma responsabilidade mais ampla para com a sociedade e pode melhorar a qualidade de vida nas comunidades onde a cooperativa opera. Adotar práticas sustentáveis também pode melhorar a imagem pública da cooperativa, tornando-a mais atrativa para investidores, parceiros e clientes.

Assim, esse estudo tem como objetivo propor alternativas para os *hotspots* ambientais associados às atividades da cooperativa Itamare, localizada no município de Itabaiana, na Paraíba - Brasil. Além disso, é estimada a pegada de carbono evitada a partir da aplicação dessas estratégias propostas. Para isso é realizada uma investigação de alternativas tecnológicas, de acordo com a realidade operacional da cooperativa.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

Partindo de uma Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) realizada a priori identificaram-se as emissões de GEEs associadas às atividades da cooperativa Itamare. Uma visão geral do escopo da ACV pode ser visualizada na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 Principais informações referentes à ACV da cooperativa Itamare.

Objetivo do estudo	<ul style="list-style-type: none"> Quantificar as emissões de GEE (pegada de carbono) associadas às atividades da cooperativa de reciclagem Itamare
Fronteiras	<ul style="list-style-type: none"> Coleta e transporte dos resíduos recicláveis até o galpão da Itamare, com auxílio do caminhão da cooperativa; Separação dos resíduos no galpão pelos catadores (assim como sua preparação para a comercialização); Transporte do material processado realizado pelo caminhão da Itamare à empresa de beneficiamento.
Software e base de dados utilizados	<ul style="list-style-type: none"> Simapro 9.3.0.2 (PréSustainability, 2023); Ecoinvent (2023) com o método de avaliação de impacto ambiental IPCC 2021 GWP 100a (IPCC, 2021).
Entradas associadas à categoria transporte	<ul style="list-style-type: none"> Veículo: Caminhão VW 8.160 <i>Delivery advantech</i>, ano 2013; Capacidade: 5 toneladas; Distâncias percorridas (média mensal): 5.786,13 km; Consumo e tipo de combustível: 520 l (Diesel). Quantidade coletada (média mensal): 150 t Quantidade distribuída (média mensal): 40 t
Entradas associadas à categoria processamento	<ul style="list-style-type: none"> Consumo mensal de energia: 545,61 kWh Consumo mensal de água: 10 m³

Classificado como veículo pesado pelo Contran (Brasil, 2011), o caminhão tipo *Delivery* utilizado pela cooperativa coleta, por mês, cerca de 150 toneladas de resíduos ao longo de 5.633,33 km. Além disso, realiza o transporte de 40 toneladas de plásticos para a unidade de beneficiamento em um trajeto mensal de 152,8 km. Considerando o fator de emissão de 0,240 kg CO₂-eq por tonelada-quilômetro, estima-se uma emissão total mensal de 204.266,88 kg CO₂-eq, resultado das atividades de coleta e destinação dos resíduos. Já a categoria do processamento, que envolve o consumo de eletricidade e água, gera 83,03 kg CO₂-eq/mês. Essa diferença significativa evidencia o ponto crítico das emissões.

Portanto, o foco desse estudo está na inspeção de estratégias com potencial de redução dos impactos gerados pela emissão de GEEs do transporte de resíduos, que é a fonte emissora responsável por mais de 99% de todos os gases gerados pela cooperativa.

4.2.1 Definição de estratégias mitigadoras

A utilização de combustíveis diferentes compatíveis não implica na mudança da frota, podendo ser utilizado diretamente no caminhão atual sem necessidade de conversão ou atualização de equipamentos.

Dessa forma, uma estratégia a ser testada é a substituição de combustível no caminhão, inicialmente a substituição do diesel comum pelo diesel S-10. Destaca-se que ambos já possuem, conforme estabelece a Resolução CNPE nº 6/2025 (CNPE, 2025), 15% de biodiesel em sua composição. Porém, o S-10 é um derivado do petróleo com baixo teor de enxofre e destinado ao uso em veículos movidos a diesel (Silva; Rivera, 2013). Em comparação ao diesel tradicional, que contém 500 ppm de enxofre, o diesel S-10 possui somente 10 ppm. Além disso, é possível utilizá-lo no caminhão da cooperativa sem prejuízo para o seu funcionamento, conforme previsto no seu manual (VOLKSWAGEN, 2012).

No contexto dos transportes rodoviários, uma das estratégias apresentadas por Alonso *et al.* (2025) inclui o uso de biodiesel. Neste caso, foram consideradas as amostras de biodiesel analisadas por Santos (2014), produzidas via rota metálica, utilizando uma mistura composta por 17% de óleo de soja e 83% de gordura bovina, com poder calorífico de 37,503 MJ/kg. A partir da medição dos gases emitidos, foi possível identificar as quantidades de óxidos de nitrogênio (NOx), material particulado (MP), oxigênio (O₂), dióxido de carbono (CO₂) e monóxido de carbono (CO). Estas quantidades foram usadas para adaptar a base de dados Ecoinvent (2023) dentro do *software* de ACV SimaPro (PréSustainability, 2023), e assim poder obter as emissões associadas ao biodiesel específico de Santos (2014) ao aplicar o método IPCC 2021 GWP 100a (IPCC, 2021). Dessa forma, o estudo avalia o uso desse biodiesel em três situações distintas:

- Mistura de 20% de biodiesel com 80% de diesel (B-20);
- Mistura de 25% de biodiesel com 75% de diesel (B-25);
- Biodiesel puro (B-100).

Apesar de a cooperativa já utilizar combustível com 15% de biodiesel, como determina a legislação atual, este estudo considerou um cenário hipotético em que a frota poderia ser adaptada para operar com proporções mais elevadas desse biocombustível. O

objetivo foi avaliar os possíveis impactos ambientais caso sejam adotadas alternativas mais sustentáveis no uso do biodiesel.

Alonso *et al.* (2025) apresentou três estratégias para descarbonização do transporte rodoviário, com a principal sendo o uso de biocombustíveis. Porém, a mudança para a mobilidade elétrica pode ser uma alternativa para a redução no uso de combustíveis fósseis em áreas urbanas e essa transição também se aplica a veículos pesados de carga (São Paulo, 2023). Nessa categoria, veículos elétricos a bateria e veículos elétricos a células de combustível podem ser avaliados para o transporte de resíduos pela cooperativa. Porém esta alternativa envolve mudança na frota.

Para o caminhão elétrico, utiliza-se a consideração de 0,153 kWh/tkm feita por Qiu *et al.* (2022) para um caminhão de 10 toneladas de capacidade. Em relação ao consumo de eletricidade da rede, utiliza-se a metodologia de Carvalho e Delgado (2017) para calcular as emissões associadas, considerando-se o mix elétrico como 62,18% hidrelétrica, 15,32% eólica, 10,60% solar fotovoltaica, 4,38% gás natural, 3,67% biomassa, 2,36% nuclear, 1,30% carvão, e 0,19% óleo combustível (ONS, 2024).

Uma terceira estratégia proposta por Alonso *et al.* (2025) baseia-se no uso de gás natural comprimido (GNC). A adoção de GNC é reconhecida como uma opção vantajosa entre os combustíveis fósseis, por ser um dos menos poluentes, já que libera uma quantidade relativamente baixa de dióxido de carbono por unidade de energia (Lorenzi; Baptista, 2018). Porém, a região metropolitana de Itabaiana (FNEM, 2024) não dispõe da infraestrutura complexa de transporte que o GNC exige. Esse dado pode ser verificado pela listagem de postos e convertedores registrados de GNV da Paraíba (PBGÁS, 2025). Por essa razão essa proposição não foi contemplada para a análise proposta.

Ao passo da verificação das ações mitigadoras, realizou-se uma comparação para a substituição do combustível e a eletrificação da frota, considerando a diferença entre a emissão proveniente do transporte atualmente utilizado pela Itamare (cenário de referência) e as resultantes da aplicação da ação mitigadora (cenário de comparação). Desse modo, a pegada de carbono (CF) evitada é determinada pela equação 1.

$$CF_{\text{Evitada}} = CF_{\text{Cenário de referência}} - CF_{\text{Cenário de comparação}} \quad (1)$$

Para o cenário de referência considerou-se as emissões geradas nas etapas de coleta e destinação dos resíduos. A fase de coleta envolve o transporte mensal de 150.000 kg ao

longo de 5.633,33 km, utilizando um caminhão a diesel com fator de emissão de 0,229 kg CO₂-eq/tkm. Já a etapa de destinação refere-se à distribuição de 40.000 kg mensais de resíduos, percorrendo 152,8 km com o mesmo tipo de veículo e fator de emissão.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A comparação das emissões mensais dos GEEs emitidos pelos combustíveis analisados e pelo caminhão elétrico está exposta na Tabela 4.2. Observou-se um leve aumento na pegada de carbono (emissões totais na cadeia produtiva) do diesel S-10, aproximadamente 3,8%, devido à operação da unidade de hidrogenação (Martínez-González *et al.*, 2011). Sabe-se que esse processo, também conhecido como hidrotratamento, é uma das principais tecnologias empregadas pelas refinarias de petróleo para a remoção de enxofre tanto das matérias-primas quanto dos produtos finais, como gasolina e diesel. Neste caso, o valor das emissões associadas ao transporte sobe de 0,229 kg CO₂-eq/tkm para 0,237 kg CO₂-eq/tkm. Esta alternativa resulta em um aumento nas emissões, sendo descartada ao considerar-se somente as emissões de GEEs.

Tabela 4.2 Emissões mensais de GEEs associadas aos diferentes tipos de combustíveis e ao caminhão elétrico, considerando o fator de emissão e a mudança relativa em relação ao cenário de referência (diesel comum).

Substituição da frota	Tipo de tecnologia	Tipo de combustível	Fator de emissão (kg CO ₂ -eq/tkm)	Emissões mensais (kg CO ₂ -eq)	Mudança relativa (%)
Não	Combustão interna	Diesel comum	0,229	194.904,65	–
		Diesel S-10	0,237	201.713,54	+3,49
Sim	Combustão interna	Diesel B-20	0,226	192.351,31	–1,31
		Diesel B-25	0,222	188.946,86	–3,06
		Biodiesel B-100	0,168	142.986,81	–29,99
	Elétrico (bateria)	–	0,0214	23.526,40	–88,48

Embora o diesel com baixo teor de enxofre apresente benefícios ambientais significativos, como a redução de emissões de material particulado, óxidos de enxofre e hidrocarbonetos, contribuindo positivamente para a melhoria da qualidade do ar e da saúde pública (Martínez-González *et al.*, 2011), esse tipo de combustível resulta num aumento de

3,49% nas emissões de GEEs do cenário de referência.

Já utilizando-se o biodiesel de Santos (2014), inicialmente a uma proporção de 20% ao óleo diesel e mantendo-se o caminhão atualmente utilizado para coleta dos resíduos sólidos obteve-se 0,226 kg CO₂-eq/tkm. Esse valor resulta em emissões mensais de 192.351,31 kg CO₂-eq, o que representa uma redução de apenas 1,31% na pegada de carbono original. No entanto, mesmo esse percentual aparentemente modesto corresponde a uma diminuição de 2.553,34 kg de CO₂-eq por mês, o que equivale a 30,64 toneladas de CO₂-eq evitadas anualmente em comparação com o cenário de referência.

O diesel B-25 também se mostrou como uma alternativa potencial, apresentando uma redução 3,06% das emissões de GEEs comparado ao cenário de referência. Porém, a maior redução referente à substituição de combustível (29,99%) está associada ao uso do biodiesel puro (B100). No entanto, o uso desses combustíveis (Diesel B-20, B-25 e B-100) exige a substituição do veículo atualmente utilizado pela Itamare, pois eles não são adequados para motores que não tenham sido projetados para operá-los. Segundo Maheshwari *et al.* (2022) entre os riscos do uso em veículos incompatíveis estão o congelamento do combustível em temperaturas baixas, a menor densidade energética e a tendência à degradação durante longos períodos de armazenamento. Além disso, o biodiesel pode desprender resíduos acumulados nas paredes dos tanques e mangueiras, ocasionando o entupimento dos filtros de combustível.

Para o veículo elétrico, considerando-se o consumo de eletricidade da rede elétrica, obteve-se um fator de emissão de 0,140 kg CO₂-eq/kWh que, multiplicado ao consumo médio do caminhão elétrico de Qiu *et al.* (2022) (0,153 kWh/tkm), resultou no fator de emissão de 0,0214 kg CO₂-eq/tkm. Com isso, observou-se que as emissões de um caminhão elétrico, considerando-se o mix elétrico brasileiro, foram as mais baixas, com um potencial de redução de 88,48% das emissões do cenário de referência.

De modo geral, os caminhões elétricos apresentam duas grandes vantagens em relação aos modelos a diesel. A primeira é a maior eficiência energética dos sistemas de propulsão elétrica, levando em consideração que os motores a combustão interna desperdiçam cerca de 60% da energia do combustível em forma de calor (Delorme; Karbowski; Sharer, 2010). A segunda vantagem é a ausência de emissões diretas durante o uso, exceto por aquelas resultantes da evaporação de certos materiais, como tintas, e do desgaste de componentes como pneus e freios (Lee *et al.*, 2018).

Entretanto, algumas questões devem ser pontuadas. No caso de caminhões elétricos

a bateria, o transporte de grandes volumes por longas distâncias requer uma capacidade elevada de armazenamento de energia. Isso resulta na necessidade de baterias mais pesadas, e, conseqüentemente, na diminuição do espaço útil para carga no veículo e no aumento nos custos e no consumo energético (De Las Nieves Camacho; Jurburg; Tanco, 2022). De modo geral, para cada 100 quilômetros extras de autonomia, os caminhões elétricos atuais precisam incorporar aproximadamente uma tonelada a mais em baterias (Christidis *et al.*, 2024).

De maneira mais abrangente, destacam-se algumas barreiras e limitações para uma mudança geral em direção à mobilidade elétrica. Além do seu alto custo inicial para implementação (Ziegler; Abdelkafi, 2022), também existe uma dependência da mineração e do processamento de materiais para baterias, a concentração do setor industrial e tecnológico, além da necessidade de estruturar cadeias produtivas locais e sistemas adequados de descarte para o fim da vida útil dos equipamentos, alinhando-se aos esforços de eletrificação da mobilidade no país (Alonso *et al.*, 2025).

Além disso, a ausência de uma infraestrutura de recarga adequada continua sendo um dos maiores obstáculos para a expansão do uso de veículos elétricos em trajetos de longa distância. Apesar dos avanços tecnológicos e do aumento da oferta desses veículos, ainda há poucas estações de recarga rápida em rodovias e áreas afastadas dos centros urbanos (Keskin; Çatay; Laporte, 2021). Isso gera insegurança nos motoristas quanto à autonomia das baterias e à viabilidade de viagens prolongadas, limitando o uso dos elétricos a deslocamentos urbanos ou de curta duração.

Por outro lado, a implementação do biodiesel já se encontra amparada por algumas políticas públicas. Uma delas é a exigência legal de adição de biodiesel ao diesel fóssil, conforme estabelecido pela Lei nº 11.097/2005 (Brasil, 2005). Essa regulamentação foi reforçada em 2023, quando o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) definiu que a mistura obrigatória seria de 13% a partir de abril daquele ano, com previsão de aumento gradual até alcançar 15% em 2026 (ANP, 2023). Entretanto, de acordo com a Resolução CNPE nº 6/2025, a partir de 2025 passou a ser obrigatória a adição de 15% de biodiesel ao diesel comercializado no país (CNPE, 2025). Vale salientar que valores superiores a esse limite podem provocar desgaste no motor e comprometer a garantia que é oferecida pelo fabricante (Alonso *et al.*, 2025).

Outra política de destaque é a Política Nacional de Biocombustíveis, conhecida como RenovaBio, criada pela Lei nº 13.576/2017 (Brasil, 2017). Esse programa é

coordenado pela Agência Nacional de Petróleo e Combustível (ANP) e surgiu com o objetivo de atender às metas de descarbonização assumidas pelo Brasil no Acordo de Paris (2015), voltadas ao setor de combustíveis. Dentro desse cenário, a RenovaBio promove o uso crescente de biodiesel na composição do diesel comercializado no país, oferecendo incentivos que favorecem economicamente e ambientalmente a adoção de alternativas mais sustentáveis ao combustível fóssil tradicional.

Além disso, o governo federal iniciou recentemente o programa “Combustível do Futuro”, por meio da Lei nº 14.993, de 08 de outubro de 2024 (Brasil, 2024) que estabelece diretrizes para a substituição de combustíveis fósseis por alternativas renováveis e menos poluentes nos setores de transporte terrestre, marítimo e aéreo. Entre seus objetivos está a ampliação, de forma progressiva, do teor de biodiesel no diesel, com a possibilidade de alcançar 20% de mistura até o ano de 2030.

4.4 CONCLUSÃO

O estudo mostrou que embora o diesel com baixo teor de enxofre traga benefícios relacionados à qualidade do ar e à saúde pública, ao reduzir poluentes como material particulado e óxidos de enxofre, seu uso aumenta em 3,49% as emissões de GEEs no cenário de referência. Já o uso do biodiesel nas proporções de 20% e 25% apresenta um potencial de redução de emissões de 1,31% e 3,06%, respectivamente; podendo gerar uma redução de até 715,04 t CO₂-eq por ano. Entretanto condicionam seu uso à aquisição de um veículo adaptado ou compatíveis para uso. Da mesma forma, o uso do biodiesel puro pode reduzir 29,99% das emissões de GEEs por meio de um veículo compatível.

Apesar dos desafios operacionais e econômicos que dificultam uma possível aquisição de caminhões elétricos pela cooperativa para o transporte de cargas pesadas, essa alternativa destacou-se como uma opção ambientalmente mais limpa, com as menores emissões de GEEs (-88,48% do cenário de referência). No entanto, sua implementação exige o enfrentamento de limitações importantes, relacionadas principalmente ao elevado custo inicial de aquisição e ao fato de que a tecnologia ainda é relativamente nova no contexto brasileiro, o que pode gerar incertezas quanto à manutenção, infraestrutura de recarga e apoio técnico especializado.

Diante desse cenário, as políticas públicas podem auxiliar no fortalecimento de iniciativas que visem à redução de GEEs dentro da cooperativa. Através de incentivos

voltados à transição energética, programas específicos e normas que estimulam o uso de combustíveis renováveis, essas ações governamentais podem promover a adoção de práticas mais sustentáveis, contribuindo de forma concreta para a diminuição dos impactos ambientais associados às atividades operacionais da cooperativa.

4.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACORDO DE PARIS (2015). Acordo de Paris. Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima. Disponível em: https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf. Acesso em: 29 maio 2024.

ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. CNPE aprova resolução que restabelece o aumento para 12% da mistura de biodiesel ao diesel a partir de abril. 2023. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/canais_atendimento/imprensa/noticias-comunicados/cnpe-aprova-resolucao-que-restabelece-o-aumento-para-12-da-mistura-de-biodiesel-ao-diesel-a-partir-de-abril. Acesso em: 20 abr. 2025.

ALONSO, Rafael Herrero *et al.* Energy transition and decarbonization of road transportation: A case study of São Paulo's Race to Zero by 2050, Brazil. **Case Studies on Transport Policy**, p. 101365, 2025.

BRANCO, José Eduardo Holler *et al.* Evaluation of the greenhouse gas emissions of the Brazilian biodiesel and the impact of the mandatory blending of the biofuel into commercial diesel fuel. **Chemosphere**, v. 376, p. 144268, 2025.

BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Resolução ANP nº 30, de 5 de agosto de 2016. Estabelece a especificação do óleo diesel BX contendo teor de biodiesel superior ao limite obrigatório e igual ou inferior a 30% em volume. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 152, p. 55–56, 10 ago. 2016.

BRASIL. Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN). Resolução nº 396, de 13 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os limites de peso e as tolerâncias para veículos que transitem por vias terrestres. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 22 dez. 2011.

BRASIL. Lei nº 11.097, de 13 de janeiro de 2005. Introduz o uso de biodiesel na matriz energética brasileira, altera as Leis nºs 9.478, de 6 de agosto de 1997, e 10.636, de 30 de dezembro de 2002, e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ano 142, n. 10, p. 1, 14 jan. 2005.

BRASIL. Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009. Institui a Política Nacional sobre Mudanças Climáticas. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, p. 2, 30 dez. 2009. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2009/Lei/L12187.htm. Acesso em: 12 jun. 2024.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos

Sólidos; altera a Lei n.º 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 29 maio 2024.

BRASIL. Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017. Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ano 154, n. 247, p. 1, 27 dez. 2017.

BRASIL. Lei nº 14.993, de 8 de outubro de 2024. Institui a Política Nacional de Qualidade do Ar e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 9 out. 2024. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2024/lei-14993-8-outubro-2024-796443-publicacaooriginal-173317-pl.html>. Acesso em: 10 abr. 2025.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Relatório de consolidação dos testes para validação da utilização de misturas com Biodiesel B10 em motores e veículos. Grupo de Trabalho para Testes com Biodiesel (Portarias MME nº 262/2016 e nº 80/2017). Brasília: MME, 2018.

BRASIL. *Plano Nacional sobre Mudança do Clima*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2008. Disponível em: http://www.mma.gov.br/estruturas/smcq_climaticas/_arquivos/plano_nacional_mudanca_clima.pdf. Acesso em: 29 maio 2024.

BUNSAN, Sond *et al.* Modeling the dioxin emission of a municipal solid waste incinerator using neural networks. **Chemosphere**, v. 92, n. 3, p. 258-264, 2013.

CARVALHO, M.; DELGADO, D.B.M. Potential of photovoltaic solar energy to reduce the carbon footprint of the Brazilian electricity matrix. **LALCA: Revista Latino-Americana em Avaliação do Ciclo de Vida**, v. 1, n. 1, p. 64-85, 2017.

CHRISTIDIS, Panayotis *et al.* Pesquisa e inovação abrindo caminho para a neutralidade climática no transporte urbano: Análise de 362 cidades em sua jornada rumo à emissão zero. **Transport Policy**, v. 148, p. 107-123, 2024.

CLIMATE ACTION TRACKER. Brazil – Assessment – 05/12/2023. Disponível em: <https://climateactiontracker.org/countries/brazil/2023-12-05/>. Acesso em: 29 maio 2024.

Conselho Nacional de Política Energética (CNPE). Resolução nº 6, de 19 de fevereiro de 2025. Estabelece o teor obrigatório de biodiesel no óleo diesel comercializado no território nacional. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 20 fev. 2025. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-cnpe-n-6-de-19-de-fevereiro-de-2025-541122710>. Acesso em: 6 ago. 2025.

DE BERCEGOL, Rémi; CAVÉ, Jérémie; NGUYEN THAI HUYEN, Arch. Waste municipal service and informal recycling sector in fast-growing Asian cities: Co-existence, opposition or integration?. **Resources**, v. 6, n. 4, p. 70, 2017.

DE LAS NIEVES CAMACHO, María; JURBURG, Daniel; TANCO, Martín. Hydrogen

fuel cell heavy-duty trucks: Review of main research topics. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, n. 68, p. 29505-29525, 2022.

DELORME, Antoine; KARBOWSKI, Dominik; SHARER, Phil. Evaluation of fuel consumption potential of medium and heavy duty vehicles through modeling and simulation. Argonne National Lab.(ANL), Argonne, IL (United States), 2010.

ECOINVENT, 2023. Ecoinvent Database. Disponível em: <https://ecoinvent.org/> acesso em 18 de junho de 2024.

FATTOR, Marcus Vinícius; VIEIRA, Melissa Gurgel Adeodato. Application of human HAZOP technique adapted to identify risks in Brazilian waste pickers' cooperatives. **Journal of Environmental Management**, v. 246, p. 247-258, 2019.

FNEM – Fórum Nacional de Entidades Metropolitanas. Disponível em: <https://fnembrasil.org/regiao-metropolitana-de-itabaiana-pb/>. Acesso em: 01 mai. 2024.

HAYWOOD, Luke; JAKOB, Michael. The role of the emissions trading scheme 2 in the policy mix to decarbonize road transport in the European Union. **Transport Policy**, v. 139, p. 99-108, 2023.

IPCC - Intergovernmental Panel On Climate Change -. Climate Change 2021. The Physical Science Basis. Summary for Policymakers. Available at: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf . acesso em 18 de junho de 2024.

KESKIN, Merve; ÇATAY, Bülent; LAPORTE, Gilbert. A simulation-based heuristic for the electric vehicle routing problem with time windows and stochastic waiting times at recharging stations. **Computers & Operations Research**, v. 125, p. 105060, 2021.

LEE, Dong-Yeon *et al.* Life-cycle implications of hydrogen fuel cell electric vehicle technology for medium-and heavy-duty trucks. **Journal of Power Sources**, v. 393, p. 217-229, 2018.

LORENZI, Guido; BAPTISTA, Patrícia. Promotion of renewable energy sources in the Portuguese transport sector: A scenario analysis. **Journal of cleaner production**, v. 186, p. 918-932, 2018.

MAHESHWARI, Pranjal *et al.* A review on latest trends in cleaner biodiesel production: Role of feedstock, production methods, and catalysts. **Journal of Cleaner Production**, v. 355, p. 131588, 2022.

MARTÍNEZ-GONZÁLEZ, Aldemar *et al.* Comparison of potential environmental impacts on the production and use of high and low sulfur regular diesel by life cycle assessment. **CT&F-Ciencia, Tecnología y Futuro**, v. 4, n. 4, p. 123-138, 2011.

MATURA, Ashish; SINGH, Rahul Kumar; KUMAR, Rajeev. Decarbonizing road transport: A systematic literature review based on use case analysis. **Case Studies on Transport Policy**, p. 101416, 2025.

MESQUITA, Julia Luz Camargos *et al.* Greenhouse gas emission reduction based on

social recycling: A case study with waste picker cooperatives in Brasília, Brazil. **Sustainability**, v. 15, n. 12, p. 9185, 2023.

MIKLAUTSCH, Philipp; WOSCHANK, Manuel. Uma estrutura de medidas para mitigar as emissões de gases de efeito estufa no transporte de cargas: revisão sistemática da literatura sob a perspectiva do fabricante. *Journal of Cleaner Production*, v. 366, p. 132883, 2022.

MILES-NOVELO, Andreas; ANDERSON, Craig A. Climate change and psychology: Effects of rapid global warming on violence and aggression. **Current Climate Change Reports**, v. 5, p. 36-46, 2019.

MILLER, Leslie A.; RAMASWAMI, Anu; RANJAN, Ravi. Contribution of water and wastewater infrastructures to urban energy metabolism and greenhouse gas emissions in cities in India. **Journal of Environmental Engineering**, v. 139, n. 5, p. 738-745, 2013.

NOBREGA, C. C. *et al.* Avaliação do ciclo de vida da coleta seletiva de papel e papelão no núcleo do Bessa, município de João Pessoa (PB), Brasil. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 24, p. 875-886, 2019.

ONS – Operador Nacional do Sistema. Resultados da Operação. Dados gerais. (2024). Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/dados-gerais> Acesso em 15 de maio de 2025.

PAL, Preeti; GOPAL, P. R. C.; RAMKUMAR, M. Impact of transportation on climate change: An ecological modernization theoretical perspective. **Transport Policy**, v. 130, p. 167-183, 2023.

PBGÁS – Companhia Paraibana de Gás. Postos e convertedoras. João Pessoa. Disponível em: <https://pbgas.com.br/postos-e-convertedoras/>. Acesso em: 14 abr. 2025.

PRAJAPATI, Himanshu; KANT, Ravi; SHANKAR, Ravi. Bequeath life to death: State-of-art review on reverse logistics. **Journal of cleaner production**, v. 211, p. 503-520, 2019.

PRÉ SUSTAINABILITY, 2023. Simapro Software. Disponível em: <https://simapro.com/> acesso em 18 de junho de 2024.

QIU, K.; RIBBERINK, H.; ENTCHEV, E. Economic feasibility of electrified highways for heavy-duty electric trucks. **Applied Energy**, v. 326, p. 119935, 2022.

REBEHY, Perla Calil Pongeluppe Wadhy *et al.* Reverse logistics systems in Brazil: Comparative study and interest of multistakeholders. **Journal of environmental management**, v. 250, p. 109223, 2019.

Santos, T. B. (2014). Análise das emissões gasosas e desempenho de grupo gerador operando com combustíveis de mistura diesel e biodiesel. Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial da Universidade Federal da Bahia.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística. Plano Estadual de Energia 2050 – Consulta Pública. São Paulo: Governo do Estado de São Paulo, 2023. Disponível em: <https://smastr16.blob.core.windows.net/2001/2023/11/Plano-Estadual-de-Energia-2050-RtZ-Consulta-Publica-1.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2025.

Silva, C., & Rivera, A. (Eds.). (2013). Diesel Fuels: Characteristics, Performances and Environmental Impacts. Nova Science Publishers.

SIPPEL, Sebastian *et al.* Climate change now detectable from any single day of weather at global scale. **Nature climate change**, v. 10, n. 1, p. 35-41, 2020.

SISTEMA BRASILEIRO DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES E REMOÇÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA (SEEG). Emissões por setor: Transportes. 2020. Disponível em: https://seeg.obass.info/linha/#elementor-toc__heading-anchor-7. Acesso em: 13 abr. 2025.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE A GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS (SINIR). O que é Logística Reversa. Brasília, DF: MMA, 2025. Disponível em: <https://sinir.gov.br/perfis/logistica-reversa/logistica-reversa>. Acesso em: 4 ago. 2025.

TUBIELLO, Francesco N. *et al.* The contribution of agriculture, forestry and other land use activities to global warming, 1990–2012. **Global change biology**, v. 21, n. 7, p. 2655-2660, 2015.

VOLKSWAGEN. Instruções de operação: Delivery 8-160, Delivery 9-160. Edição 05/2012. [S.l.]: Volkswagen Caminhões e Ônibus, 2012. Manual do proprietário.

ZIEGLER, David; ABDELKAFI, Nizar. Business models for electric vehicles: Literature review and key insights. **Journal of Cleaner Production**, v. 330, p. 129803, 2022.

ZOLNIKOV, Tara Rava *et al.* Ineffective waste site closures in Brazil: A systematic review on continuing health conditions and occupational hazards of waste collectors. **Waste management**, v. 80, p. 26-39, 2018.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSÕES GERAIS

A revisão sistemática da literatura sobre cooperativas de reciclagem e a metodologia da ACV revelou que, embora essa ferramenta seja fundamental para entender os impactos ambientais das atividades das cooperativas e orientar decisões na gestão de resíduos, sua aplicação nesse contexto ainda é limitada. Entre os 54 artigos que tratam sobre cooperativas de reciclagem, apenas 12% abordaram as duas temáticas de forma integrada, indicando um campo pouco explorado.

A revisão identificou ainda que os trabalhos que incluem a metodologia da ACV no contexto das cooperativas de reciclagem concentram-se principalmente na triagem de materiais recicláveis e na análise dos impactos ambientais, sendo essas as temáticas abordadas com maior frequência (dois artigos cada). Outros aspectos, como os custos operacionais, a exposição ocupacional dos catadores e a gestão de resíduos, também foram explorados, embora com menor recorrência, aparecendo em apenas um estudo cada.

O estudo sobre a pegada de carbono da cooperativa Itamare propiciou a análise dos seus procedimentos operacionais e a quantificação dos GEEs emitidos ao longo da sua cadeia produtiva. O uso da ACV, que é estimulada pela lei da PNRS se mostrou como fundamental para ajustar esses objetivos.

As emissões mensais totais da cooperativa resultaram em 194,98 t CO₂-eq, das quais 194,90 t CO₂-eq estão vinculadas diretamente ao uso de veículos a diesel no transporte dos resíduos. Com isso, foi constatado que mais de 99% das emissões da Itamare referem-se ao setor de transporte de resíduos recicláveis, sinalizando onde devem ser adotadas as medidas de mitigação.

Com esse propósito, o capítulo referente às estratégias mitigadoras da pegada de carbono da cooperativa foi realizado. Inicialmente a substituição do combustível usado no caminhão foi considerada. Utilizando o biodiesel de Santos (2014) na proporção de 20% ao óleo diesel e mantendo o caminhão atualmente empregado na coleta de resíduos sólidos, obteve-se 0,226 kg CO₂-eq/tkm, resultando em emissões mensais de 192.351,31 kg CO₂-eq - uma redução de 1,31% em relação à pegada de carbono original. Embora modesto, esse percentual representa 2.553,34 kg CO₂-eq a menos por mês, equivalendo a 30,64 t CO₂-eq evitadas anualmente. O diesel B-25 também apresentou potencial, reduzindo 3,06% das

emissões de GEEs, enquanto a maior redução (29,99%) foi alcançada com o uso de biodiesel puro (B100). Porém essas alternativas exigem a inclusão de um veículo compatível com esse tipo de combustível.

Outra opção discutida foi a substituição do caminhão movido a combustível fóssil por veículos elétricos. Observou-se que apesar dos desafios econômicos e operacionais, como o alto custo inicial e a limitada infraestrutura, os caminhões elétricos representam a opção mais limpa ambientalmente para a cooperativa, com um potencial de redução de 88,48% nas emissões de GEEs em relação ao cenário de referência. Embora ainda pouco difundida no Brasil, a tecnologia tem grande potencial para transformar o transporte de carga pesada em direção a uma matriz mais limpa e sustentável.

No contexto geral da pesquisa, conclui-se que, embora desempenhem papel essencial no redirecionamento de resíduos recicláveis e na promoção da economia circular, as cooperativas de reciclagem ainda carecem de suporte adequado para aprimorar os processos de medição, registro e verificação das emissões de GEEs. A economia circular busca manter o valor dos materiais pelo maior tempo possível, reinserindo-os no ciclo produtivo - objetivo que depende de ações como a logística reversa, prevista na Política Nacional de Resíduos Sólidos, para garantir o retorno de produtos e embalagens ao processo produtivo. Contudo, a falta de infraestrutura, incentivos e integração com cadeias formais limita o potencial dessas organizações em ampliar sua eficiência e reduzir emissões, dificultando a consolidação de um modelo produtivo de baixo carbono.

Os resultados desta dissertação podem servir de referência para outras cooperativas de reciclagem com perfil semelhante, contribuindo para a disseminação de práticas mais sustentáveis no setor e colaborando com as metas nacionais de descarbonização. A integração entre conhecimento científico, realidade operacional e formulação de políticas públicas se apresenta como um caminho essencial para a transição para uma economia de baixo carbono no setor de reciclagem.

Para trabalhos futuros, sugere-se realizar uma análise da viabilidade econômica e operacional das tecnologias de transporte limpo no contexto das cooperativas de reciclagem, incluindo estudos de custo-benefício e análise de ciclo de vida comparativa entre diferentes tipos de veículos. Ademais, recomenda-se a realização de estudos voltados à formulação e avaliação de políticas públicas que incentivem a sustentabilidade nas cooperativas, promovendo apoio técnico, acesso a financiamento e integração dessas organizações nas estratégias nacionais de gestão de resíduos e transição para uma

economia de baixo carbono.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DA DISSERTAÇÃO

ABREMA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2024**. São Paulo: ABREMA, 2024. 102 p.

ACCARDO, Antonella *et al.* Life cycle assessment of an NMC battery for application to electric light-duty commercial vehicles and comparison with a sodium-nickel-chloride battery. **Applied Sciences**, v. 11, n. 3, p. 1160, 2021.

ACORDO DE PARIS (2015). Acordo de Paris. Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima. Disponível em: https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf. Acesso em: 29 maio 2024.

ABD MANAF, Latifah; SAMAH, Mohd Armi Abu; ZUKKI, Nur Ilyana Mohd. Municipal solid waste management in Malaysia: Practices and challenges. **Waste management**, v. 29, n. 11, p. 2902-2906, 2009.

ABEND, Lisa. Finlândia quer acabar com todos os resíduos até 2050. *Time*, 31 dez. 2021. Disponível em: <https://time.com/6132391/finland-end-waste/>. Acesso em: 2 jun. 2024.

ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil: 2022**. São Paulo: Abrelpe, dez. 2022. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7758785/mod_resource/content/1/Panorama_Abr elpe_2022.pdf. Acesso em: 4 jan. 2025.

ABRERPI. MMA publica portaria que regula a Lei de Incentivo à Reciclagem. Disponível em: <https://www.abrerpi.org.br/noticias/noticia/mma-publica-portaria-que-regula-a-lei-de-incentivo-a-reciclagem>. Acesso em: 23 dez. 2024.

AHMAD SHAMIM, M. *et al.* Life cycle assessment for oil palm based plywood: A gate-to-gate case study. **Am. J. Environ. Sci**, v. 10, p. 86-93, 2014.

AKIMOTO, Keigo; SANO, Fuminori; NAKANO, Yuko. Assessment of comprehensive energy systems for achieving carbon neutrality in road transport. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 112, p. 103487, 2022.

ALFAIA, Raquel Greice de Souza Marotta; COSTA, Alyne Moraes; CAMPOS, Juacyara Carbonelli. Municipal solid waste in Brazil: A review. **Waste Management & Research**, v. 35, n. 12, p. 1195-1209, 2017.

ALONSO, Rafael Herrero *et al.* Energy transition and decarbonization of road transportation: A case study of São Paulo's Race to Zero by 2050, Brazil. **Case Studies on Transport Policy**, p. 101365, 2025.

ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. CNPE aprova resolução que restabelece o aumento para 12% da mistura de biodiesel ao diesel a partir de abril. 2023. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/canais_atendimento/imprensa/noticias-comunicados/cnpe-aprova-resolucao-que-restabelece-o-aumento-para-12-da-mistura-de-biodiesel-ao-diesel-a-partir-de-abril. Acesso em: 20 abr. 2025.

ANSAR, Muhammed Ayaj *et al.* Occupational exposure to hazards and volatile organic compounds in small-scale plastic recycling plants in Thailand by integrating risk and life cycle assessment concepts. **Journal of Cleaner Production**, v. 329, p. 129582, 2021.

ANUNAY, G. *et al.* Greenhouse gas emissions from landfills: a case study of nct of Delhi. **Journal of Climatology and Weather Forecasting**, v. 4, n. 1, p. 10.4172, 2016.

ARAUJO, Yuri Rommel Vieira; SOUZA, Bartolomeu Israel; CARVALHO, Monica. Greenhouse Gas Emissions Associated with Tree Pruning Residues of Urban Areas of Northeast Brazil. **Resources**, v. 13, n. 9, p. 127, 2024.

ARENA, Umberto *et al.* A life cycle analysis of two combustion-and gasification-based waste-to-energy units. In: **Proceedings Venice 2014, Fifth International Symposium on Energy from Biomass and Waste**. CISA Publisher-Gruppo EUROWASTE, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) (2014). NBR ISO 14040: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2014a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) (2014). NBR ISO 14044: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2014b.

BATISTA, Marcio *et al.* A framework for sustainable and integrated municipal solid waste management: Barriers and critical factors to developing countries. **Journal of Cleaner Production**, v. 312, p. 127516, 2021.

BEIGL, Peter; LEBERSORGER, Sandra; SALHOFER, Stefan. Modelling municipal solid waste generation: A review. **Waste management**, v. 28, n. 1, p. 200-214, 2008.

BHADA-TATA, Perinaz; HOORNWEG, Daniel A. What a waste?: a global review of solid waste management. 2012.

BING, Xiaoyun *et al.* Global reverse supply chain redesign for household plastic waste under the emission trading scheme. **Journal of cleaner production**, v. 103, p. 28-39, 2015.

BUI, Tat-Dat *et al.* Opportunities and challenges for solid waste reuse and recycling in emerging economies: A hybrid analysis. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 177, p. 105968, 2022.

BUNSAN, Sond *et al.* Modeling the dioxin emission of a municipal solid waste incinerator using neural networks. **Chemosphere**, v. 92, n. 3, p. 258-264, 2013.

BRANCO, José Eduardo Holler et al. Evaluation of the greenhouse gas emissions of the Brazilian biodiesel and the impact of the mandatory blending of the biofuel into commercial diesel fuel. *Chemosphere*, v. 376, p. 144268, 2025.

BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Resolução ANP nº 30, de 5 de agosto de 2016. Estabelece a especificação do óleo diesel BX contendo teor de biodiesel superior ao limite obrigatório e igual ou inferior a 30% em volume. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 152, p. 55–56, 10 ago. 2016.

BRASIL. Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN). Resolução nº 396, de 13 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os limites de peso e as tolerâncias para veículos que transitem por vias terrestres. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 22 dez. 2011.

BRASIL. Decreto nº 7.405, de 23 de dezembro de 2010. Institui o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implementação de Sistemas de Logística Reversa. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ano 147, n. 246, p. 3, 24 dez. 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/decreto/d7405.htm. Acesso em: 24 jun. 2024.

BRASIL. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA. Relatório nacional de acompanhamento dos Objetivos de Desenvolvimento do Milênio: 2004. Brasília: IPEA, 2004. Disponível em: https://www.gov.br/abc/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/documentos/1_relatorionacionalacompanhamentoodm.pdf. Acesso em: 13 maio 2025.

BRASIL. Lei nº 11.097, de 13 de janeiro de 2005. Introduz o uso de biodiesel na matriz energética brasileira, altera as Leis nºs 9.478, de 6 de agosto de 1997, e 10.636, de 30 de dezembro de 2002, e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ano 142, n. 10, p. 1, 14 jan. 2005.

BRASIL. Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009. Institui a Política Nacional sobre Mudanças Climáticas. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, p. 2, 30 dez. 2009. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2009/Lei/L12187.htm. Acesso em: 12 jun. 2024.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 03 mai. 2024.

BRASIL. Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017. Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ano 154, n. 247, p. 1, 27 dez. 2017.

BRASIL. Lei nº 14.993, de 8 de outubro de 2024. Institui a Política Nacional de Qualidade do Ar e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 9 out. 2024. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2024/lei-14993-8-outubro-2024-796443-publicacaooriginal-173317-pl.html>. Acesso em: 10 abr. 2025.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Relatório de consolidação dos testes para validação da utilização de misturas com Biodiesel B10 em motores e veículos. Grupo de Trabalho para Testes com Biodiesel (Portarias MME nº 262/2016 e nº 80/2017). Brasília: MME, 2018.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Agenda 21: Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 1996. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/agenda21/>. Acesso em: 24 jun. 2024.

BRASIL. Ministério do meio ambiente. Portaria nº 2, de 5 de janeiro de 2023. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 5 jan. 2023.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Qualidade Ambiental. Plano Nacional de Resíduos Sólidos: Planares. Brasília, DF: MMA, 2022. 209 p. ISBN 978-65-88265-15-4. Disponível em: <https://portal-api.sinir.gov.br/wp-content/uploads/2022/07/Planares-B.pdf>. Acesso em: 24 jun. 2024.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. Portaria GM/MMA nº 1.250, de 13 de dezembro de 2024. Regula e estabelece procedimentos relativos à apresentação, análise, aprovação, acompanhamento, monitoramento, prestação de contas e avaliação de resultados das propostas e projetos do mecanismo de Incentivo à Indústria e à Cadeia Produtiva da Reciclagem. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, ano 161, n. 241, p. 152, 16 dez. 2024. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gm/mma-n-1.250-de-13-de-dezembro-de-2024-601717295>. Acesso em: 24 jun. 2024.

BRASIL. *Plano Nacional sobre Mudança do Clima*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2008. Disponível em: http://www.mma.gov.br/estruturas/smcq_climaticas/_arquivos/plano_nacional_mudanca_clima.pdf. Acesso em: 29 maio 2024

BRASIL. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS). *Diagnóstico Temático: Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos*. Brasília: SNIS, 2023. Disponível em: <http://www.snis.gov.br>. Acesso em: 4 jun. 2024.

BUNSAN, Sond *et al.* Modeling the dioxin emission of a municipal solid waste incinerator using neural networks. **Chemosphere**, v. 92, n. 3, p. 258-264, 2013.

CAMPOS, Heliana Kátia Tavares. Recycling in Brazil: Challenges and prospects. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 85, p. 130-138, 2014.

CAO, C. Sustainability and life assessment of high strength natural fibre composites in construction. In: **Advanced high strength natural fibre composites in construction**. Woodhead Publishing, 2017. p. 529-544.

CARVALHO, M.; DELGADO, D.B.M. Potential of photovoltaic solar energy to reduce the carbon footprint of the Brazilian electricity matrix. **LALCA: Revista Latino-Americana em Avaliação do Ciclo de Vida**, v. 1, n. 1, p. 64-85, 2017.

CARVALHO, M. *et al.* Urban pruning waste: carbon footprint associated with energy

generation and prospects for clean development mechanisms. **Revista Árvore**, v. 43, p. e430405, 2019.

Conselho Nacional de Política Energética (CNPE). Resolução nº 6, de 19 de fevereiro de 2025. Estabelece o teor obrigatório de biodiesel no óleo diesel comercializado no território nacional. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 20 fev. 2025. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-cnpe-n-6-de-19-de-fevereiro-de-2025-541122710>. Acesso em: 6 ago. 2025.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM – CEMPRE. Pesquisa Ciclossoft 2012. São Paulo: CEMPRE, 2012. Disponível em: <http://www.cempre.org.br>. Acesso em: 18 maio 2023.

ÇETINKAYA, Afşın Yusuf; BILGILI, Levent; KUZU, S. Levent. Life cycle assessment and greenhouse gas emission evaluation from Aksaray solid waste disposal facility. **Air Quality, Atmosphere & Health**, v. 11, p. 549-558, 2018.

CETRULO, Tiago Balieiro *et al.* Effectiveness of solid waste policies in developing countries: A case study in Brazil. **Journal of cleaner production**, v. 205, p. 179-187, 2018.

CHAVES, Gisele de Lorena Diniz; BATALHA, Mário Otávio. Os consumidores valorizam a coleta de embalagens recicláveis? Um estudo de caso da logística reversa em uma rede de hipermercados. **Gestão & Produção**, v. 13, p. 423-434, 2006.

CHI, Xinwen *et al.* Informal electronic waste recycling: A sector review with special focus on China. **Waste management**, v. 31, n. 4, p. 731-742, 2011.

CHIEN, Chen-Fu *et al.* Solid waste management in emerging economies: Opportunities and challenges for reuse and recycling. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 188, p. 106635, 2023.

CHOKHANDRE, Praveen; SINGH, Shrikant; KASHYAP, Gyan Chandra. Prevalence, predictors and economic burden of morbidities among waste-pickers of Mumbai, India: a cross-sectional study. **Journal of occupational medicine and toxicology**, v. 12, p. 1-8, 2017.

CHRISTIDIS, Panayotis *et al.* Pesquisa e inovação abrindo caminho para a neutralidade climática no transporte urbano: Análise de 362 cidades em sua jornada rumo à emissão zero. **Transport Policy**, v. 148, p. 107-123, 2024.

CLIMATE ACTION TRACKER. Brazil – Assessment – 05/12/2023. Disponível em: <https://climateactiontracker.org/countries/brazil/2023-12-05/>. Acesso em: 29 maio 2024.

COELHO FILHO, Osmar; SACCARO JUNIOR, Nilo Luiz; LUEDEMANN, Gustavo. A avaliação de ciclo de vida como ferramenta para a formulação de políticas públicas no Brasil. Brasília, DF: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – Ipea, 2016. (Texto para Discussão, n. 2205).

Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento. Rio de Janeiro, 1992. Disponível em: < <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em: 26 jun. 2024.

COUTH, R.; TROIS, C. Sustainable waste management in Africa through CDM projects. **Waste management**, v. 32, n. 11, p. 2115-2125, 2012.

DE ALMEIDA, Ronei; DE SOUZA, Roberta Guimarães; CAMPOS, Juacyara Carbonelli. Lessons and challenges for the recycling sector of Brazil from the pandemic outbreak of COVID-19. **Waste Disposal & Sustainable Energy**, v. 3, n. 2, p. 145-154, 2021.

DE BERCEGOL, Rémi; CAVÉ, Jérémie; NGUYEN THAI HUYEN, Arch. Waste municipal service and informal recycling sector in fast-growing Asian cities: Co-existence, opposition or integration?. **Resources**, v. 6, n. 4, p. 70, 2017.

DE CASTILHOS JUNIOR, Armando Borges *et al.* Recyclable material waste pickers: An analysis of working conditions and operational infrastructure in the south, southeast and northeast of Brazil. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 18, n. 11, p. 3115, 2013.

DE LAS NIEVES CAMACHO, María; JURBURG, Daniel; TANCO, Martín. Hydrogen fuel cell heavy-duty trucks: Review of main research topics. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, n. 68, p. 29505-29525, 2022.

DE SOUSA DUTRA, Renato Meira; YAMANE, Luciana Harue; SIMAN, Renato Ribeiro. Influence of the expansion of the selective collection in the sorting infrastructure of waste pickers' organizations: A case study of 16 Brazilian cities. **Waste Management**, v. 77, p. 50-58, 2018.

DELORME, Antoine; KARBOWSKI, Dominik; SHARER, Phil. Evaluation of fuel consumption potential of medium and heavy duty vehicles through modeling and simulation. Argonne National Lab.(ANL), Argonne, IL (United States), 2010.

DUAN, Luchun *et al.* Managing long-term polycyclic aromatic hydrocarbon contaminated soils: a risk-based approach. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 22, p. 8927-8941, 2015.

ECOINVENT, 2023. Ecoinvent Database. Disponível em: <https://ecoinvent.org/> acesso em 18 de junho de 2024.

EBI, Kristie L.; HESS, Jeremy J. Health Risks Due To Climate Change: Inequity In Causes And Consequences: Study examines health risks due to climate change. **Health Affairs**, v. 39, n. 12, p. 2056-2062, 2020.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). *Inventory of U.S. greenhouse gas emissions and sinks: 1990-2020*. Disponível em: <https://www.epa.gov/ghgemissions/inventory-us-greenhouse-gas-emissions-and-sinks-1990-2020>. Acesso em: 17 nov. 2024.

FAN, Jianqiang *et al.* A review of transportation carbon emissions research using bibliometric analyses. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*,

2023.

FARACA, Giorgia *et al.* Combustible waste collected at Danish recycling centres: Characterisation, recycling potentials and contribution to environmental savings. **Waste management**, v. 89, p. 354-365, 2019.

FARACA, Giorgia; MARTINEZ-SANCHEZ, Veronica; ASTRUP, Thomas F. Environmental life cycle cost assessment: Recycling of hard plastic waste collected at Danish recycling centres. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 143, p. 299-309, 2019.

FATTOR, Marcus Vinícius; VIEIRA, Melissa Gurgel Adeodato. Application of human HAZOP technique adapted to identify risks in Brazilian waste pickers' cooperatives. **Journal of Environmental Management**, v. 246, p. 247-258, 2019.

FERNANDES, Edésio. Política urbana na Constituição Federal de 1988 e além: implementando a agenda da reforma urbana no Brasil. Fórum de direito urbano e ambiental, 2008.

FERNÁNDEZ-GONZALEZ, Jose-Manuel *et al.* Economic and environmental review of Waste-to-Energy systems for municipal solid waste management in medium and small municipalities. **Waste Management**, v. 67, p. 360-374, 2017.

FERRONATO, Navarro *et al.* Application of a life cycle assessment for assessing municipal solid waste management systems in Bolivia in an international cooperative framework. **Waste Management & Research**, v. 38, n. 1, p. 98-116, 2020.

FINNVEDEN, Göran *et al.* Recent developments in life cycle assessment. **Journal of environmental management**, v. 91, n. 1, p. 1-21, 2009.

FLOR, F. J. *et al.* Environmental impact of oak barrels production in Qualified Designation of Origin of Rioja. **Journal of cleaner production**, v. 167, p. 208-217, 2017.

FNEM – Fórum Nacional de Entidades Metropolitanas. Disponível em: <https://fnembrasil.org/regiao-metropolitana-de-itabaiana-pb/>. Acesso em: 01 mai. 2024.

GAUTAM, Meenu; AGRAWAL, Madhoolika. Greenhouse gas emissions from municipal solid waste management: A review of global scenario. **Carbon footprint case studies: municipal solid waste management, sustainable road transport and carbon sequestration**, p. 123-160, 2020.

GE, Mengpin; FRIEDRICH, Johannes; VIGNA, Leandro. Charts explain greenhouse gas emissions by countries and sectors. **World Resources Institute**, v. 6, p. 2020, 4.

GEISSDOERFER, Martin *et al.* The Circular Economy—A new sustainability paradigm?. **Journal of cleaner production**, v. 143, p. 757-768, 2017.

GHISOLFI, Verônica *et al.* System dynamics applied to closed loop supply chains of desktops and laptops in Brazil: A perspective for social inclusion of waste pickers. **Waste**

Management, v. 60, p. 14-31, 2017.

GIUGLIANO, Michele *et al.* Material and energy recovery in integrated waste management systems. An evaluation based on life cycle assessment. **Waste management**, v. 31, n. 9-10, p. 2092-2101, 2011

GRIMBERG, E.; BLAUTH, P. Coleta seletiva de lixo: reciclando materiais, reciclando valores. *Polis*, n. 31, p. 1-100, 1998.

GUTBERLET, Jutta; BAEDER, Angela M. Informal recycling and occupational health in Santo André, Brazil. **International journal of environmental health research**, v. 18, n. 1, p. 1-15, 2008.

GUTBERLET, Jutta. **Recovering resources-recycling citizenship: Urban poverty reduction in Latin America**. Routledge, 2016.

GUTBERLET, Jutta *et al.* Waste picker organizations and their contribution to the circular economy: Two case studies from a global south perspective. **Resources**, v. 6, n. 4, p. 52, 2017.

HANSER, Ogier *et al.* Occupational exposure to metals among battery recyclers in France: biomonitoring and external dose measurements. **Waste Management**, v. 150, p. 122-130, 2022.

HAYWOOD, Luke; JAKOB, Michael. The role of the emissions trading scheme 2 in the policy mix to decarbonize road transport in the European Union. **Transport Policy**, v. 139, p. 99-108, 2023.

HERRMANN, Ivan T.; MOLTESSEN, Andreas. Does it matter which Life Cycle Assessment (LCA) tool you choose?—a comparative assessment of SimaPro and GaBi. **Journal of Cleaner Production**, v. 86, p. 163-169, 2015.

HOSSAIN, MD Shouquat *et al.* Narrowing fossil fuel consumption in the Indian road transport sector towards reaching carbon neutrality. **Energy Policy**, v. 172, p. 113330, 2023a

HOSSAIN, MD Shouquat *et al.* The role of electric vehicles in decarbonizing India's road passenger toward carbon neutrality and clean air: a state-level analysis. **Energy**, v. 273, p. 127218, 2023b.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades e Estados. IBGE. 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pb/itabaiana.html>. Acesso em: 01 mai. 2024.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Projeção da População do Brasil e das Unidades da Federação. IBGE 2017 Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/index.html>. Acesso em: 25 jun. 2024.

IBIAPINA, Iveltyma Roosemalen Passos; OLIVEIRA, Talyta Eduardo; LEOCADIO, Áurio Lúcio. As políticas públicas e os resíduos sólidos urbanos na Alemanha e no Brasil. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE ADMINISTRAÇÃO MUNICIPAL – IBAM. Manual: gerenciamento integrado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: IBAM/SEDU-PR, 2001.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2017**. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB). 2018.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO. **ISO 14040**: Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. Geneva, 2006a.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO. **ISO 14044**: Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines, Geneva, 2006b.

IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

IPCC - Intergovernmental Panel On Climate Change -. Climate Change 2021. The Physical Science Basis. Summary for Policymakers. Available at: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf . acesso em 18 de junho de 2024.

IQBAL, Mehreen *et al.* E-waste driven pollution in Pakistan: the first evidence of environmental and human exposure to flame retardants (FRs) in Karachi City. **Environmental science & technology**, v. 51, n. 23, p. 13895-13905, 2017.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO. **ISO 14040**: Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. Geneva, 2006a.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO. **ISO 14044**: Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines, Geneva, 2006b.

JAYAKRISHNAN, Thayyil; JEEJA, Mathummal Cherumanalil; BHASKAR, Rao. Occupational health problems of municipal solid waste management workers in India. **International Journal of Environmental Health Engineering**, v. 2, n. 1, p. 42, 2013.

JESWANI, Harish K.; AZAPAGIC, Adisa. Avaliando a sustentabilidade ambiental da recuperação energética de resíduos sólidos urbanos no Reino Unido. **Waste Management** , v. 50, p. 346-363, 2016.

KAZA, Silpa *et al.* **What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050**. World Bank Publications, 2018.

KERDLAP, Piya *et al.* Comparing the environmental performance of distributed versus centralized plastic recycling systems: applying hybrid simulation modeling to life cycle assessment. **Journal of Industrial Ecology**, v. 26, n. 1, p. 252-271, 2022.

KESKIN, Merve; ÇATAY, Bülent; LAPORTE, Gilbert. A simulation-based heuristic for the electric vehicle routing problem with time windows and stochastic waiting times at recharging stations. **Computers & Operations Research**, v. 125, p. 105060, 2021.

KHANDELWAL, Harshit *et al.* Application of life cycle assessment in municipal solid waste management: A worldwide critical review. **Journal of cleaner production**, v. 209, p. 630-654, 2019.

KING, Megan F.; GUTBERLET, Jutta. Contribution of cooperative sector recycling to greenhouse gas emissions reduction: A case study of Ribeirão Pires, Brazil. **Waste management**, v. 33, n. 12, p. 2771-2780, 2013.

KIRCHHERR, Julian; REIKE, Denise; HEKKERT, Marko. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. **Resources, conservation and recycling**, v. 127, p. 221-232, 2017.

KHOO, Hsien H. Life cycle impact assessment of various waste conversion technologies. **Waste management**, v. 29, n. 6, p. 1892-1900, 2009.

KING, Megan F.; GUTBERLET, Jutta. Contribution of cooperative sector recycling to greenhouse gas emissions reduction: A case study of Ribeirão Pires, Brazil. **Waste management**, v. 33, n. 12, p. 2771-2780, 2013.

KIRCHHERR, Julian; REIKE, Denise; HEKKERT, Marko. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. **Resources, conservation and recycling**, v. 127, p. 221-232, 2017.

KUMARI, Hina; YADAV, Sudesh. A comparative study on metal pollution from surface dust of informal and formal e-waste recycling sectors in national capital region of New Delhi and associated risk assessment. **Science of The Total Environment**, v. 904, p. 166791, 2023.

KULCZYCKA, Joanna *et al.* Life Cycle Assessment of Municipal Solid Waste Management--Comparison of Results Using Different LCA Models. **Polish Journal of Environmental Studies**, v. 24, n. 1, 2015.

LAI, Xin *et al.* Critical review of life cycle assessment of lithium-ion batteries for electric vehicles: A lifespan perspective. **Etransportation**, v. 12, p. 100169, 2022.

LAURENT, Alexis *et al.* Review of LCA studies of solid waste management systems--Part II: Methodological guidance for a better practice. **Waste management**, v. 34, n. 3, p. 589-606, 2014.

LEE, Dong-Yeon *et al.* Life-cycle implications of hydrogen fuel cell electric vehicle technology for medium-and heavy-duty trucks. **Journal of Power Sources**, v. 393, p. 217-229, 2018.

LIEDER, Michael; RASHID, Amir. Towards circular economy implementation: a comprehensive review in context of manufacturing industry. **Journal of cleaner production**, v. 115, p. 36-51, 2016.

LIU, Zhe; ADAMS, Michelle; WALKER, Tony R. Are exports of recyclables from developed to developing countries waste pollution transfer or part of the global circular economy?. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 136, p. 22-23, 2018.

LORENZI, Guido; BAPTISTA, Patrícia. Promotion of renewable energy sources in the Portuguese transport sector: A scenario analysis. **Journal of cleaner production**, v. 186, p. 918-932, 2018.

MA, Yulong *et al.* Formal waste treatment facilities as a source of halogenated flame retardants and organophosphate esters to the environment: A critical review with particular focus on outdoor air and soil. **Science of the Total Environment**, v. 807, p. 150747, 2022.

MA, Yulong *et al.* Human exposure to halogenated and organophosphate flame retardants through informal e-waste handling activities-A critical review. **Environmental Pollution**, v. 268, p. 115727, 2021.

MAHESHWARI, Pranjali *et al.* A review on latest trends in cleaner biodiesel production: Role of feedstock, production methods, and catalysts. **Journal of Cleaner Production**, v. 355, p. 131588, 2022.

MAKUZA, Brian *et al.* Pyrometallurgical options for recycling spent lithium-ion batteries: A comprehensive review. **Journal of Power Sources**, v. 491, p. 229622, 2021.

MANDPE, Ashootosh *et al.* Life-cycle assessment approach for municipal solid waste management system of Delhi city. **Environmental Research**, v. 212, p. 113424, 2022.

MARINO, Arthur Lima; CHAVES, Gisele de Lorena Diniz; DOS SANTOS JUNIOR, Jorge Luiz. Do Brazilian municipalities have the technical capacity to implement solid waste management at the local level?. **Journal of Cleaner Production**, v. 188, p. 378-386, 2018.

MARTÍNEZ-GONZÁLEZ, Aldemar *et al.* Comparison of potential environmental impacts on the production and use of high and low sulfur regular diesel by life cycle assessment. CT&F-Ciencia, **Tecnología y Futuro**, v. 4, n. 4, p. 123-138, 2011.

MARQUES, António Cardoso; FUINHAS, José Alberto; TOMÁS, Carla. Energy efficiency and sustainable growth in industrial sectors in European Union countries: A nonlinear ARDL approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 239, p. 118045, 2019.

MATURA, Ashish; SINGH, Rahul Kumar; KUMAR, Rajeev. Decarbonizing road transport: A systematic literature review based on use case analysis. *Case Studies on Transport Policy*, p. 101416, 2025.

MENDELEY DESKTOP. [s.l.]: Mendeley Ltd., 2008. Disponível em: <https://www.mendeley.com>. Acesso em: 13 jun. 2024.

MESSAGIE, Maarten *et al.* Life Cycle Assessment of conventional and alternative small passenger vehicles in Belgium. In: 2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. IEEE, 2010. p. 1-5.

MESQUITA, Julia Luz Camargos *et al.* Greenhouse Gas Emission Reduction Based on Social Recycling: A Case Study with Waste Picker Cooperatives in Brasília, Brazil. **Sustainability**, v. 15, n. 12, p. 9185, 2023.

MILES-NOVELO, Andreas; ANDERSON, Craig A. Climate change and psychology: Effects of rapid global warming on violence and aggression. **Current Climate Change Reports**, v. 5, p. 36-46, 2019.

MILLER, Leslie A.; RAMASWAMI, Anu; RANJAN, Ravi. Contribution of water and wastewater infrastructures to urban energy metabolism and greenhouse gas emissions in cities in India. **Journal of Environmental Engineering**, v. 139, n. 5, p. 738-745, 2013.

MIKLAUTSCH, Philipp; WOSCHANK, Manuel. Uma estrutura de medidas para mitigar as emissões de gases de efeito estufa no transporte de cargas: revisão sistemática da literatura sob a perspectiva do fabricante. *Journal of Cleaner Production*, v. 366, p. 132883, 2022.

MOL, Marcos PG *et al.* Assessment of work-related accidents associated with waste handling in Belo Horizonte (Brazil). **Waste Management & Research**, v. 35, n. 10, p. 1084-1092, 2017.

NOBREGA, C.C. *et al.* Avaliação do ciclo de vida da coleta seletiva de papel e papelão no núcleo do Bessa, município de João Pessoa (PB), Brasil. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 24, p. 875-886, 2019

ONS – Operador Nacional do Sistema. Resultados da Operação. Dados gerais. (2024). Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/dados-gerais> Acesso em 15 de maio de 2025.

ONU BRASIL. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável – ODS. [S. l.]: Nações Unidas Brasil, 2023. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 1 ago. 2025.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. ONU Brasil. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br>. Acesso em: 13 maio 2025.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Transformando Nosso Mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. 2015. Disponível em: <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld>. Acesso em: 25 jun. 2024.

PAES, Michel Xocaira *et al.* Municipal solid waste management: Integrated analysis of environmental and economic indicators based on life cycle assessment. **Journal of cleaner**

production, v. 254, p. 119848, 2020.

PAL, Preeti; GOPAL, P. R. C.; RAMKUMAR, M. Impact of transportation on climate change: An ecological modernization theoretical perspective. **Transport Policy**, v. 130, p. 167-183, 2023.

PAUER, Erik; WOHNER, Bernhard; TACKER, Manfred. The influence of database selection on environmental impact results. Life cycle assessment of packaging using gabi, ecoinvent 3.6, and the environmental footprint database. **Sustainability**, v. 12, n. 23, p. 9948, 2020.

PBGÁS – Companhia Paraibana de Gás. Postos e convertedoras. João Pessoa. Disponível em: <https://pbgas.com.br/postos-e-convertedoras/>. Acesso em: 14 abr. 2025.

PORZIO, Jason; SCOWN, Corinne D. Life-cycle assessment considerations for batteries and battery materials. **Advanced Energy Materials**, v. 11, n. 33, p. 2100771, 2021.

PRAJAPATI, Himanshu; KANT, Ravi; SHANKAR, Ravi. Bequeath life to death: State-of-art review on reverse logistics. **Journal of cleaner production**, v. 211, p. 503-520, 2019.

PRÉ SUSTAINABILITY, 2023. Simapro Software. Disponível em: <https://simapro.com/> acesso em 18 de junho de 2024.

REBEHY, Perla Calil Pongeluppe Wadhy *et al.* Reverse logistics systems in Brazil: Comparative study and interest of multistakeholders. **Journal of environmental management**, v. 250, p. 109223, 2019.

ROJAS C, Ailyn *et al.* The potential benefits of introducing informal recyclers and organic waste recovery to a current waste management system: The case study of Santiago de Chile. **Resources**, v. 7, n. 1, p. 18, 2018.

SANJEEVI, V.; SHAHABUDEEN, P. Development of performance indicators for municipal solid waste management (PIMS): A review. **Waste Management & Research**, v. 33, n. 12, p. 1052-1065, 2015.

Santos, T. B. (2014). Análise das emissões gasosas e desempenho de grupo gerador operando com combustíveis de mistura diesel e biodiesel. Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial da Universidade Federal da Bahia.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística. Plano Estadual de Energia 2050 – Consulta Pública. São Paulo: Governo do Estado de São Paulo, 2023. Disponível em: <https://smastr16.blob.core.windows.net/2001/2023/11/Plano-Estadual-de-Energia-2050-RtZ-Consulta-Publica-1.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2025.

SHRUTI, V. C. *et al.* An assessment of higher-value recyclable wastes in Mexico City households using a novel waste collector citizen science approach. **Science of The Total Environment**, v. 863, p. 161024, 2023.

Silva, C., & Rivera, A. (Eds.). (2013). *Diesel Fuels: Characteristics, Performances and Environmental Impacts*. Nova Science Publishers.

SILVA, Sandro Pereira. A organização coletiva de catadores de material reciclável no Brasil: dilemas e potencialidades sob a ótica da economia solidária. *Texto para Discussão*, 2017.

SILVA DE SOUZA LIMA, Nathalia; MANCINI, Sandro Donnini. Integration of informal recycling sector in Brazil and the case of Sorocaba City. **Waste Management & Research**, v. 35, n. 7, p. 721-729, 2017.

SIPPEL, Sebastian *et al.* Climate change now detectable from any single day of weather at global scale. **Nature climate change**, v. 10, n. 1, p. 35-41, 2020.

SISTEMA BRASILEIRO DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES E REMOÇÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA (SEEG). Emissões por setor: Transportes. 2020. Disponível em: https://seeg.obass.info/linha/#elementor-toc__heading-anchor-7. Acesso em: 13 abr. 2025.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE A GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS (SINIR). O que é Logística Reversa. Brasília, DF: MMA, 2025. Disponível em: <https://sinir.gov.br/perfis/logistica-reversa/logistica-reversa>. Acesso em: 4 ago. 2025.

SPEIRS, D.; TUCKER, P. A profile of recyclers making special trips to recycle. **Journal of Environmental Management**, v. 62, n. 2, p. 201-220, 2001.

SPREAFICO, Christian; LANDI, Daniele; RUSSO, Davide. A new method of patent analysis to support prospective life cycle assessment of eco-design solutions. **Sustainable Production and Consumption**, v. 38, p. 241-251, 2023.

STEFFEN, Will *et al.* Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. **science**, v. 347, n. 6223, p. 1259855, 2015.

SUNDIN, Erik *et al.* Improving the layout of recycling centres by use of lean production principles. **Waste Management**, v. 31, n. 6, p. 1121-1132, 2011.

SYMANSKI, Elaine *et al.* Data to action: community-based participatory research to address concerns about metal air pollution in overburdened neighborhoods near metal recycling facilities in Houston. **Environmental Health Perspectives**, v. 131, n. 6, p. 067006, 2023.

TCHOBANOGLIOUS, George. Solid waste management. **Environmental engineering: environmental health and safety for municipal infrastructure, land use and planning, and industry**. Wiley, New Jersey, p. 177-307, 2009.

TIRADO-SOTO, Magda Martina; ZAMBERLAN, Fabio Luiz. Networks of recyclable material waste-picker's cooperatives: An alternative for the solid waste management in the city of Rio de Janeiro. **Waste management**, v. 33, n. 4, p. 1004-1012, 2013.

TUBIELLO, Francesco N. *et al.* The contribution of agriculture, forestry and other land use activities to global warming, 1990–2012. **Global change biology**, v. 21, n. 7, p. 2655-2660, 2015.

UMAIR, Shakila; ANDERBERG, Stefan; POTTING, José. Informal electronic waste recycling in Pakistan. **The Journal of Solid Waste Technology and Management**, v. 42, n. 3, p. 222-235, 2016.

UNCTAD. *Economic trends in Africa*. Genebra: United Nations Conference on Trade and Development, 2022. Disponível em: https://unctad.org/system/files/official-document/tdstat45_FS11_en.pdf. Acesso em: 7 jan. 2022.

UNEP - United Nations Environment Programme. Global Waste Management Outlook 2024. UNEP, 2024. Disponível em: <https://www.unep.org/ietc/resources/report/global-waste-management-outlook-2024>. Acesso em: 1 abr. 2025.

VOLKSWAGEN. Instruções de operação: Delivery 8-160, Delivery 9-160. Edição 05/2012. [S.l.]: Volkswagen Caminhões e Ônibus, 2012. Manual do proprietário.

WÄGER, Patrick A.; HISCHIER, Roland. Life cycle assessment of post-consumer plastics production from waste electrical and electronic equipment (WEEE) treatment residues in a Central European plastics recycling plant. **Science of the Total Environment**, v. 529, p. 158-167, 2015.

WANG, Q.; WALTMAN, L. Large-scale analysis of the accuracy of the journal classification systems of Web of Science and Scopus. **Journal of Informetrics**, v. 10, n. 2, p. 347–364, 2016.

WEGER, Lindsey B.; LEITAO, Joana; LAWRENCE, Mark G. Expected impacts on greenhouse gas and air pollutant emissions due to a possible transition towards a hydrogen economy in German road transport. **International journal of hydrogen energy**, v. 46, n. 7, p. 5875-5890, 2021.

WÜNSCH, Christoph; KOCINA, Robin. Global development of greenhouse gas emissions in the waste management sector. **Detritus**, v. 7, p. 104-118, 2019.

YADAV, Pooja; SAMADDER, S. R. Life cycle assessment of solid waste management options: A Review. **Recent research in Science and Technology**, v. 6, n. 1, 2014.

YAY, A. Suna Erses. Aplicação da avaliação do ciclo de vida (ACV) na gestão de resíduos sólidos urbanos: um estudo de caso de Sakarya. **Journal of cleaner production**, v. 94, p. 284-293, 2015.

ZHANG, Chaofan *et al.* Recovery of porous silicon from waste crystalline silicon solar panels for high-performance lithium-ion battery anodes. **Waste Management**, v. 135, p. 182-189, 2021.

ZHAO, Wei *et al.* Life cycle assessment of municipal solid waste management with regard to greenhouse gas emissions: case study of Tianjin, China. **Science of the total environment**, v. 407, n. 5, p. 1517-1526, 2009.

ZIEGLER, David; ABDELKAFI, Nizar. Business models for electric vehicles: Literature review and key insights. **Journal of Cleaner Production**, v. 330, p. 129803, 2022.

ZOLNIKOV, Tara Rava *et al.* Ineffective waste site closures in Brazil: A systematic review on continuing health conditions and occupational hazards of waste collectors. **Waste management**, v. 80, p. 26-39, 2018.