

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL  
CURSO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

SACHI ESPINDOLA KOBIYAMA

**Avaliação das Emissões de Gases de Efeito Estufa no Gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos: Análise das Emissões Diretas e Evitadas de Dióxido de Carbono Equivalente**

Florianópolis, Santa Catarina.

2022

Sachi Espindola Kobiyama

**Avaliação das Emissões de Gases de Efeito Estufa no Gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos: Análise das Emissões Diretas e Evitadas de Dióxido de Carbono Equivalente**

Trabalho de conclusão de curso da graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Orientador: Marcelo Seleme Matias, Dr.

Florianópolis, Santa Catarina

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

kobiyama, sachi

Avaliação das Emissões de Gases de Efeito Estufa no Gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos: Análise das Emissões Diretas e Evitadas de Dióxido de Carbono Equivalente / sachi kobiyama ; orientador, Marcelo Seleme Matias, 2022.

109 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Resíduos Sólidos Urbanos. 3. Emissão de GEE. 4. Gestão de Resíduos. I. Seleme Matias, Marcelo . II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. III. Título.

Sachi Espindola Kobiyama

**Estudo Ambiental dos Modelos de Gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos: Análise das Emissões Diretas e Evitadas de Dióxido de Carbono Equivalente**

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenharia Sanitária e Ambiental e aprovado em sua forma final pelo Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental

Florianópolis, 28 de julho de 2022

---

Prof. Dr. Maria Elisa Magri  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

---

Marcelo Seleme Matias  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Bruno Vieira Luiz  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Karina da Silva de Souza  
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado à minha família.

## AGRADECIMENTOS

À minha família, por sempre me verem capaz de ir mais longe. À minha mãe, por me dar a vida, todos os dias. Por garantir minha saúde física e emocional, pela generosidade de doar seu tempo e seu colo em qualquer momento. Ao meu pai, por ter me ensinado sobre dedicação e comprometimento. Por ter oferecido todas as condições necessárias para concluir os estudos e alcançar mais essa vitória.

Aos meus amigos de graduação, pela parceria de horas na BU, noites mal dormidas e de cafezinhos no CETEC. Em especial a Helena, Lais e Daniela por tornarem o caminho da graduação em engenharia mais alegre do começo ao fim. Sou eternamente grata pela parceira dos meus amigos Eduardo Boder e Laerte, as matérias com vocês foram definitivamente mais leves.

Ao Matheus, pelo amor e constante apoio, por me ajudar a enfrentar todos os desafios nos últimos anos. Aos meus amigos da vida, por formarem uma rede de apoio maravilhosa, sempre presentes independente da distância e loucura do cotidiano.

Aos meus chefes, Felipe e Mariana, por me mostrarem que eu quero e gosto de trabalhar com saneamento. Obrigada pelos ensinamentos diários.

À Universidade Federal de Santa Catarina, por me proporcionar um ensino gratuito e de qualidade. Ao meu orientador, Marcelo Seleme Matias, por tornar esse trabalho possível, pela oportunidade de uma troca tranquila e pelo seu tempo e dedicação.

Ao meu gato e meus cachorros, pela companhia e por me mostrarem um amor genuíno todos os dias.

*“Não é o desafio com que nos deparamos que determina quem  
somos e o que estamos nos tornando mas a maneira com que  
respondemos ao desafio...”*

*Henfil*

## RESUMO

Os resíduos sólidos urbanos (RSU) são um desafio mundial, uma vez que a sua produção está estreitamente ligada ao crescimento populacional. De 2010 até 2019, a geração de RSUs no Brasil passou de 67 milhões para 79 milhões de toneladas por ano. Segundo Maimunah Sharif, chefe do programada Nações Unidas para Assentamentos Humanos, anualmente são produzidas 2 bilhões de toneladas de resíduos no mundo. Diferentes processos relacionados à geração e à gestão dos RSUs emitem de forma direta e indiretamente Gases do Efeito Estufa (GEE). As emissões ocorrem desde a extração de matérias primas até a destinação final, sendo ela adequada ou não. Considerando a relevância do tema, em especial no âmbito das mudanças climáticas, no presente estudo, foi realizada a análise das emissões evitadas de CO<sub>2</sub>eq, a partir da reciclagem de resíduos recicláveis secos e compostagem de resíduos orgânicos. A metodologia utilizada foi a revisão bibliográfica, a partir de artigos científicos e fontes validadas, com o objetivo de obtenção de dados quantitativos de emissões em processos de reciclagem e compostagem, em comparação a produção dos mesmos materiais, a partir de matéria prima virgem. Os resultados apontaram que modelos de gestão de reciclagem e compostagem, se operados corretamente, oferecem uma redução significativa das emissões de GEE. Para o plástico reciclado, a redução ficou na ordem de 85% em relação ao processo de produção a partir de matéria prima virgem, e de 83% para compostagem em relação a disposição de resíduos orgânicos em aterros.

**Palavras-chave:** Resíduos sólidos urbanos, gestão de resíduos, GEE, emissões evitadas.



## ABSTRACT

Municipal solid waste (MSW) is a global challenge since its production is closely linked to population growth. From 2010 to 2019, MSW generation in Brazil increased from 67 million to 79 million tons per year. According to Maimunah Sharif, head of the United Nations Human Settlements Programme, 2 billion tons of waste are produced annually in the world. Various processes related to MSW management and generation emit Greenhouse Gases (GHG) directly and indirectly. The emissions occur from the extraction of raw materials to final disposal, whether adequate or not. Considering the relevance of the subject, especially in the context of climate change, this study analyzed the avoided emissions of CO<sub>2</sub>-eq, from the recycling of dry recyclable waste and composting of organic waste. The methodology used was a bibliographic review, based on scientific articles and validated sources, to obtain quantitative data of emissions in recycling and composting processes, compared to the production of the same materials from virgin raw materials. The results indicated that recycling and composting management models, if operated correctly, offer a significant reduction in GHG emissions. For recycled plastic, the reduction was in the order of 85% compared to the production process from virgin raw materials and 83% for composting compared to landfill disposal.

**Keywords:** Municipal solid waste. Waste management. GHG. Avoided emissions.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Emissão de GEE por setor, de 1990 a 2016.....	24
Figura 2 - Estimativas de emissões de CO <sub>2</sub> -eq do setor de tratamento de resíduos por subsector .....	26
Figura 3- Esquema do funcionamento de compostagem por leira .....	31

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Estimativa da composição gravimétrica de resíduos sólidos coletados no Brasil...	32
Quadro 2 -Benefício da Compostagem no Brasil.....	34
Quadro 3 - Dificuldades e oportunidades para o crescimento da compostagem no Brasil .....	34
Quadro 4- Incidências de materiais recicláveis secos recuperados por tipo de material, segundo faixa populacional.....	37
Quadro 5 - Taxa de recuperação de recicláveis em relação ao total coletado (%) nas capitais em 2018 .....	37
Quadro 6 - Índice de reciclagem de resíduos secos provenientes de embalagens.....	38
Quadro 7 - Fator de emissão de CO <sub>2</sub> da Energia elétrica gerada no Brasil.....	42
Quadro 8 - Fator de ajuste para cada tipo de material.....	42
Quadro 9 - Consumo de energia elétrica no processo de reciclagem (SECi) e produção SEBi (Kwh) dos materiais.....	42
Quadro 10 - Composição de Resíduos Sólidos .....	44
Quadro 11 - Parâmetros para cálculo de emissões de CH <sub>4</sub> na linha de base. ....	47
Quadro 12 - Revisão literária preliminar.....	48
Quadro 13 - Revisões de literatura selecionadas para fundamentação dos resultados e discussões .....	50
Quadro 14 - Fator de ajuste para cada tipo de material.....	17
Quadro 15 - Fator de emissão de GEE pela geração de energia.....	17
Quadro 16 - Fator de emissão por quantidade de combustível consumido. ....	17
Quadro 17 - Consumo de energia elétrica para a produção de materiais. ....	18
Quadro 18 - Consumo de combustíveis fósseis para Produção dos Materiais. ....	18
Quadro 19 - Consumo de energia elétrica no processo de reciclagem dos materiais.....	18
Quadro 20 - Consumo de Combustíveis fósseis para reciclagem dos materiais. ....	19
Quadro 21 - Quantidade em kg de cada tipo de material no período entre janeiro e agosto de 2016. ....	17
Quadro 22 - Consumo de energia elétrica no processo de reciclagem dos materiais.....	18
Quadro 23 - Consumo de energia elétrica para a produção de materiais. ....	18
Quadro 24 - Quantidade em Kg de resíduos coletados pelo Ecoelce nos meses da pesquisa. .	16
Quadro 25 - Fator de ajuste para cada tipo de material.....	16
Quadro 26 - Fator de emissão de GEE pela geração de energia.....	17
Quadro 27 - Consumo de energia elétrica no processo de reciclagem dos materiais.....	17

Quadro 28 - Consumo de energia elétrica para a produção de materiais .....	17
Quadro 29 - Fator de emissão por quantidade de combustível fóssil consumido. ....	18
Quadro 30 - Consumo de combustíveis fósseis para Produção dos Materiais. ....	18
Quadro 31 - Toneladas de material considerado nos cálculos de emissões .....	16
Quadro 32 - Fator de ajuste para cada tipo de material .....	16
Quadro 33 - Fator de emissão de GEE pela geração de energia.....	17
Quadro 34 - Consumo de energia elétrica para a produção de materiais. ....	17
Quadro 35 - Fator de combustíveis fósseis para Produção dos Materiais. ....	17
Quadro 36 - Consumo de energia elétrica no processo de reciclagem dos materiais.....	18
Quadro 37 - Consumo de Combustíveis fósseis para reciclagem dos materiais .....	18
Quadro 38 - Emissões provenientes da compostagem .....	18
Quadro 39 - Parâmetros chave para determinar as emissões de GEE em aterro sanitário .....	21
Quadro 40 - Parâmetros para cálculo de emissões de CH <sub>4</sub> na linha de base (aterros sanitários). .....	23
Quadro 41 - Reduções de emissões de CH <sub>4</sub> .....	25
Quadro 42 – Indicadores e suas respectivas descrições utilizados pelo SNIS .....	16

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Massa recuperada de recicláveis secos dos municípios participantes do SNIS, segundo macrorregião geográfica.....	36
Tabela 2 - Análise das quantidades de resíduos recebidas nas unidades de processamento (UP007) de 2010 a 2020.....	16
Tabela 3 - Composição gravimétrica estimada dos resíduos no Brasil.....	17
Tabela 4 - Indicadores sobre coleta seletiva e triagem utilizados pelo SNIS.....	17
Tabela 5 - Potencial de redução das emissões de CO <sub>2</sub> decorrentes das quantidades recuperadas pelas organizações de catadores em 2017.....	16
Tabela 6 - Resultados dos cálculos da emissão de GEE dos resíduos coletados pela CORESO (Método simplificado).....	16
Tabela 7 - Resultados dos cálculos da emissão de GEE dos resíduos coletados no Projeto ECOELCE em 2012.....	16
Tabela 8 - Potencial de redução das emissões de CO <sub>2</sub> decorrentes das quantidades recuperadas em POA em 2013.....	16
Tabela 9- Redução de emissão média por material.....	16
Tabela 10 - Resumo das emissões de cada estudo.....	16
Tabela 11 - Emissão de CO <sub>2</sub> -eq a partir de cada tecnologia analisada.....	16
Tabela 12 - Benefícios dos fertilizantes pela aplicação da compostagem.....	20
Tabela 13 - Resultado dos cálculos da emissão de tCO <sub>2</sub> -eq /ton.....	21
Tabela 14 - Emissões de GEE evitadas pelo processo de compostagem.....	22
Tabela 15 - Emissão evitada, emissão do processo de compostagem e final (tCO <sub>2</sub> -eq /ton de composto).....	22
Tabela 16 - Resíduos Orgânicos coletados de 2010 a 2020.....	16
Tabela 17 - Emissões evitadas pela compostagem de 2010 a 2020.....	16
Tabela 18 - Resíduos coletados e reciclados segundo a série histórica do SNIS.....	17
Tabela 19 - Emissão de tCO <sub>2</sub> -eq evitada pela reciclagem de materiais de 2010 a 2020.....	17

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AR5	Quinto relatório de Avaliação do IPCC
CH <sub>4</sub>	Metano
COD	Carbono Orgânico Degradável
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
CO <sub>2</sub> eq	Dióxido de carbono equivalente
COP	Conferência das Partes
GEE	Gases do Efeito Estufa
GHG	Green House Gas
GWP	Potencial de Aquecimento Global (Global Warming Potential)
HFCs	Hidrofluorcarbonos
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCC	Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
IPEA	Instituto de Pesquisas Econômicas Aplicadas
MCT	Ministério de Ciência e Tecnologia
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
N <sub>2</sub> O	Óxido nitroso
NF <sub>3</sub>	Trifluoreto de nitrogênio
ONU	Organizações das Nações Unidas
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
PFCs	Perfluorcarbonos
PET	Tereftalato de polietileno
PNMC	Política Nacional de Mudanças Climáticas
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RSU	Resíduos Sólidos urbanos
SF <sub>6</sub>	Hexafluoreto de enxofre
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
TMB	Tratamento Mecânico Biológico
tCO <sub>2</sub> eq	Toneladas de dióxido de carbono equivalente

UFSC Universidade Federal de Santa Catarina

UNFCCC Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>18</b>
2.1	OBJETIVO GERAL .....	18
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	18
<b>3</b>	<b>Revisão bibliográfica .....</b>	<b>19</b>
3.1	FONTES GLOBAIS DE EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA.....	19
3.1.1	Histórico de eventos e acordos globais sobre mudanças climáticas.....	19
3.1.2	Dióxido de carbono equivalente (CO <sub>2</sub> -eq) .....	21
3.1.3	Fontes Globais de emissão de GEE .....	22
3.2	GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS E O CLIMA.....	27
3.2.1	Reciclagem de resíduos orgânicos .....	30
3.2.2	Reciclagem de materiais secos .....	35
3.3	MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE EMISSÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA DECORRENTES DAS ATIVIDADES DE GESTÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS. 39	
3.3.1	Metodologia: AMS-III.AJ - Recovery and Recycling of Material from Solid Waste – AMS-III.AJ.....	39
3.3.2	Ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) no Manejo de RSU para o Brasil – Metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).....	43
3.3.3	Metodologia: AMS-III.F – Avoidance of methane emissions through composting.....	45
<b>4</b>	<b>Metodologia .....</b>	<b>48</b>
4.1	IDENTIFICAÇÃO DAS FONTES .....	48
4.2	LEITURA DO MATERIAL .....	49
4.3	ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DE RESULTADOS.....	49
<b>5</b>	<b>ESTUDOS, RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>16</b>
5.1	ESTUDOS E RESULTADOS: RECICLAGEM DE RESÍDUOS SECOS .....	16
5.2	ESTUDOS E RESULTADOS: COMPOSTAGEM .....	16



5.3	ANÁLISE DO POTENCIAL DE REDUÇÃO DE EMISSÃO DE GEE: SÉRIE HISTÓRIA DO SNIS .....	26
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>19</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>20</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A produção total de resíduos sólidos está estreitamente ligada ao crescimento populacional e à geração per capita destes materiais. Do ano de 2010 até 2019, a geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) no Brasil passou de 67 milhões para 79 milhões de toneladas por ano. Por sua vez, a geração per capita aumentou de 348 kg/ano para 379 kg/ano (SEEG, 2020). O panorama da gestão de resíduos na América Latina e no Caribe (2018) traz que, em média, cada habitante gera 365 kg/ano de resíduos na região. Segundo Maimunah Sharif, chefe do programadas Nações Unidas para Assentamentos Humanos, anualmente são produzidas 2 bilhões de toneladas de resíduos no mundo (ONU, 2018). A gestão dos RSU deve acompanhar esse crescimento de forma efetiva e eficiente, uma vez que esta é uma das áreas do saneamento básico essencial para a manutenção da limpeza e organização das cidades. Os resíduos sólidos urbanos são um desafio para todos, no Brasil, apenas 59,5% dos resíduos são destinados corretamente (aterros sanitários) e 40,5 % contam com um destino inadequado (aterros controlados ou em lixões a céu aberto) (ABRELPE, 2020).

Deve-se considerar que, além do ponto de vista do saneamento básico, há o aspecto das emissões de gases de efeitos estufa, proveniente tanto da destinação inadequada de resíduos sólidos quanto da disposição em aterros sanitários, o que vem contribuindo com as mudanças climáticas. Esta é uma questão largamente debatida na atualidade, sendo considerada um grande desafio que o planeta deve enfrentar. De acordo com o último relatório do IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), os aumentos observados nas concentrações de gases de efeito estufa (GEE), desde aproximadamente o ano 1750 são inequivocamente causados pelas atividades humanas. Segundo o relatório, as concentrações desde 2011 continuaram a aumentar na atmosfera, atingindo médias anuais de 410 partes por milhão (ppm) de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), 1866 partes por bilhão (ppb) para metano (CH<sub>4</sub>) e 332 ppb para óxido nitroso. O relatório afirma que cada uma das últimas quatro décadas foi sucessivamente mais quente do que qualquer década que a precedeu desde 1850 (IPCC, 2022).

Neste contexto das mudanças do clima, a destinação de resíduos sólidos deve ser considerada relevante no sentido de se procurar alternativas para a redução das emissões de GEE. No Brasil, em 2019, o setor de resíduos foi responsável pela emissão de 4% dos GEE do total nacional, contando com cerca de 96,1 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>-eq, dos quais 62 Mt CO<sub>2</sub>-eq são provenientes da disposição final de resíduos sólidos (SEEG, 2020). Contabiliza-se a emissão desses gases desde a obtenção da matéria prima, revelando maior consumo de combustíveis fósseis, quando comparado a extração de recursos naturais virgens, em detrimento

dos provenientes de reciclagem, até a gestão de resíduos disposição em aterros, incineração, compostagem e reciclagem) (LONGO et.al, 2019).

A destinação final de resíduos sólidos em aterros sanitários, é considerada uma fonte importante de emissão de gases de efeito estufa, principalmente de CH<sub>4</sub> (Park; Kang; Lee, 2016, apud, CANDIANI, G.; VIANA, E,2017), o qual possui alto poder de aquecimento, cerca de 25 vezes maior que o CO<sub>2</sub> em um período de 100 anos (IPCC, 2022). Em contrapartida, a destinação final de resíduos orgânicos em processos de compostagem, por ser um processo aeróbio, a geração de metano é menor em comparação com formas de tratamento anaeróbio ou disposição em aterro (INACIO, 2010). Assim, dentre as soluções para diminuir as emissões de GEE do setor de RSU, estaria o desvio de resíduos recicláveis e compostáveis da destinação final em aterros, para processos de reciclagem e compostagem.

Segundo o Sistema Nacional de Informação do Saneamento (SNIS), no Brasil em 2019, das 75,8 milhões de toneladas de resíduos enviados para unidades de processamento, apenas 304.637,30 toneladas foram para unidades de compostagem, e 4.519.162,2 para unidades de triagem de recicláveis secos. Estes dados demonstram que há um vasto campo para a implementação de modelos de gestão de resíduos que corroborem, não apenas com redução do impacto socioambiental na área do saneamento básico e mudanças do clima, mas também com o uso racional de recursos naturais, ao se privilegiar a produção de materiais a partir de resíduos recicláveis. Quando há a reutilização dos resíduos sólidos urbanos, entende-se que há valor agregado a esses materiais descartados, pela economia de energia, água e redução de emissões de GEE.

Considerando a importância do tema, em especial no âmbito das mudanças climáticas, no presente estudo é realizada a análise das emissões evitadas de CO<sub>2</sub>-eq, a partir da reciclagem de resíduos recicláveis secos, e compostagem de resíduos orgânicos, em comparação com a produção dos mesmos materiais com matéria prima virgem. Para isso, foi realizada revisão bibliográfica, a partir de artigos científicos, com o objetivo de obtenção de dados quantitativos de emissões de CO<sub>2</sub>-eq destes processos.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Descrever e quantificar as emissões diretas e emissões evitadas de CO<sub>2</sub>-eq resultantes das operações de reciclagem de resíduos recicláveis secos e de unidades de compostagem de resíduos orgânicos.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar quais são os critérios reportados na literatura para mensurar as emissões diretas e evitadas de CO<sub>2</sub>-eq resultantes das operações de unidades de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos;
- Descrever e mensurar as emissões diretas e evitadas de CO<sub>2</sub>-eq resultantes das operações de reciclagem de resíduos recicláveis secos e de unidades de compostagem de resíduos orgânicos.
- Analisar criticamente as metodologias e resultados apresentados pelos estudos abordados.
- Estimar as emissões de CO<sub>2</sub>-eq que poderiam ter sido evitadas com a reciclagem dos resíduos sólidos urbanos no Brasil desde a publicação da Política Nacional de Resíduos Sólidos em 2010 até o ano de 2020.

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Este item tem como objetivo apresentar uma revisão bibliográfica sobre o tema desta pesquisa, de forma que seja possível compreender os conceitos e a problemática relacionada ao tema. A revisão foi dividida em três tópicos, o primeiro traz um levantamento geral sobre emissões globais, em seguida, será apresentado um panorama do gerenciamento de RSU, com foco na reciclagem de resíduos secos e orgânicos. Por fim, o último tópico irá abordar as metodologias utilizadas para avaliar emissões de GEE decorrentes da reciclagem de resíduos secos e orgânicos.

#### **3.1 FONTES GLOBAIS DE EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA.**

##### **3.1.1 Histórico de eventos e acordos globais sobre mudanças climáticas**

No início e no final da década de 60, a divulgação sobre a influência do homem na degradação ambiental foi marcada com a publicação do livro “Primavera Silenciosa” de Rachel Carson, que procurou denunciar o uso indiscriminado de agrotóxicos (CARSON, 1969), e com publicação do Relatório do Clube de Roma. Na introdução deste relatório “Limites do Crescimento”, a deterioração do ambiente está entre os problemas citados, cuja solução é fundamental e de longo prazo. E há neste documento a conclusão de que os membros das Nações Unidas disporiam “[...] talvez de 10 anos para controlar suas querelas e organizar uma associação mundial [...], melhorar o ambiente humano” (MEADOWS, 1978, p. 13). Porém, a preocupação com o futuro da humanidade já tomou uma direção institucional, no nível internacional, com a realização em 1972 da Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano, conhecida como a Conferência de Estocolmo. Esta conferência reuniu 113 países, e cerca de 700 observadores de diversas organizações não governamentais, constituindo-se no âmbito jurídico no início da percepção global acerca da preocupação com o meio ambiente (DINH et al, 1999). A Conferência de Estocolmo, tornou o meio ambiente uma questão global premente e estabeleceu o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) (ONU (a), 2022).

Em 1987, o relatório “Nosso Futuro Comum” (ONU (b), 1991), elaborado pela Comissão Mundial Sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, presidida pela norueguesa Gro Harlem Brundtland, apresenta também um completo diagnóstico sobre a degradação ambiental, a exemplo do Relatório do Clube de Roma (MEADOWS, 1978).

O Rio de Janeiro, em 1992, foi sede da “Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e o Desenvolvimento”, a Rio 92, um grande evento, onde representantes de 179 países consolidaram uma agenda global para minimizar os problemas ambientais mundiais, com o intuito de buscar um modelo de crescimento econômico e social aliado à preservação ambiental e ao equilíbrio climático em todo o planeta. Nesse cenário, foi elaborada a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), sendo a Conferência das Partes (COP) o seu órgão supremo, e que reúne anualmente os países Parte em conferências mundiais. Suas decisões, coletivas e consensuais, só podem ser tomadas se forem aceitas unanimemente pelas Partes, sendo soberanas e valendo para todos os países signatários (MMA, 2022).

Em 1997, o Protocolo de Quioto constitui um tratado complementar à Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), com a definição de metas de redução de emissões para os países desenvolvidos e os que, à época, apresentavam economia em transição para o capitalismo, considerados os responsáveis históricos pela mudança atual do clima. Seguindo as exigências do Protocolo de Quioto, entre 2008-2012, 37 países industrializados e a Comunidade Europeia comprometeram-se a reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) para uma média de 5% em relação aos níveis de 1990. No segundo período de compromisso, as Partes se comprometeram a reduzir as emissões de GEE em pelo menos 18% abaixo dos níveis de 1990 no período de oito anos, entre 2013-2020. Cada país negociou a sua própria meta de redução de emissões em função da sua visão sobre a capacidade de atingi-la no período considerado (MMA, 2022).

Para auxiliar os países desenvolvidos e os de economia em transição para o capitalismo – conhecidos tecnicamente como Países Anexo I - a cumprirem suas metas de redução ou limitação de emissões, o Protocolo de Quioto contemplou mecanismos, dentre eles o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). Por meio deste mecanismo, um país desenvolvido ou de economia em transição para o capitalismo pode comprar “créditos de carbono”, denominados “reduções certificadas de emissões” (RCEs) resultantes de atividades de projeto desenvolvidas em qualquer país em desenvolvimento que tenha ratificado o Protocolo. Isso é possível desde que o governo do país onde ocorrem os projetos concorde que a atividade de projeto é voluntária e contribui para o desenvolvimento sustentável nacional” (MMA, 2022).

O Acordo de Paris, a COP 21, é um tratado internacional sobre as mudanças climáticas, ocorrido em 12 de dezembro de 2015, e entrou em vigor em 4 de novembro de 2016. O seu

objetivo é restringir o aquecimento global a um nível inferior a 2 graus Celsius, de preferência a 1,5 graus Celsius, em comparação com os níveis pré-industriais (UNITED NATIONS, 2015).

Diferente do Protocolo de Quioto, no Acordo de Paris não há obrigatoriedade no cumprimento das metas estabelecidas pelas partes. O governo brasileiro assumiu como objetivo reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 37% até 2025, assim como se comprometeu a redução de 50% até 2030. Ambas as comparações são feitas aos níveis de emissão de 2005 (UNFCCC, 2022). Vale ressaltar que o Brasil já tinha se comprometido voluntariamente com redução de emissão de GEE em 2009 com a criação da Política Nacional sobre Mudanças do Clima.

Em 2021, foi a vez da COP 26 realizada em Glasgow na Escócia. Segundo o Instituto WRIBRASIL (2021), depois de 20 meses de pandemia, após ser adiada em 2020, a conferência era vista como a grande oportunidade para se definir ações que levariam o mundo a conter o impacto das mudanças climáticas a um aumento de no máximo 1,5°C na temperatura média da Terra comparado ao período pré-industrial. De acordo ainda com este Instituto, esse objetivo não foi alcançado, sendo a COP 26 encerrada com o “Pacto de Glasgow”, um documento assinado pelos países que foi insuficiente em termos de ambição. Contudo, o Instituto pondera que, apesar de não ter dado garantias ao cumprimento desse limite, Glasgow teve o papel de manter 1,5°C vivo. E que além do compromisso oficial, foram assinados na Escócia uma série de compromissos independentes, que podem contribuir para a redução de emissões e limitar as mudanças climáticas (WRIBRASIL, 2021).

### **3.1.2 Dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>-eq)**

A atividade humana tem afetado de forma negativa o clima em todo o mundo. Evidência de mudanças extremas foram observadas, como ondas de calor, fortes precipitações, secas e ciclones tropicais (IPCC, 2021). As emissões antropogênicas totais de gases de efeito estufa (GEE) cresceram mais rapidamente de 2000 até 2010 que nas últimas três décadas (IPCC, 2014). Os GEE são gases naturalmente fazem parte da composição da atmosfera, e são capazes de absorver e reemitir radiação infravermelha. O Protocolo de Kyoto, definiu sete GEE: dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>); metano (CH<sub>4</sub>); óxido nitroso (N<sub>2</sub>O); hidrofluorcarbonos (HFCs); perfluorcarbonos (PFCs); hexafluoreto de enxofre (SF<sub>6</sub>); e trifluoreto de nitrogênio (NF<sub>3</sub>) (CETESB, 2021).

Para padronizar as emissões, foi determinado o Global Warming Potencial (GWP), o qual representa o potencial de contribuição para o aquecimento global para os GEE. Cada gás

tem um potencial próprio de contribuição para o efeito estufa, e todos os gases têm seus impactos convertidos em valores equivalentes ao do CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>-eq). Por exemplo, o impacto de uma tonelada de metano (CH<sub>4</sub>) equivale ao de 21 toneladas de CO<sub>2</sub>, o que significa que a redução de uma tonelada de CH<sub>4</sub> gera 21 créditos de carbono (ABRELPE, 2012).

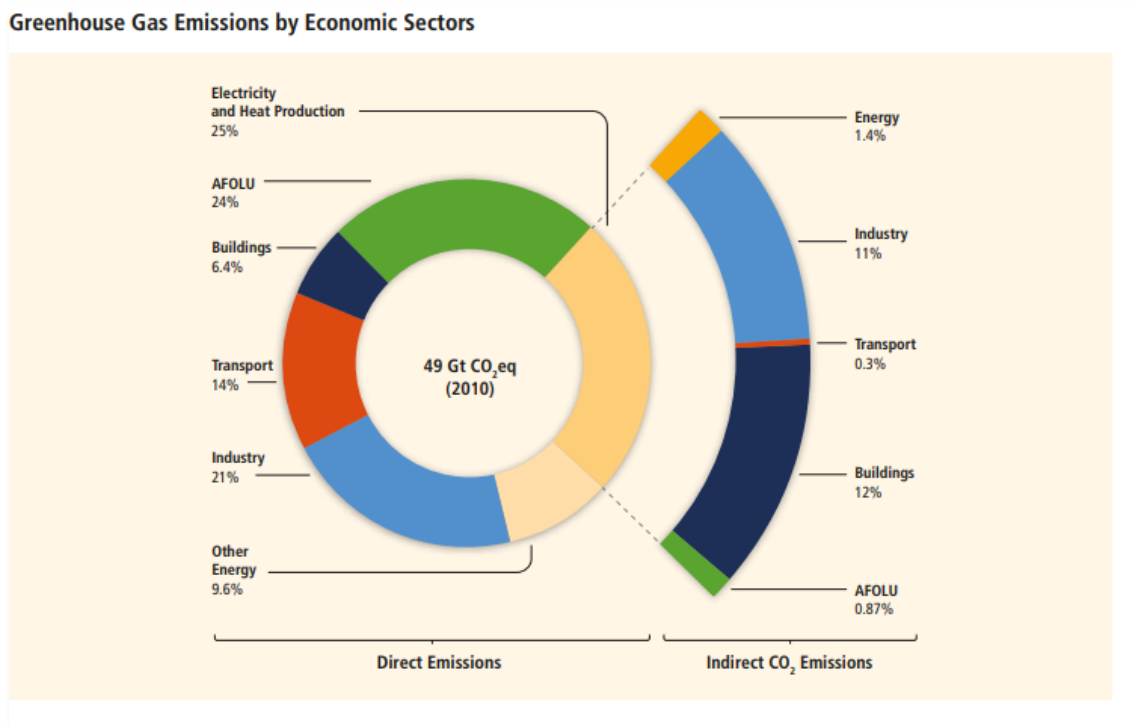
### **3.1.3 Fontes Globais de emissão de GEE**

As emissões globais de GEE, segundo o AR5 (Quinto Relatório de Avaliação do IPCC de 2014), têm como principais contribuições o setor de energia, AFOLU (agricultura, mudança de uso de solos e florestas) e, caso forem contabilizadas as emissões indiretas também, o setor industrial e o da construção vêm ganhando importância considerável. Das 49 GtCO<sub>2</sub>-eq emitidas em 2010, 35% (17 GtCO<sub>2</sub>-eq) das emissões foram no setor de fornecimento de energia, 24% (12 GtCO<sub>2</sub>-eq, emissões líquidas) em AFOLU, 21% (10 GtCO<sub>2</sub>-eq) na indústria, 14% (7,0 GtCO<sub>2</sub>-eq) no transporte, e 6,4% (3,2 GtCO<sub>2</sub>-eq) no setor de construção. Quando as emissões indiretas da produção de eletricidade e aquecimento são atribuídas aos setores de uso final de energia, a participação dos setores da indústria e da construção nas emissões globais de GEE aumentam para 31% e 19% respectivamente. O setor AFOLU responde por cerca 24% (~10-12 GtCO<sub>2</sub>-eq/ano) das emissões líquidas antropogênicas de GEE, principalmente causadas pelo desmatamento, manejo do solo e da pecuária. As estimativas mais recentes indicam um declínio nas emissões de CO<sub>2</sub> desse setor, em grande parte devido ao decréscimo das taxas de desmatamento e aumento do reflorestamento. Em 2010, o setor industrial foi responsável por cerca de 28% do uso final de energia, e 13 GtCO<sub>2</sub>, incluindo emissões diretas e indiretas, bem como emissões de processo. Foram realizadas projeções desse setor que mostraram um aumento de 50-150% nas emissões até 2050 nos cenários de base avaliados no AR5, a menos que as melhorias de eficiência energética sejam aceleradas significativamente. O setor de transporte emitiu em 2010 cerca de 7,0 GtCO<sub>2</sub>-eq, equivalente a 14% das emissões e, apesar de cada vez mais surgirem veículos mais eficientes, as emissões continuam aumentando nesse setor. O setor de fornecimento de energia é responsável pela maior parte das emissões de GEE, em 2010 foi responsável por 35% (17 GtCO<sub>2</sub>-eq) globalmente. Em 2010, o setor de construção emitiu 3,2 GtCO<sub>2</sub>-eq, o equivalente a 6,4% das emissões totais globais. O setor de construção, como já mencionado anteriormente, é responsável por uma parcela muito maior quando se atribui as emissões indiretas da produção de eletricidade e aquecimento a ele. No AR5, as emissões descritas como “Outras energias”, são emissões referentes a todas as emissões do setor de energia que não estão diretamente ligadas a produção de eletricidade e aquecimento, como por



exemplo, a extração, refinamento e transporte de combustíveis (IPCC, 2014). No Gráfico 1, estão dispostas as emissões em de GEE por setor em 2010.

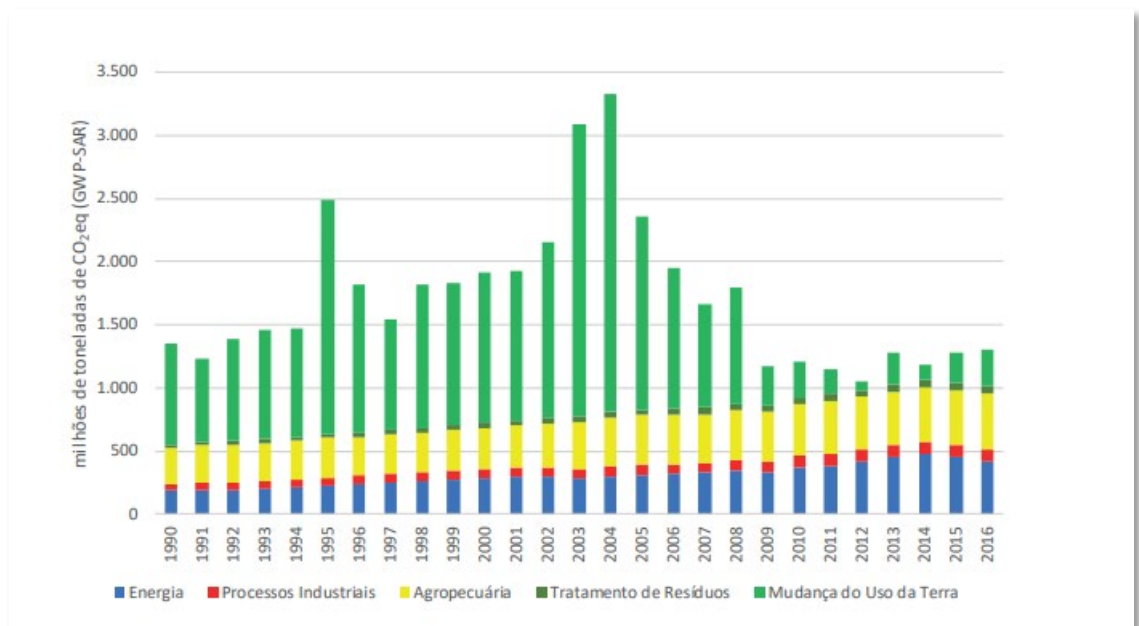
Gráfico 1 – Emissão de GEE de acordo com o setor de economia



Fonte: IPCC, 2014

Em 2009, o Brasil instituiu a Política Nacional sobre a Mudança do Clima (PNMC), por meio da Lei 12.187/2009. Essa lei traz o compromisso nacional voluntário de ações de mitigação para a reduzir as missões de GEE entre 36,1% e 38,9% e, com o intuito de acompanhar o cumprimento desse compromisso, foi estabelecido que seriam publicadas estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa do Brasil (Decreto 9.578/2018). Fazem parte das Estimativas anuais os setores energia, processos industriais, agropecuária, mudança do uso da terra e tratamento de resíduos. A Figura 1 traz um gráfico com as estimativas de emissões por setor, em CO<sub>2</sub>-eq do ano de 1990 a 2016.

Figura 1 - Emissão de GEE por setor, de 1990 a 2016



Fonte: MCT: Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil (2020).

Com relação às fontes de emissões de GEE, deve-se considerar que o IPCC (2006), em suas diretrizes para a elaboração de inventários, utiliza como critério a destinação final em aterros, compostagem, e queima a céu aberto de resíduos sem aproveitamento energético (IPCC,2006). Segundo Giegrich (2021), nessas diretrizes, o IPCC inclui nos setores de “produção industrial” e “geração de energia”, as atividades de reciclagem e qualquer tipo de recuperação de energia a partir de resíduos. Este autor considera que todos os inventários nacionais que seguem o sistema do IPCC, refletem parcialmente a contribuição das atividades de gestão de resíduos para a mitigação dos GEE. Desta forma, por razões metodológicas, nos inventários de GEE, os efeitos da reciclagem de material ou energia não são creditados ao setor de “resíduos”, mas nos setores “energia” ou “processos industriais”. Por exemplo, a reciclagem de sucata está incluída no setor industrial em “produção de metais – produção de ferro e aço”(GIEGRICH, 2021).

Para Giegrich, (2021), o enquadramento da reciclagem de resíduos nas emissões industriais pelo IPCC, demonstra diversas oportunidades de redução das emissões de GEE, como por exemplo, melhora na eficiência do manejo de materiais, reciclagem, reduções gerais na demanda de produtos e da demanda de serviços que, além da eficiência energética, pode ajudar a reduzir as emissões de GEE abaixo do nível de referência do setor industrial. Porém, não ficam evidenciadas as contribuições do setor de resíduos para essas reduções.

Para avaliar os resíduos como fonte de GEE, a sua composição é um dos principais fatores que influenciam as emissões de GEE do tratamento e disposição final dos resíduos sólidos, porque diferentes frações de resíduos contêm quantidades diferentes de carbono orgânico degradável (COD) – também denominado de carbono orgânico regenerativo – e carbono fóssil. O COD é crucial para a formação de biogás nos aterros e em outros estágios de tratamento, ao passo que apenas o carbono fóssil contribui para as mudanças climáticas em caso de incineração. O CO<sub>2</sub> do carbono orgânico é considerado neutro para o clima, porque se origina de plantas que absorvem o CO<sub>2</sub> atmosférico (GIEGRICH, 2021).

A emissão de GEE a partir de resíduos, envolve desde a obtenção da matéria prima, revelando maior consumo de combustíveis fósseis pela extração de recursos virgens em detrimento dos recursos reciclados, até a gestão de resíduos que pode ser: deposição em aterros, incineração, compostagem e reciclagem. (Longo, G.et al.). Como já mencionado anteriormente, o metano (CH<sub>4</sub>), é um dos principais GEE emitidos no setor dos resíduos e tem um potencial poluidor de 21 vezes o do CO<sub>2</sub>. Em 2018, o CH<sub>4</sub> representou de 11,5% a 14% das emissões de GEE globais, das quase cerca de 29,7% tiveram como origem o tratamento e disposição final de resíduos (CRIPPA et al, 2021).

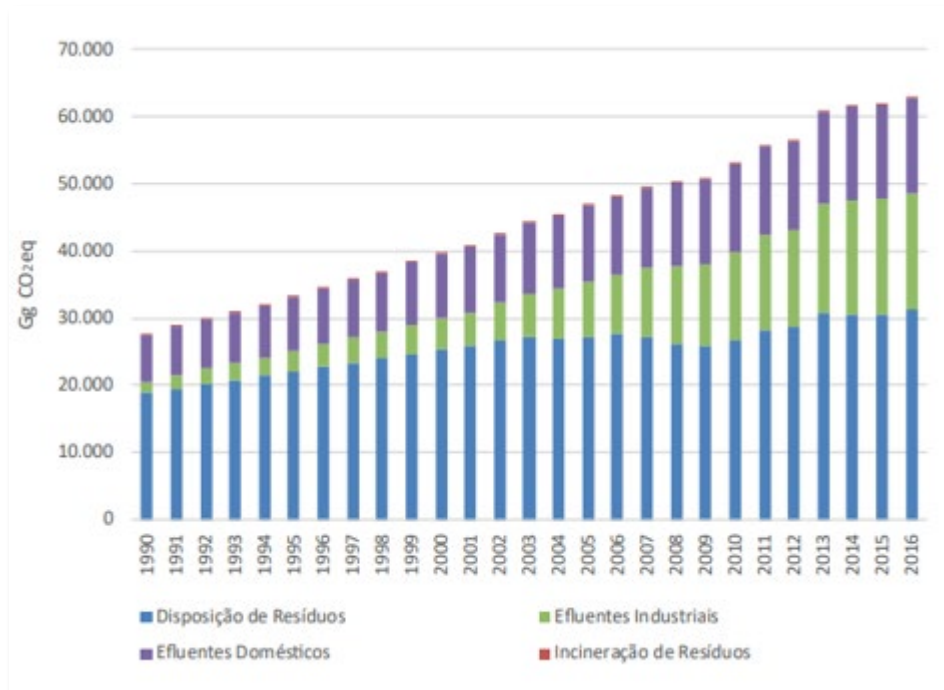
Em 2010, as emissões de GEE dos resíduos representaram 3.0% do total de emissões de GEE de todas as fontes (1446 MtCO<sub>2</sub>-eq), comparado a 2.6% em 1970 (734 MtCO<sub>2</sub>-eq). As principais fontes de emissões de GEE de resíduos foram a disposição de resíduos sólidos em aterros (46% do total de emissões de GEE de resíduos em 1970 e 43% em 2010) e a tratamento de águas residuais (51% do total de emissões de GEE de resíduos em 1970 e 54% em 2010), a incineração de resíduos (principalmente CO<sub>2</sub>) (JRC/PBL, 2016).

O setor Tratamento de Resíduos contabilizou 62.884 GgCO<sub>2</sub>-eq em 2016, representando 4,8% do total de emissões brasileiras. As emissões aumentaram 1,5% se comparado com as de 2015. As emissões do setor são predominantemente CH<sub>4</sub> (95,8%), decorrente da decomposição do material biológico degradável, no local de disposição e tratamento dos resíduos sólidos e efluentes líquidos. Outros gases são gerados em menor quantidade, durante o tratamento de efluentes domésticos e industriais, como é o caso do N<sub>2</sub>O (3,8%) e CO<sub>2</sub> (0,4%), que acontece durante a incineração de resíduos sólidos. A Figura 2 mostra a série histórica de emissões por subsetor em GgCO<sub>2</sub>-eq. (MCT, 2020).

Observa-se que o subsetor disposição de resíduos sólidos é o mais representativo em termos de emissões totais do setor, com uma contribuição de 50,0% em 2016 (Ver Figura 2). Os subsetores tratamento de efluentes domésticos e industriais representaram 27,3% e 22,3%

respectivamente. Já o subsetor Incineração de Resíduos Sólidos teve uma parcela menor de contribuição, com 0,4% em 2016 (MCT, 2020).

Figura 2 - Estimativas de emissões de CO<sub>2</sub>-eq do setor de tratamento de resíduos por subsetor



Fonte: MCT: Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil (2020).

A redução de resíduos, seguida da reutilização, reciclagem e recuperação de energia, são as principais oportunidades de mitigação (IPCC, 2014) Os resíduos e as águas residuárias representaram 1,5 GtCO<sub>2</sub>-eq em 2010. Segundo a ONU (2018b), considerando apenas o plástico, o mundo produz cerca de 300 milhões de toneladas a cada ano e, somente 9% do lixo plástico gerado foi reciclado e somente 14% são coletados para reciclagem.

Consta no AR5 que se não houver uma união de esforços para reduzir as emissões de GEE além do que já é feito, espera-se que o aumento das emissões continue crescendo junto com o crescimento da população global e das atividades econômicas. Foram formados cenários, nos quais não houve esforços adicionais para mitigação do clima e que resultaram em aumentos da temperatura média global da superfície em 2100 de 3,7°C para 4,8°C se comparados aos níveis da revolução industrial (IPCC, 2014).

### 3.2 GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS E O CLIMA.

De acordo com a Constituição Federal brasileira, o gerenciamento do manejo de resíduos sólidos é de competência do poder público local e, quando exercido por empresas particulares, deve ocorrer por meio de concessão pública (IBGE, 2010).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei 12305/2010, estabelece as diretrizes e os procedimentos para um adequado gerenciamento de resíduos sólidos no Brasil. Esta Lei em seu art.3º, inciso X, define o gerenciamento de resíduos sólidos como um “conjunto de ações exercidas, direta ou indiretamente, nas etapas de coleta, transporte, transbordo, tratamento e destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, de acordo com plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos ou com plano de gerenciamento de resíduos sólidos, exigidos na forma desta Lei” (PNRS, 2010).

Do ponto de vista da sustentabilidade, esta lei coloca como prioridade para o gerenciamento dos resíduos sólidos (Artigo 9º) “a não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos”(BRASIL, 2010).

Esta diretriz da PNSR, torna a gestão adequada dos resíduos tecnicamente simples, colocando a segregação de diferentes frações de resíduos diretamente na fonte, a coleta seletiva e o tratamento, incluindo o reuso, reciclagem e outras operações para recuperação, e, finalmente, a disposição de materiais não recuperáveis em aterros sanitários.

A PNRS incluiu originalmente um prazo de quatro anos para a eliminação de lixões, com a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos em aterro sanitário, cabendo aos municípios a responsabilidade pelos resíduos gerados em seus territórios (BRASIL, 2010). Contudo, segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), no Brasil, os lixões e aterros controlados representam 23% e 17, 5%, respectivamente, da destinação final resíduos sólidos (ABRELPE, 2018/2019).

A gestão integrada dos resíduos sólidos, prevista na PNRS é definida como um “[...] conjunto de ações voltadas para a busca de soluções para os resíduos sólidos, de forma a considerar as dimensões política, econômica, ambiental, cultural e social, com controle social e sob a premissa do desenvolvimento sustentável” (PNRS, art.3º, inciso XI). Assim, do ponto de vista social e econômico, dependendo do nível do desenvolvimento econômico local, os custos de trabalho e os investimentos acessíveis, o gerenciamento pode ser feito de uma forma

simples, usando o setor informal de catadores, ou de forma mais avançada, incluindo tecnologias automatizadas. Em muitos casos, a segregação e a gestão de separação das frações seca e úmida, já permitem taxas bastante elevadas de reciclagem de papel, plásticos, metais, madeiras, eletrônicos e agregados (FRICKE, 2015)

No Brasil, a gestão de resíduos é operacionalizada no contexto dos serviços públicos de saneamento básico, e para o caso de a prestação de serviços ser por empresas ou entidades que não integrem a administração do titular, é requerido um contrato de concessão, mediante licitação prévia, nos termos do art. 175 da Constituição Federal.) (BRASIL, 2020).

No âmbito mundial, segundo o KAZA (2018) a gestão de resíduos é realizada de diversas formas, sendo mais comumente gerida pelos municípios de uma forma descentralizada. No geral, a gestão de resíduos sólidos é realizada de acordo com as condições locais, tais como disponibilidade de financiamento, normas locais, disposição geográfica da população, dentre outros. Geralmente, os governos federais não são responsáveis pela operação dos serviços de resíduos, uma vez que pode ocorrer conflitos de competência. Ainda no contexto global, estima-se que cerca de 30% da gestão de resíduos é realizada por parcerias público-privada, desde a coleta até a disposição final (KAZA, 2018).

A geração de resíduos é um resultado da urbanização, desenvolvimento econômico e do crescimento populacional, com isso, tem-se que conforme as cidades se tornam mais populosas e prósperas, o aumento da produção de resíduos acompanha esse crescimento. Um exemplo disso, é a quantidade de resíduos que os países de alta renda, que representam apenas 16% da população mundial, eles foram responsáveis por 34% da geração mundial de resíduos em 2016. Os países de baixa renda representando 9% da população, foram responsáveis por apenas 5% dos resíduos gerados. O restante dos resíduos foi gerado pela classe média alta e classe média baixa com 32% e 29% respectivamente. No total, em 2016, estima-se que a geração de resíduo global atingiu 2.01 bilhões de toneladas (KAZA, 2018).

De forma simplificada, a gestão de resíduos sólidos é composta por três principais operações: coleta, tratamento e disposição final. A coleta consiste no recolhimento do lixo na fonte geradora e em sua transferência ao local de tratamento e/ou de disposição final. Nas maiores cidades, onde os pontos de coleta ficam mais distantes do aterro, costuma ser necessária a operação de transbordo, na qual os resíduos são transportados para estações de transferência, onde são compactados, repassados a veículos com maior capacidade de carga e, então, levados ao local de destinação final (MELLO, 2008).

Com relação ao tratamento do resíduo, o objetivo é reduzir ou eliminar seu potencial poluidor, e deve visar o aproveitamento da matéria prima na forma de resíduos recicláveis secos

e orgânicos. O tratamento deve iniciar antes da coleta, no ponto de geração na residência, por meio da segregação correta dos resíduos recicláveis secos (metais, vidros, papéis e plásticos), orgânicos, e rejeitos (ABRELPE, 2018/2019). A correta separação agrega valor ao tratamento nos processos de reciclagem e compostagem, e reduz custos na operação de aterros sanitários, uma vez que a grande quantidade de matéria orgânica presente nos resíduos domiciliares, juntamente com a infiltração de água de chuva, e atividade microbiológica, é responsável pela formação de percolados em aterros, com alto potencial poluidor, devido ao seu teor de Demanda Química de Oxigênio (CONTRERA, 2003).

A importância de se implementar a segregação de resíduos é mais significativa ainda para a redução da poluição ambiental e impactos negativos à saúde pública, ao se considerar que no Brasil, os lixões a céu aberto são o destino de grande parte dos resíduos gerados (ABRELPE, 2018/2019).

Dentre os impactos negativos ao meio ambiente pela falta de gerenciamento de resíduos sólidos, estão as emissões de GEE em aterros controlados e lixões, embora já esteja disponível uma ampla gama de tecnologias está disponível para mitigar tais emissões provenientes de resíduos. Estas tecnologias incluem aterro sanitário com recuperação de biogás, reciclagem, compostagem. Contudo, a mitigação das emissões de GEE de resíduos dependem de múltiplas tecnologias cuja aplicação depende diversos fatores, incluindo economia local, políticas nacionais, restrições regulatórias, percepções do público e exigências de infraestrutura (BOGNER, 2007).

Porém, mesmo com tecnologias de ponta disponíveis, um dos principais problemas no setor de resíduos é a falta de disponibilidade e qualidade de dados. É necessário gerar dados e informações para entender e melhorar a gestão de resíduos, com o intuito de criar processos sistemáticos de compilação, processamento e análise de dados e assim apoiar tomadas de decisões (ONU, 2018). Em muitos países a qualidade e quantidade de dados varia de ano para ano, as definições não são uniformes e as metodologias não são confiáveis. As taxas de geração de resíduos sólidos são uma função tanto da população quanto da sua renda, contudo, há uma lacuna nos dados, o que resulta em altas incertezas para as estimativas de emissões de GEE, especialmente de países em desenvolvimento (BOGNER, 2007).

É importante reconhecer que as porcentagens de resíduos reciclados, compostados, incinerados ou depositados em aterro diferem muito entre os países, devido a múltiplos fatores, incluindo economia local, políticas nacionais, restrições regulatórias, percepções do público e exigências de infraestrutura. Ainda que os custos de mão-de-obra sejam mais baixos em países

em desenvolvimento, a gestão de resíduos não pode constituir uma porcentagem de renda para o município, devido aos custos de equipamentos combustíveis (COINTREAU, 1994)

Por fim, tem-se a última etapa do gerenciamento: disposição final dos resíduos. No Brasil, entende-se como disposição final adequada o encaminhamento de rejeitos para um aterro sanitário (PNRS,2010). Contudo, no Brasil, busca-se melhorias fundamentais na gestão, considerando que os lixões e aterros controlados (unidades inadequadas), ainda são o destino de boa parte dos resíduos dos brasileiros (ABRELPE, 2018/2019). Das 72,7 milhões de toneladas de resíduos coletadas no Brasil em 2018, 59,5% tiveram disposição final adequada em aterros sanitários, com um aumento de apenas 2,4% em relação ao ano anterior. Assim, a etapa de disposição final de resíduos em aterros sanitários, é sempre necessária, a menos que o tratamento dos resíduos tenha por finalidade prepará-los para um novo uso, como no caso das reciclagens (MELLO, 2008).

Conforme os dados referenciados acima, no contexto do gerenciamento, a etapa do tratamento de resíduos se destaca, representando a prevenção de impactos à saúde pública e ao meio ambiente. A seguir, dando ênfase ao cumprimento do objetivo geral deste trabalho, procede-se uma explanação com mais detalhes, acerca dos tipos de tratamento para resíduos urbanos recicláveis secos e orgânicos, mais utilizados no Brasil e em outros países, destacando a relação com as emissões diretas e evitadas de CO<sub>2</sub>-eq.

É considerada “unidade de processamento de resíduos sólidos” toda e qualquer instalação, dotada ou não de equipamentos eletromecânicos, onde quaisquer tipos RSU sejam submetidos a qualquer modalidade de processamento, desde a disposição no solo em um lixão, ou a usual transferência (ou transbordo) de um tipo de veículo coletor para outro; até o tratamento em uma sofisticada unidade de incineração, por exemplo (SNIS, 2018).

Neste estudo será tratada apenas as unidades de processamento de resíduos sólidos para a reciclagem de materiais secos, e reciclagem de materiais orgânicos.

### **3.2.1 Reciclagem de resíduos orgânicos**

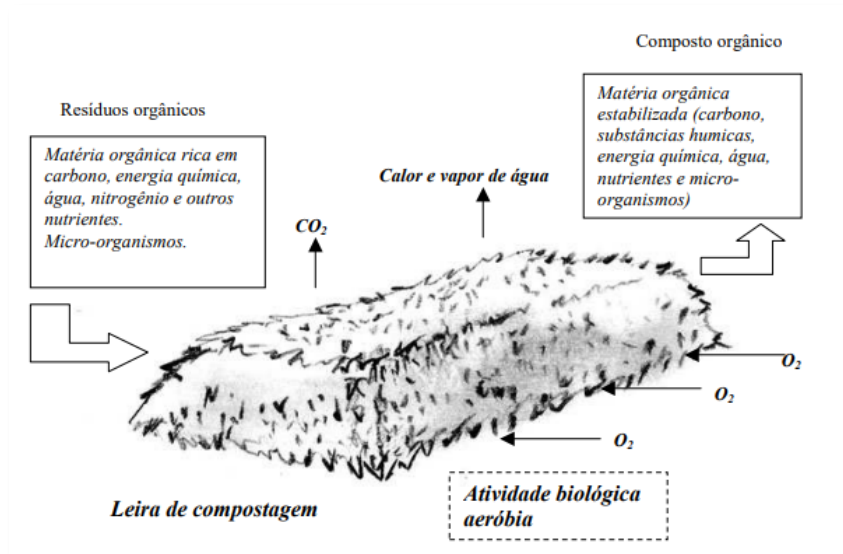
Os resíduos orgânicos municipais podem ser definidos de forma simples: é a fração de resíduos biodegradáveis provindos de parques, jardins, cozinhas, restaurantes, hotéis, mercados e feiras.

As atividades de reciclagem levam a produtos secundários (“matérias-primas secundárias”), que substituem as matérias-primas primárias ou os combustíveis fósseis (no caso da geração de energia a partir dos resíduos) (GIEGRICH, 2021).



Compostagem é um processo de decomposição biológica e estabilização de substratos orgânicos. Caso esse processo ocorra sob condições que permitem o desenvolvimento de temperaturas termofílicas, resultará em um produto final estável, livre de patógenos e sementes de plantas, transformando-se num composto que pode ser benéficamente aplicado na terra (HAUG, 1993). A Figura 3 mostra de forma simples e didática o funcionamento de uma composteira do tipo leiras.

Figura 3- Esquema do funcionamento de compostagem por leira



Fonte: Inácio e Miller (2009)

Há três fontes principais de emissão de GEE que ocorrem durante o processo de compostagem: emissões de transporte que ocorrem a partir da coleta da matéria-prima inicial e entrega do composto acabado; emissões de água e energia a partir do processo da compostagem; e emissões fugitivas provenientes de decomposição anaeróbica não intencional dentro do sistema aeróbico geral. A redução das emissões de gases de efeito estufa a partir da compostagem incluem tanto as emissões evitadas que ocorreria caso a matéria orgânica tivesse sido descartada e enviada a aterro sanitário, como também os benefícios do uso do composto final da compostagem na agricultura. A partir do uso do composto na agricultura, é possível estimar o decréscimo do uso de fertilizantes sintéticos e, como consequência, as emissões evitadas no processo de fabricação. Os benefícios da compostagem vão além da redução das emissões de GEE, como por exemplo, o efeito da adição do adubo aos solos, o qual muda as

características físicas dele permitindo o aumento da retenção da água (California Environmental Protection Agency, 2017).

A PNRS, Artigo 3º, inciso VII, considera a compostagem como uma forma de destinação final ambientalmente adequada de resíduos. Segundo o SNIS (2020), em 2019 foram coletadas 75,8 milhões de toneladas de resíduos e apenas 304,64 mil toneladas foram recuperadas em 73 unidades de compostagem. Uma grande problemática ligada aos resíduos orgânicos são as emissões de GEE. As emissões do setor de resíduos são predominantemente CH<sub>4</sub> (95,8%), decorrente da decomposição do material biológico degradável, no local de disposição e tratamento dos resíduos sólidos (MCT, 2020). Dentre as vantagens da compostagem, destaca-se, portanto, a prevenção dos danos ambientais oriundos da destinação inapropriada dos resíduos sólidos orgânicos nos aterros.

A escolha do tratamento mais adequado para cada resíduo, depende das condições financeiras e da infraestrutura de cada região, da quantidade de resíduos, e principalmente da sua composição gravimétrica e granulométrica (FRICKE, 2015). Os resíduos orgânicos são os mais gerados e os menos geridos, eles representam em média 50% dos resíduos urbanos nos países da América Latina, sendo que a falta de tratamento específico provoca a geração de GEE, além de reduzir a qualidade dos produtos potencialmente recicláveis (ONU, 2018).

No Brasil, segundo o SNIS (2020), em 2019 foram coletadas 65,11 milhões de toneladas de resíduos e apenas 305 mil toneladas foram recuperadas em 73 unidades de compostagem. O Quadro 1 traz uma estimativa da composição gravimétrica de 93 municípios brasileiros pesquisados entre 1995 e 2008.

Quadro 1- Estimativa da composição gravimétrica de resíduos sólidos coletados no Brasil

Materiais	Participação (%)	Quantidade (t/dia)	
		2000	2008
Material reciclável	31,9	47.558,5	58.527,4
Metais	2,9	4.301,5	5.293,5
Papel, papelão e tetrapak	13,1	19.499,9	23.997,4
Plástico	13,5	20.191,1	24.847,9
Vidro	2,4	3.566,1	4.388,6
Matéria Orgânica	51,4	76.634,5	94.309,5
Outros	16,7	24.880,5	30.618,9
<b>Total coletado</b>	<b>100</b>	<b>149.094,30</b>	<b>183.481,50</b>

Fonte: IBGE 2010 Apud IPEA 2012

Apesar de os resíduos sólidos domiciliares no Brasil apresentarem alto percentual de fração orgânica, os processos de compostagem são ainda incipientes. O resíduo orgânico, por não ser separado antes da coleta, acaba sendo encaminhado para disposição final junto com os rejeitos. Para a maioria dos municípios, esta forma de destinação gera despesas que poderiam ser evitadas caso a matéria orgânica fosse separada na fonte e encaminhada para compostagem (IPEA, 2012).

Para a segregação e tratamento de resíduos, que inclui a compostagem, há uma tecnologia denominada “Tratamento Mecânico Biológico (TMB)” que, segundo Balhar (2015), é também fortemente praticada em outros países da Europa e no mundo. A primeira etapa deste tratamento consiste na separação de materiais apropriados para a reciclagem ou para o aproveitamento energético. Em seguida, o material restante, de granulometria menor, é submetido a um tratamento biológico. O tratamento biológico pode consistir em uma etapa de compostagem (túnel, leiras, trapezoidais), ou em uma etapa de biodigestão anaeróbia (a seco ou a úmido). A operação das plantas é sujeita a constantes mudanças das condições legais, conforme a legislação sobre resíduos, e econômicas, exigindo altos padrões de qualidade, economicidade e flexibilidade em sua gestão (BALHAR, 2015). Semelhante a compostagem, supõe-se para as plantas TMB com sistemas de compostagem intensivos, otimizados, a formação de metano em concentrações de 10 mg/m<sup>3</sup> a 100 mg/m<sup>3</sup>, o que corresponde a quantidades de metano de 50 g/t a 500g/t de material fresco (CUHLS, 2015)

A associação alemã “Tratamento específico dos grupos de resíduos” (Arbeitsgemeinschaft Stoff spezifische Abfallbehandlung – ASA e.V.) é uma iniciativa de gestores de plantas de tratamento de resíduos. A ASA desenvolveu um modelo para a determinação da eficiência energética de plantas com tecnologia TMB. O modelo calcula o ganho líquido gerado pelo tratamento de resíduos, depois da subtração da energia investida no tratamento. Foi constatado, de modo geral, que a realização de um elevado bônus de CO<sub>2</sub> apenas foi possível em plantas com alto grau de eficiência em seus processos térmicos. Os resultados mostraram que em todas as plantas de TMB foram realizados efeitos mitigatórios para o ambiente. A economia de CO<sub>2</sub> por tonelada de resíduos tratados se somam em até 530 kg CO<sub>2</sub>-eq. (BALHAR, 2015).

Além do aproveitamento dos resíduos orgânicos no âmbito energético, dependendo da qualidade do composto, há muitas aplicações na agricultura, horticultura, estabilização do solo e melhoria do solo (aumento matéria orgânica, maior capacidade de retenção de água) (Ver Quadro 2) (COINTREAU, 2001). Entretanto, tanto CH<sub>4</sub> quanto N<sub>2</sub>O podem ser formados

durante a compostagem por má gestão do processo (BOGNER, 2007). No Brasil, houve uma demanda de 36,2 milhões de toneladas de fertilizantes, das quais 31 milhões tiveram de ser importadas, contabilizando cerca de USD 9 BILHÕES (BELTRAME, 2020). A partir desses levantamentos, verifica-se que o processo de tratamento da fração orgânica via compostagem é ainda pouco utilizado, para a aplicação na agricultura.

Quadro 2 -Benefício da Compostagem no Brasil

<b>Ambientais</b>	<b>Agrícolas</b>
Aumenta a vida útil dos aterros, evitando ao envio de resíduos ricos em matéria orgânica,	Fonte de MO de qualidade nos solos
Não há risco de poluição dos solos e das águas superficiais e subterrâneas,	Diminui o uso de água de irrigação
Controle da geração de odores desagradáveis	Diminui o uso de fertilizantes minerais
Mitiga a geração de Gases de Efeito Estufa (GEE)	Diminui o uso de agro defensivos
Diminui drasticamente a massa e volume dos resíduos orgânicos	Diminui a perda de solo na enxurrada

Fonte: Beltrame (2020)

Os principais motivos da dificuldade de se processar os resíduos orgânicos via compostagem, segundo o IPEA (2012), é obtenção deles já separados na fonte geradora; a insuficiência de manutenção do processo; o preconceito com o produto; e a carência de investimentos e de tecnologia adequada para a coleta deste tipo de material. O Quadro 3 demonstra as dificuldades e oportunidades para o crescimento da compostagem no Brasil, de acordo com Beltrame (2020).

Quadro 3 - Dificuldades e oportunidades para o crescimento da compostagem no Brasil

<b>Dificuldades</b>	<b>Oportunidades</b>
Não há incentivos fiscais (reciclagem de matéria orgânica).	Alavancar novas indústrias no País, com geração de emprego e renda.
Falta de conhecimento das vantagens da adoção da adubação orgânica	Suprir parte da demanda de fertilizantes, aliviando a pressão na balança comercial e a dependência externa, aumentando o aproveitamento dos fertilizantes minerais.
Linhas de crédito adequadas para a indústria de compostagem	Minimizar o envio dos resíduos sólidos orgânicos para aterros sanitários, agregando valor, gerando empregos, tributos e divisas.

<b>Dificuldades</b>	<b>Oportunidades</b>
Não há equipamentos adequados para aferir medições para a compostagem, expl.: medidores de gases, de umidade, testes de maturação, softwares, etc..	Contribuir efetivamente para a construção e a recuperação dos solos brasileiros, viabilizando cada vez mais a agricultura intensiva, o aumento de produtividade e a redução nos índices de expansão da área plantada
Não há maquinário apropriado para tratamento de grandes gerações de resíduos.	Minimizar a geração de GEE a partir dos resíduos sólidos orgânicos.

Fonte: Beltrame (2020)

### **3.2.2 Reciclagem de materiais secos**

As unidades de triagem/recuperação de materiais recicláveis secos são tratamentos que reúnem um conjunto de procedimentos de segregação de materiais recicláveis por tipo de material (papel, plástico, metal, vidro, etc.), que foram recolhidos por meio de coleta seletiva ou não e destinados à recuperação. Estima-se que em 2019 no Brasil foram coletadas 65,11 milhões de toneladas de resíduos, 1,04 milhão de toneladas de resíduos recicláveis secos foram recuperados em 1.163 unidades de triagem. Estima-se ainda que o montante de 1,04 milhão de toneladas seja cerca de apenas 5,3% do total potencialmente recuperável de recicláveis secos (papel, plástico, metal e vidro) (SNIS, 2020)

A etapa de disposição final é sempre necessária, a menos que o tratamento dos resíduos tenha por finalidade prepará-los para um novo uso, como no caso das reciclagens (MELLO, 2008). Entende-se como disposição final adequada, o encaminhamento dos rejeitos para um aterro sanitário (PNRS, 2010). Contudo, os lixões e aterros controlados (unidades inadequadas), ainda são destino de boa parte dos resíduos dos brasileiros, com 23% e 17,5% respectivamente (ABRELPE, 2018/2019).

Na dimensão global, segundo o IPCC (2014), apenas 20% RSU são reciclados, e cerca de 14% são tratados com aproveitamento energético, enquanto o restante é depositado em lixões ou aterros sanitários a céu aberto. Na América Latina e no Caribe, região com uma das mais altas taxas de urbanização do mundo, com cerca de 500 milhões de pessoas vivendo em centros urbanos, possui taxas de reciclagem ainda baixas, entre 1% e 20%, de modo que aproximadamente 90% dos resíduos municipais ainda são encaminhados à disposição final. Por dia, estima-se que 17.000 toneladas de resíduos plásticos têm destinação inadequada (ONU, 2018).

Como já citado anteriormente, as taxas de geração de resíduos sólidos são uma função tanto da população quanto da sua renda, contudo, há uma lacuna nos dados, o que resulta em altas incertezas para as estimativas de emissões de GEE, especialmente de países em desenvolvimento. No Brasil, segundo o SNIS (2019), a quantidade de recicláveis secos no Brasil pôde ser estimada a partir de 1.681 municípios, que apresentaram as informações necessárias, com um aproveitamento do montante de 929,0 mil toneladas de recicláveis. Uma vez que, em diversos municípios, há a possibilidade de os resíduos recuperados resultarem de uma coleta convencional, seguida de “usinas de triagem e compostagem”, para quantificar os recicláveis recuperados, o SNIS considerou que os resíduos recuperados se distribuem por toda população urbana do município, independente do percentual de atendimento com coleta seletiva na região. A Tabela 1 traz a massa recuperada de recicláveis secos dos municípios participantes por macrorregião geográfica.

Tabela 1 - Massa recuperada de recicláveis secos dos municípios participantes do SNIS, segundo macrorregião geográfica

Macrorregião	Quantidade de municípios	População urbana	Massa recuperada de recicláveis secos		Massa recuperada per capita (IN032) (kg/hab./ano)
			Total (CS009) (ton./ano)	Média municipal (ton./mun./ano)	
Norte	52	7.587.545	37.170,50	714,8	4,9
Nordeste	127	20.386.914	100.719,90	793,1	4,9
Sudeste	731	63.999.050	406.269,40	555,8	6,4
Sul	667	21.483.989	305.604,30	458,2	14,2
Centro-Oeste	104	9.919.369	79.195,80	761,5	8
<b>Total - 2019</b>	<b>1.681</b>	<b>123.376.867</b>	<b>928.959,90</b>	<b>552,6</b>	<b>7,5</b>
<b>Total - 2018</b>	<b>1.546</b>	<b>121.241.628</b>	<b>923.285,90</b>	<b>597,2</b>	<b>7,6</b>
<b>Total - 2017</b>	<b>1.497</b>	<b>115.305.702</b>	<b>851.785,00</b>	<b>569</b>	<b>7,4</b>

Fonte: SNIS (2020)

Informações sobre geração e coleta de resíduos sólidos urbanos, em geral, estão disponíveis, mas ainda há dificuldades para realizar análises mais específicas por falta de participação dos envolvidos. No Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos de 2020 do SNIS, também foi estimado a composição do total da massa recuperada de recicláveis por tipo de material. Contudo, houve a participação de um número menor de municípios, uma vez

que apenas 1.175 preencheram os campos referentes às parcelas de papel, plástico, metal, vidro e outros (correspondendo a um percentual de 21,1% do total do país) (SNIS, 2020). O Quadro 4 traz a composição total da massa recuperada de recicláveis por tipo de material.

Quadro 4- Incidências de materiais recicláveis secos recuperados por tipo de material, segundo faixa populacional

Ano de Referência	Quantidade de municípios	Papel e papelão (CS010) (ton.)	Plásticos (CS011) (ton.)	Metais (CS012) (ton.)	Vidros (CS013) (ton.)	Outros (CS014) (ton.)	TOTAL
2019	1.175	256.156,50	165.304,30	82.441,10	77.487,60	98.269,20	<b>679.658,70</b>
<b>Total – 2019</b>	<b>21,10%</b>	<b>37,70%</b>	<b>24,30%</b>	<b>12,10%</b>	<b>11,40%</b>	<b>14,50%</b>	<b>100,00%</b>
<b>Total - 2018</b>	<b>18,50%</b>	<b>42,00%</b>	<b>22,60%</b>	<b>13,10%</b>	<b>12,20%</b>	<b>10,10%</b>	<b>100,00%</b>

Fonte: SNIS (2020)

No SNIS (2019) há também estatística acerca da taxa de recuperação de materiais recicláveis em capitais no ano de 2018. As Taxa de recuperação de recicláveis em relação ao total coletado (%) nas capitais em 2018 estão dispostas no Quadro 5.

Quadro 5 - Taxa de recuperação de recicláveis em relação ao total coletado (%) nas capitais em 2018

Municípios (capitais)	Taxa de recuperação de recicláveis secos (%)
São Luís	5,44
João Pessoa	5,31
Florianópolis	4,55
Goiânia	4,02
Porto Alegre	2,16
Curitiba	2,01
Cuiabá	1,43
Brasília	1,35
Porto Velho	1,35
Manaus	1,07

<b>Municípios (capitais)</b>	<b>Taxa de recuperação de recicláveis secos (%)</b>
Vitória	0,91
São Paulo	0,88
Salvador	0,86
Natal	0,72
Palmas	0,58
Belo Horizonte	0,55
Belém	0,53
Fortaleza	0,47
Campo Grande	0,47
Aracajú	0,44
Maceió	0,37
Rio de Janeiro	0,35
Macapá	0,27
Recife	0,20
Teresina	0,20
Rio Branco	0,19
Boa Vista	ND

Fonte: SNIS (2019)

No tocante aos índices de reciclagem de alguns materiais específicos que compõem a fração seca dos RSU no Brasil, as latas de alumínio possuem o maior índice de aproveitamento em relação aos demais tipos de materiais (Quadro 6).

Quadro 6 - Índice de reciclagem de resíduos secos provenientes de embalagens

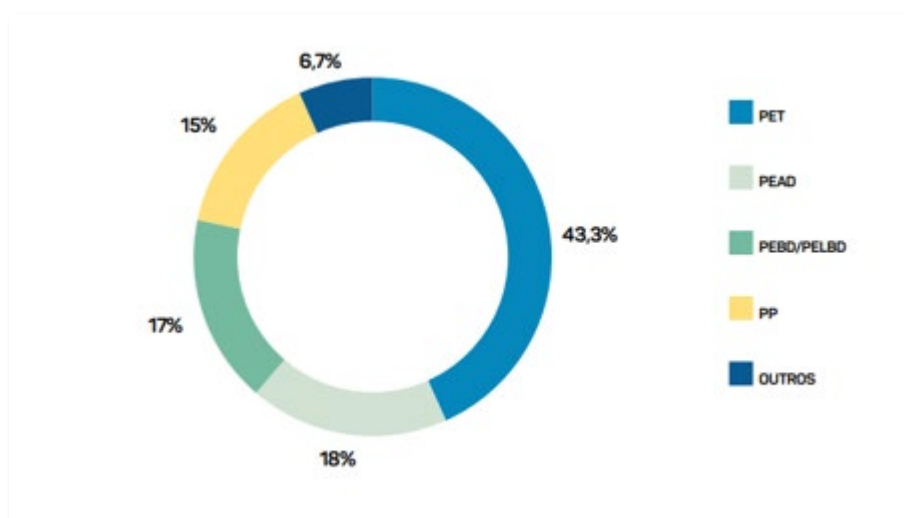
<b>Resíduos recicláveis de Embalagens</b>	<b>Índice de Reciclagem (%)</b>	<b>Ano-base</b>
Latas de Aço	47,10	2019
Latas de Alumínio	97,30	2017
Papel/Papelão	68,00	2018
Tetra Pak	29,10	2018
Plástico	22,10	2018
Vidro	49,00	2007



Fonte: ABEAÇO (2019), ABAL (2018), IBÁ (2018), CEMPRE (2019), ABIPLAST (2018) e ABIVIDRO (2007) Apud SNIS (2019).

Especificamente quanto ao plástico, a indústria de reciclagem produziu 757.654 toneladas (22,10% da indústria nacional) de resinas recicladas de materiais pós-consumo em 2018 segundo a Abiplast. O Gráfico 2 demonstra a contribuição por tipo de material.

Gráfico 2 - Reciclagem de plástico por tipo de material



Fonte: Abiplast (2019)

### 3.3 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE EMISSÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA DECORRENTES DAS ATIVIDADES DE GESTÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS.

Neste item serão abordadas 3 ferramentas utilizadas para cálculo de emissão de GEE provenientes da gestão de resíduos. Vale ressaltar que existem inúmeras ferramentas para calcular as emissões de GEE, sejam a partir de resíduos orgânicos ou recicláveis secos, optou-se por focar em apenas três que foram utilizadas em alguns dos estudos realizados no Brasil.

#### 3.3.1 Metodologia: AMS-III.AJ - Recovery and Recycling of Material from Solid Waste – AMS-III.AJ.

A metodologia AMS-III.AJ - Recovery and Recycling of Material from Solid Waste – AMS-III.AJ (Recuperação e Reciclagem de Materiais de Resíduos Sólidos), faz parte da lista de metodologias do Clean Development Mechanism (CDM) desenvolvidas pela UNFCCC. É uma metodologia simplificada, utilizada em projetos classificados como de pequena escala,

onde se enquadram os projetos que preveem reduções de até 60 kt tCO<sub>2</sub>-eq /ano (GODECKE, 2013).

A metodologia AMS-III.AJ, possibilita calcular a redução das emissões de GEE decorrente das atividades de recuperação e reciclagem de materiais, fazendo com que sejam inseridos novamente em um ciclo produtivo na indústria e, como consequência, reduzindo a demanda de insumos e proporcionando economia de energia (UNFCCC, 2021).

Em resumo, para calcular a redução das emissões ocasionadas pela reciclagem, deve ser considerado a quantidade de combustíveis fósseis e energia elétrica utilizada na fabricação do material em questão (MASSI, 2019). A redução das emissões decorrente da reciclagem dos materiais é obtida através da Equação 1 definida pela metodologia AMS-III.AJ.

$$RE(ano) = BE(ano) - PE(ano) - LE(ano) \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

RE: Redução das emissões no ano avaliado (tCO<sub>2</sub>-eq);

BE: Emissões da linha de base no ano avaliado (tCO<sub>2</sub>-eq); emissões geradas durante a produção de cada tipo de material virgem (plástico, papel, alumínio, metal e vidro);

PE: Emissões do projeto no ano avaliado (tCO<sub>2</sub>-eq); emissões geradas durante os processos de reciclagem;

LE: Emissões fugitivas no ano avaliado (tCO<sub>2</sub>-eq); corresponde às emissões de GEEs que ocorrem fora do limite da atividade de projeto.

Para as emissões da linha de base deve considerar as emissões associadas ao consumo de energia elétrica e de combustíveis fósseis para a fabricação de determinado material. Ainda segundo a metodologia AMS III-AJ, mesmo que a origem do material não seja conhecida, as emissões da produção desse material devem ser calculadas com base nas condições típicas do país em que a reciclagem será realizada. Vale ressaltar que mesmo que o material tenha sido produzido em outro país, o fator de emissão de CO<sub>2</sub> da energia elétrica calculado é o gerado no país de origem do projeto. Os fatores de emissão de CO<sub>2</sub> da energia elétrica gerada estima a quantidade de CO<sub>2</sub> emitida na atmosfera decorrente da geração de certa quantidade de energia elétrica (LIMA, 2012).

As emissões de GEE da linha de base são calculadas pela Equação 2:

$$BEy = \sum_I Q_i * L_i * [(SEC_{bi} * EF_{el}) + (SFC_{bi} * EF_{ff})] \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

$Q_i$  = Quantidade de tipo de recurso  $i$  reciclado por ano  $y$  (t/ano);

$L_i$  = Fator de ajuste;

$SEC_{bi}$  = Consumo específico de energia elétrica para a produção de eletricidade matéria-prima virgem tipo  $i$  (Mwh/t)

$EF_{el}$  = Fator de emissão de geração de eletricidade específico de combustível para a produção de material virgem do tipo  $i$  (tCO<sub>2</sub>-eq/Mwh);

$SFC_{bi}$  = Consumo específico de combustíveis para produção de material virgem do tipo  $i$  (GJ /t);

$EF_{ff}$  = Fator de emissão de CO<sub>2</sub> para combustível fóssil (tCO<sub>2</sub>/ GJ).

Por fim, partir da Equação 3 calcula-se as emissões do projeto (PE)

$$PEy = \sum_I Q_i * L_i * [(SEC_{rec} * EF_{elp}) + (SFC_i * EF_{ff})] \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

$Q_i$  = Quantidade de tipo de recurso  $i$  reciclado por ano  $y$  (t/ano);

$L_i$  = Fator de ajuste;

$SEC_{rec}$  = Consumo específico de energia elétrica da unidade de reciclagem proporcional ao material tipo (Mwh/t);

$EF_{elp}$  = Fator de emissão de geração de eletricidade específico de combustível para a produção de material virgem do tipo  $i$  (tCO<sub>2</sub>-eq/Mwh);

$SFC_i$  = Consumo específico de combustíveis na unidade de reciclagem proporcional ao material do tipo  $i$  (GJ /t);

$EF_{ff}$  = Fator de emissão de CO<sub>2</sub> para combustível fóssil (tCO<sub>2</sub>/ GJ)

A seguir, serão apresentados os principais fatores e parâmetros que devem ser considerados no uso da metodologia. Os valores considerados são referentes as condições brasileiras.

O fator de emissão de CO<sub>2</sub> para energia elétrica têm como objetivo estimar a quantidade de CO<sub>2</sub> associada a geração de energia elétrica. Esse fator é calculado a partir da média das

emissões da geradas por todas as usinas que estão gerando energia no momento (MCTIC, 2021). O Quadro 7 traz os fatores de emissão médios dos últimos 5 anos do Brasil.

Quadro 7 - Fator de emissão de CO<sub>2</sub> da Energia elétrica gerada no Brasil.

<b>ANO</b>	<b>Fator</b>	<b>Fonte:</b>
2017	0,0927	MCTIC (2021)
2018	0,0740	
2019	0,0750	
2020	0,0617	
2021	0,1264	

Fonte: Elaborado pela Autora (2022)

Durante o processo de reciclagem ocorrem perdas de materiais que podem ocorrer desde a coleta até os processos de reciclagem em sí. Dessa forma, entende-se que uma tonelada de material reciclado não é gerada a cada tonelada de sucata/resíduo que entra no processo de reciclagem (CARDIM, 2012). O fator de ajuste Li se refere a degradação na qualidade do material e perdas no processo de reciclagem. A US EPA (2006) publicou um relatório no qual traz os fatores de ajuste para cada material (Ver Quadro 8).

Quadro 8 - Fator de ajuste para cada tipo de material

<b>Material</b>	<b>LI</b>
Alumínio	0,95
Plástico	0,75
Papel	0,93
Vidro	0,88
Metais	0,98

Fonte: USEPA (2006)

O Quadro 9 e apresenta os consumos de energia elétrica no processo de reciclagem e no processo de produção de 1 tonelada de material, a única fonte encontrada data de 2003, do livro de Sabetai Calderoni.

Quadro 9 - Consumo de energia elétrica no processo de reciclagem (SECi) e produção SEBi (Kwh) dos materiais

<b>Material</b>	<b>SECi (Kwh)</b>	<b>SEBi (Kwh)</b>
Alumínio	700	17.600,00
Plástico	1440	6.740,00
Papel	1470	4.980,00
Vidro	4190	4.830,00

Fonte: Calderoni (2003)

Segundo a metodologia, para cálculo das emissões de CO<sub>2</sub> das atividades do projeto (PE) deve considerar as mesmas variáveis utilizadas no cálculo na linha de base (BE), baseando-se no consumo de energia elétrica e consumo de combustíveis fósseis.

Cabe destacar que as emissões fugitivas não são significativas em projetos de reciclagem (MASSI, 2019).

### **3.3.2 Ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) no Manejo de RSU para o Brasil – Metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).**

O Projeto ProteGEEr, é um projeto de cooperação técnica entre o Brasil e a Alemanha para promover uma gestão sustentável e integrada dos resíduos sólidos urbanos (PROTEGEER, 2022). Como parte de suas atividades, o ProteGEEr desenvolveu um conjunto de ferramentas de apoio à gestão municipal com potencial de auxiliar os gestores na tomada de decisão em temas prioritários referentes à gestão de resíduos sólidos urbanos. Uma delas, é a Ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) no Manejo de RSU para o Brasil, idealizada para apoiar a tomada de decisões de gestão de resíduos sólidos com base na influência desses resíduos nas emissões de GEE. Ela é desenhada para uso no Brasil a nível de municípios, estados e consórcios, bem como do governo federal.

Essa ferramenta permite a quantificação e comparação das emissões de GEE para diferentes estratégias de gestão de resíduos, e observar as reduções de GEE com a aplicação de diferentes opções de reciclagem e tratamento de resíduos. Diferentes estratégias de gestão de resíduos podem ser comparadas através do cálculo das emissões de GEE das frações dos seguintes resíduos reciclados:

- Vidro;
- Papel e papelão;
- Plásticos;
- Metais;
- Resíduos orgânicos.

A Calculadora analisa as emissões de todos os fluxos dos resíduos para reciclagem, tratamento e disposição final respectivamente, e calcula as emissões totais de GEE de todas as etapas do processo em CO<sub>2</sub>.eq – “do berço ao túmulo”.

As atividades de reciclagem levam a produtos secundários, que substituem as matérias-primas primárias ou os combustíveis fósseis (no caso da geração de energia a partir dos resíduos). Os benefícios da substituição de matérias-primas primárias ou combustíveis fósseis são calculados como créditos de acordo com as emissões evitadas nos processos correspondentes, segundo o método da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Somente as emissões da coleta de resíduos não foram tomadas em consideração, uma vez que se supõe que as emissões geradas pela coleta de resíduos estejam mais ou menos na mesma faixa para cada cenário. Até quatro sistemas diferentes de gestão de resíduos podem ser comparados usando a Calculadora. Isso quer dizer que, além do Cenário Base, três cenários definidos pelo usuário podem ser analisados ao mesmo tempo.

A ACV em grande escala envolve o inventário de todos os fluxos de materiais e energia ambientalmente relevantes dentro dos limites do sistema de um produto. Esta abordagem não é necessária quando apenas um impacto ambiental, como a emissão de gases de efeito estufa (IPEA, 2016). Por razões metodológicas e práticas, a Calculadora foi projetada aplicando diversas simplificações. Enfatiza-se que essa ferramenta não representa uma ACV completa, por tomar o aquecimento global como o único impacto ambiental a ser quantificado.

Informações gerais sobre a ferramenta:

- Foi projetada para ser utilizada no Excel;
- Calculadora permite comparar três cenários a um cenário de Cenário-base;
- Há instruções em textos e comentários em células específicas;
- É necessário inserir os seguintes dados: quantidades, caracterização, tratamentos e destinação final dos resíduos;
- Os dados a serem inseridos devem ser adicionados nas células verdes;
- Não é possível comparar mais de um quantitativo anual e composição de resíduos (a fim de garantir uma base de comparação entre os cenários).

Caso não haja informação gravimétrica disponível, a ferramenta recomenda os valores-padrão indicados no Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES) que, por sua vez, faz uma caracterização média do RSU nacional com base em dados da caracterização gravimétrica de 93 estudos realizados entre 1995 e 2008 (Ver Quadro 10).

Quadro 10 - Composição de Resíduos Sólidos

<b>Plano Nacional de Resíduos Sólidos Planares 2020</b>	
<b>Composição</b>	<b>%</b>
Resíduos Orgânicos	51,4

<b>Plano Nacional de Resíduos Sólidos Planares 2020</b>	
Papel, papelão e tetrapak	13,1
Plástico Total	13,5
Plástico Filme	8,9
Plástico Rígido	4,6
Vidro	2,4
Alumínio	0,6
Metais	2,9
Aço	2,3
Outros	16,7

Fontes: Planares (2020) Apud PROTEGEER (2022)

### 3.3.3 Metodologia: AMS-III.F – Avoidance of methane emissions through composting

Essa ferramenta é uma opção de ferramenta para projetos com pequena escala de emissões de GEE e empresas com resíduos coletados por coleta seletiva. A partir dessa ferramenta, calcula-se as emissões evitadas de GEE para a atmosfera que ocorreriam caso os resíduos fossem destinados ao aterro sanitário. Para fins de cálculo, é feita a comparação entre as emissões de metano oriundas da disposição de resíduos orgânicos em aterros sanitários (linha de base) e projetos de tratamentos biológicos como a compostagem (Projeto). O cálculo é realizado a partir da Equação 4.

$$ERy = BEy - (PEy + LEy) \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

$ERy$  = Reduções de emissões de CH<sub>4</sub> no ano y (tCO<sub>2</sub>-eq);

$BEy$  = Emissões de CH<sub>4</sub> na linha de base no ano y (tCO<sub>2</sub>-eq);

$LEy$  = Emissões fugitivas no ano y (tCO<sub>2</sub>-eq);

$PEy$  = Emissões de CH<sub>4</sub> pelo projeto de compostagem no ano y.

A construção do cenário de linha de base da metodologia é realizada a partir da Equação 5:

$$BEy = BECH_4,SWDS,y + BEww,y + BECH_4,manure,y - MDy,reg \quad \text{Equação 5} \\ \times GWPCH_4$$

Onde:

$BE_{CH_4,SWDS,y}$  = Emissão de metano durante o ano  $y$  pela deposição de resíduos sólidos em aterros sanitários, considerando a data de início do projeto até o final do ano. (t CO<sub>2</sub>-eq);

$BE_{ww,y}$  = Emissões da linha de base das águas residuais co-compostadas durante o ano  $y$ ;

$BE_{CH_4,manure,y}$  = Emissões da linha de base de esterco compostado pelas atividades do projeto durante o ano  $y$ ;

$MD_{y,reg}$  = Quantidade de metano que teria de ser capturado e queimado no ano “ $y$ ” para cumprir as regulamentações vigentes durante o ano na ausência do projeto. (ton CH<sub>4</sub>);

$GWP_{CH_4}$  = Potencial de aquecimento global (Global Warming Potential) do metano.

Tanto  $BE_{CH_4,manure,y}$  quanto  $BE_{ww,y}$  só devem ser considerados em estudos que realizem tratamento de águas residuais e esterco animal.

Em relação ao termo  $MD_{y,reg}$ , uma vez que a legislação brasileira estabelece que os estados brasileiros deve estabelecer os processos de licença ambiental de aterros da sua região, cada estado define os padrões de lançamento, restrições, requisitos ambientais, etc. para seus aterros sanitários (UNFCCC, 2012).

As emissões de GEE pela compostagem são calculadas pela Equação 6:

$$PE_y = PE_{y,transp} + PE_{y,power} + PE_{y,comp} + PE_{y,runoff} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

$PE_{y,transp}$  = Emissões devido ao incremento no transporte no ano  $y$  (tCO<sub>2</sub>-eq)

$PE_{y,power}$  = Emissões por consumo de eletricidade ou diesel no ano  $y$  (tCO<sub>2</sub>-eq)

$PE_{y,comp}$  = Emissões de metano durante processo de compostagem no ano  $y$  (tCO<sub>2</sub>-eq)

$PE_{y,runoff}$  = Emissões de metano por água residual no ano  $y$  (tCO<sub>2</sub>-eq)

O Quadro 11 traz os parâmetros que devem ser considerados no cálculo de emissões do processo de compostagem.



Quadro 11 - Parâmetros para cálculo de emissões de CH<sub>4</sub> na linha de base.

<b>Parâmetro</b>	<b>Premissa</b>
$\phi$	Valor padrão para o fator de correção para incertezas do modelo
F	Fração de metano capturado no aterro sanitário e queimada em flare/incinerado
GWPC <sub>CH<sub>4</sub></sub>	Potencial de aquecimento global
OX	Fator de oxidação (reflete a quantidade de metano do aterro que é oxidado no solo ou em outro material que cobre o resíduo)
f	Fração de metano no gás de aterro (em volume)
DOC <sub>f</sub>	Fração de Carbono orgânico degradável (DOC) que pode decompor
MCF	Fator de correção do metano
DOC <sub>j</sub>	Fração de carbono orgânico degradável (por massa) no resíduo tipo "j"
K <sub>j</sub>	Taxa de decaimento do resíduo do tipo "j"
X	Ano de início das atividades da empresa de compostagem
Y	Ano que finaliza o tempo necessário para degradação total da matéria orgânica no aterro sanitário.

Fonte: Adaptado de SILVA SANTOS (2020).

Para o cálculo de produção de metano na compostagem, a metodologia AMS.III.F usa os valores de 4 e 10 kg de gás metano para cada tonelada de resíduo tratado, na base úmida e na base seca, respectivamente.

Quanto às emissões fugitivas (*LEy*), só se deve considerá-las se a tecnologia de compostagem é o equipamento transferido de outra atividade ou se o equipamento existente é transferido para outra atividade.

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 IDENTIFICAÇÃO DAS FONTES

O referencial teórico foi construído por meio de consultas a artigos científicos, dissertações, relatórios, dentre outros. Primeiramente foi realizado um mapeamento de dados na literatura, com o intuito de proporcionar um primeiro contato com o assunto em questão e selecionar uma literatura preliminar para a pesquisa. Para que isso fosse possível, foi realizada uma série de pesquisas, por meio da ferramenta Google, bancos de dados científicos online e livros. Desta forma, foram encontrados artigos científicos sobre o tema e identificadas as palavras-chave cruciais para a pesquisa. O Quadro 12 traz os estudos de revisão de literatura encontrados.

Quadro 12 - Revisão literária preliminar

Título	Fonte	Ano da publicação
Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil	ABRELPE	2021
Gestão Sustentável de Resíduos Sólidos Urbanos: transferência de experiência entre a Alemanha e o Brasil.	Klaus Fricke, Christiane Pereira, Aguinaldo Leite, Marius Bagnati	2015
Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos	SNIS	2020

Fonte: Elaborado pela autora

A partir dos estudos citados no Quadro 12, foram selecionadas as seguintes palavras chaves para prosseguir com a pesquisa: *solid waste management*, emissões na reciclagem, *GHG*

*emissions, emissões evitadas, avoided emissions, emissions from solid waste, composting emissions.*

As pesquisas foram realizadas principalmente pelo Science Direct, referências encontradas por meio de artigos e fontes amplamente conhecidas e renomadas como: SNIS, IPCC, UNFCCC. Foram utilizadas pesquisas em artigos nacionais e internacionais.

## 4.2 LEITURA DO MATERIAL

Muito embora seja desejável certo grau de sistematização na leitura dos materiais, segundo Gil (2002), não se deve prejudicar a leitura por normas exageradamente rígidas, especialmente quando as normas não consideram as diferenças individuais de cada caso. Seguindo esta orientação, a leitura dos materiais foi realizada seguindo a proposta a seguir:

- **Leitura exploratória:** de acordo com Gil (2002), tem como objetivo verificar quanto da obra interessa à pesquisa. A leitura exploratória consiste em uma leitura breve, no geral, a leitura dos índices da bibliografia, notas de rodapé, introdução, do prefácio e das conclusões já é suficiente para ter uma visão global do conteúdo. Através desse tipo de leitura, foi obtido como resultado cerca de 40 materiais, dentre eles: artigos, relatório e pesquisas.
- **Leitura seletiva:** é a leitura realizada após a leitura exploratória, a fim de determinar o material que de fato é de interesse da pesquisa em questão. A leitura seletiva deve ser mais profunda que a anterior. Contudo, essa leitura não necessariamente é definitiva para a pesquisa, é possível que se volte ao mesmo material com propósitos diferentes. Nesta etapa é necessário ter os objetivos da pesquisa claros, para evitar a leitura de textos desnecessários que não contribuam a pesquisa (GIL, 2002). Com essa segunda leitura, foram selecionados 10 materiais de base deste trabalho.
- **Leitura analítica:** este tipo de leitura tem como finalidade organizar e sintetizar as informações contidas nas fontes encontradas, desta forma, faz-se possível obter respostas ao problema da pesquisa (GIL, 2002).

## 4.3 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DE RESULTADOS

Por fim, a construção deste trabalho foi realizada substancialmente a partir de 7 publicações, dentre eles pesquisas, artigos e relatórios. Para a estimativa de emissões diretas e evitadas, foi dada prioridade para a seleção de publicações mais recentes, considerando a evolução da tecnologia para quantificá-las. Vale ressaltar que essa prioridade dada à

publicações recentes, não objetivou excluir completamente os artigos mais antigos, que muitas vezes traz parte da base teórica sobre o assunto. O Quadro 13 traz as revisões selecionadas para fundação dos resultados deste trabalho.

Quadro 13 - Revisões de literatura selecionadas para fundamentação dos resultados e discussões

<b>Título</b>	<b>Autor(es)</b>	<b>Ano de publicação</b>	<b>Estudo</b>
Comparação das Emissões de Gases de Efeito Estufa em uma Cooperativa de Reciclagem de Materiais.	LONGO, G. L.; Nunes, A. O.; Barrios, C. C.; Paiva, J. M. F.; Moris, V. A. S.	2019	2
Method For Estimating Greenhouse Gas Emission Reductions from Diversion of Organic Waste from Landfills to Compost Facilities	CALIFORNIA ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY	2017	6
A Inserção da Reciclagem nos Mercados de Carbono: Avaliação da Situação Brasileira e Estudo de Caso do Município de Porto Alegre, Rio Grande do Sul	GODECKE, M.V.	2013	4
Life-Cycle Greenhouse Gas Emissions and Human Health Trade-Offs of Organic Waste Management Strategies	NORDAHL, S.L et al.	2020	5
Valoração ambiental da reciclagem para a redução de emissões de CO <sub>2</sub>	MASSI, E. H. G.; LUIZ, L. A. C; MASSI, C. G.	2019	1
Compostagem como Redutor de Gases de Efeito Estufa, uma Alternativa à Disposição de Resíduos Orgânicos em Aterros Sanitários.	SILVA SANTOS, C.F.C	2020	7
Modelo de valoração ambiental da reciclagem de resíduos sólidos urbanos	LIMA, Guilherme Cardim Gouveia	2012	3

Fonte: Elaborado pela autora.

Ainda com o intuito de analisar e melhor interpretar os resultados encontrados nos estudos de reciclagem de resíduos secos apresentados no item 5.1, realizou-se os cálculos dos estudos 1, 3 e 4. Para que isso fosse possível, utilizou-se os parâmetros que cada autor apresentou, salvo o fator de emissão de energia do estudo 4.

Vale ressaltar que se optou por analisar esses três estudos pelo fato de apenas esses três apresentarem dados suficientes para realizar os cálculos. Os três estudos seguiram a metodologia AMS-III.AJ do UNFCCC.

Utilizou-se a ferramenta Excel para digitalizar e organizar os parâmetros dados, e a partir daí calculou-se as emissões com as equações dispostas no item 3.3.1.

Para estimar as emissões de CO<sub>2</sub>-eq que poderiam ter sido evitadas com a reciclagem dos resíduos sólidos urbanos no Brasil desde a publicação da Política Nacional de Resíduos Sólidos em 2010 até o ano de 2020, foram utilizadas as emissões médias obtidas pelos estudos complicados nos itens 5.1 e 5.2. Vale ressaltar que foram utilizadas apenas as emissões de plástico, papel e vidro, pois apenas esses três materiais foram citados em mais de um dos 7 estudos selecionados para fundação dos resultados desse trabalho. O primeiro passo para estimar essas emissões de CO<sub>2</sub>-eq foi obter os dados de destinação de resíduos no site do SNIS. Vale ressaltar que os dados do SNIS são levantados apenas com base nas informações dadas pelos municípios. Assim, entende-se que há uma quantidade gerada não informada (municípios que não informaram ao SNIS ou dados submedidos, porém, optou-se neste estudo por utilizar apenas os dados coletados pelo SNIS.

## 5 ESTUDOS, RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse item serão apresentados os principais estudos que contemplam resultados de emissões evitadas de CO<sub>2</sub>-eq a partir de reciclagem de resíduos, assim como uma estimativa da redução de emissões de GEE dos resíduos computados pelo SNIS no intervalo de 2010 e 2020. O item 5.1 traz os resultados de emissões de reciclagem de resíduos secos e o item 5.2 de resíduos orgânicos. Ao final de cada item realizou-se uma breve discussão a respeito dos resultados obtidos e compilados. O item 5.3 traz os resultados dos cálculos do potencial de redução de emissão de GEE proposto.

### 5.1 ESTUDOS E RESULTADOS: RECICLAGEM DE RESÍDUOS SECOS

#### • Estudo 1

O primeiro estudo que será abordado buscou mostrar a importância da reciclagem de resíduos sólidos, através da valoração da reciclagem com vistas à redução de CO<sub>2</sub>. O objetivo da pesquisa foi estimar a destinação dos resíduos de uma empresa recicladora na região metropolitana de Londrina-PR em 2017.

Para determinar as emissões, utilizou-se a ferramenta do UNFCCC: Recovery and Recycling of Material from Solid Waste – AMS-III.AJ (Recuperação e Reciclagem de Materiais de Resíduos Sólidos). Como descrito anteriormente, são consideradas como BE as emissões relacionadas à produção de material virgem, enquanto a PE se refere às emissões decorrentes dos processos de reciclagem dos resíduos (Equação 1). Emissões fugitivas no ano avaliado (tCO<sub>2</sub>-eq) não foram consideradas nesse estudo.

Os materiais considerados na valoração foram agrupados em quatro grupos: Plásticos; Alumínio; Vidro e Papel. Tem-se que o papel engloba o papel branco, papel misto, Tetra Pak, jornal e papelão. O plástico engloba PEAD, PP, PVC, PET e PEBD.

A seguir serão dispostos no formato de quadros os fatores considerados nos cálculos da metodologia.

Como a metodologia sugere, o estudo utilizou o fator de ajuste “Li” para compensar as perdas no processo de reciclagem e na degradação da qualidade do material. Os fatores considerados no estudo são apresentadas na Quadro 14.

Quadro 14 - Fator de ajuste para cada tipo de material

<b>Material</b>	<b>LI</b>
Alumínio	0,93
Plástico	0,75
Papel	0,93
Vidro	0,88

Fonte: USEPA (2006) Apud. MASSI (2019)

No Quadro 15 é apresentado o fator de emissão de CO<sub>2</sub> da energia elétrica referente ao ano de 2017. Esse fator que é utilizado na metodologia para calcular tanto as emissões decorrentes do uso da energia elétrica na produção de materiais quanto da reciclagem.

Quadro 15 - Fator de emissão de GEE pela geração de energia

<b>Ano</b>	<b>EF el (tCO<sub>2</sub>-eq /MWh)</b>
2016	0,0817
2017	0,0927

Fonte: MCTIC (2017) Apud. MASSI (2019)

A metodologia indica que os fatores de emissão dos combustíveis fósseis utilizados no cálculo da BE e da PE devem ser expressos em termos de quantidade de CO<sub>2</sub> por Joule. Assim, tem-se que esses valores expressão a quantidade de CO<sub>2</sub> emitida pela queima de cada MJ dos combustíveis fósseis consumidos na produção e na reciclagem dos materiais (Quadro 16).

Quadro 16 - Fator de emissão por quantidade de combustível consumido.

<b>Combustível</b>	<b>Fator (KgCO<sub>2</sub> /MJ)</b>
FC1 Óleo Combustível	0,076593
FC2 Óleo Diesel	0,073326
FC3 Gás Natural	0,05582
FC4 Licor Negro	0,09438
FC5 Madeira	0,11071

Fonte: Adaptados de MASSI (2019)

A Quadro 17 apresenta os consumos de energia elétrica para produção de 1 tonelada de cada material.

Quadro 17 - Consumo de energia elétrica para a produção de materiais.

<b>Material</b>	<b>SECbi (Kwh)</b>
Plástico	6.740,00
Alumínio	17.600,00
Vidro	4.830,00
Papel	4.980,00

Fonte: CALDERONI (2003) Apud. MASSI (2019)

Os consumos específicos de combustíveis fósseis (em MJ) utilizados para produção de 1 tonelada de cada material empregado, são apresentados no Quadro 18.

Quadro 18 - Consumo de combustíveis fósseis para Produção dos Materiais.

<b>Material</b>	<b>Combustível</b>	<b>SFC bi (MJ)</b>	<b>Fonte</b>
Plástico	Gás Natural	15000	UNFCCC (2011)
Alumínio	Óleo combustível	24974,07	IPEA (2010)
Vidro	Gás Natural	8025,6	MME (2011)
Papel	Gás Natural	9550	BRACELPA (2010)
	Óleo combustível	2123	
	Licor Negro	22122	

Fonte: MASSI (2019)

O Quadro 19 apresenta os consumos de energia elétrica para reciclagem de 1 tonelada de cada material.

Quadro 19 - Consumo de energia elétrica no processo de reciclagem dos materiais.

<b>Material</b>	<b>SECbi (Kwh)</b>
Plástico	1440
Alumínio	700
Vidro	4190
Papel	1470

Fonte: CALDERONI (2003) Apud. MASSI (2019)

No Quadro 20, estão dispostos os valores dos combustíveis fósseis utilizados para reciclagem de 1 tonelada de cada material empregado. O autor ressalta ainda que não foram encontrados na literatura dados sobre o consumo do alumínio e plástico.



Quadro 20 - Consumo de Combustíveis fósseis para reciclagem dos materiais.

<b>Material</b>	<b>Combustível</b>	<b>SFC bi (MJ)</b>
Plástico	-	-
Alumínio	-	-
Vidro	Gás Natural	2.527,00
Papel	Gás Natural	5.242,33

Fonte: LIMA (2012) Apud. MASSI (2019)

Realizou-se os cálculos desse estudo para conferir os resultados trazidos no artigo em questão, utilizando os mesmos parâmetros e metodologia propostos pelo autor. A Tabela 5 traz os resultados obtidos, os quais se mostram coerentes com os resultados dos outros estudos apresentados a seguir, no entanto diferem dos resultados do estudo de Massi (2019).

Tabela 2 - Potencial de redução das emissões de CO<sub>2</sub> decorrentes das quantidades recuperadas pelas organizações de catadores em 2017

<b>Estudo de Londrina-PR (2017)</b>							
<b>Material</b>	<b>Tonelada de material reciclado</b>	<b>Recursos virgens</b>		<b>Recursos reciclados</b>		<b>Emissões evitadas</b>	
		<b>Emissão por ton de recurso (t de CO<sub>2</sub>-eq)</b>	<b>Emissões totais (t de CO<sub>2</sub>-eq)</b>	<b>Emissão por ton recursos (t de CO<sub>2</sub>-eq)</b>	<b>Emissões totais (t de CO<sub>2</sub>-eq)</b>	<b>Redução de Emissões (t de CO<sub>2</sub>-eq)</b>	<b>Redução de emissões por ton de resíduo (t de CO<sub>2</sub>-eq)</b>
Plástico	741,84	1,10	813,48	0,13	99,03	714,46	0,96
Papel e Papelão	2.004,55	3,30	6.607,51	0,06	130,08	6.477,43	3,23
Vidro	14,00	0,79	11,04	0,53	7,41	3,62	0,26
Alumínio	42,06	3,02	126,94	0,43	18,04	108,90	2,59

Fonte: Adaptado de MASSI (2019).

## • Estudo 2

Outro estudo realizado para avaliar a contribuição de uma cooperativa de reciclagem para a redução de emissão de GEE foi realizado utilizando os dados da Cooperativa de Reciclagem de Sorocaba (CORESO). A amostra de resíduos utilizada na pesquisa foi coletada pela CORESO de janeiro até agosto de 2016, totalizando 615 ton (LONGO, 2019).

As emissões de gases do efeito estufa foram calculadas por dois métodos distintos: através do software SimaPro e um método simplificado. Através do SimaPro, foi possível obter valores das emissões por tonelada de recursos virgens para todos os materiais, considerando os processos relacionados à obtenção do material desde a sua extração até o seu processo produtivo. Utilizando esse software, também foi possível identificar os GEE que são emitidos durante o processo de triagem.

No estudo de caso apresentado anteriormente, dos autores Gutberlet e King (2013), para fins de cálculo, constam somente as emissões provenientes do processo de produção, considerando o consumo de combustíveis fósseis e energia elétrica. Já nesse estudo utilizando esse software consegue-se aplicar a metodologia completa, que compreende até mesmo transportes e perdas e consumo de água.

Segundo Longo (2019), a partir do uso do método simplificado, é possível obter a quantidade de energia consumida na produção de materiais virgens ou reciclados, assim como a quantidade de energia economizada pelo uso de uma matéria-prima reciclada. Para o cálculo das emissões a partir do método simplificado, foram considerados os materiais de forma agrupada de acordo com o seu tipo. Assim foi possível identificar a estimativa de quanto seria evitado de emissão de GEE na produção de novos produtos ao se utilizar materiais reciclados em detrimento dos materiais virgens. Para a estimativa feita pelo software, foram utilizados os resíduos separados e não de forma agrupada como no método simplificado.

Nesse estudo, foi encontrado somente valores de emissões de GEE para PEAD, PP, PEBD, PET, PS, Papel e Papelão, Vidro e Alumínio, portanto foi englobado nessas categorias todos os tipos similares. Assim, os materiais de Embalagem Longa Vida, Metais na sua totalidade, Óleo, PVC, Caixaria, Plásticos para Limpeza, Ráfia, não foram considerados nos cálculos das emissões de gases do efeito estufa. 12,9 % do material reciclado para venda não foi avaliado nesse estudo, assim como 18,4 % (em média) dos resíduos foram encaminhados para aterros por não apresentarem valores comerciais (Ex: mangueiras, pneus, isopor, etc.). No

Quadro 21 traz as quantidades de cada material coletado entre janeiro e agosto de 2016 (LONGO, 2019).

Quadro 21 - Quantidade em kg de cada tipo de material no período entre janeiro e agosto de 2016.

Material	Kg de material coletado por mês na CORESO								
	Janeiro	fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	TOTAL
Papel e Papelão	48.204,00	55.466,50	38.707,00	42.475,00	42.549,00	56.942,00	45.963,00	47.481,00	377.787,50
Alumínios	1.085,57	1.355,79	1.158,32	1.385,71	1.182,72	2.159,55	1.191,62	1.206,73	10.726,01
Vidro	0,00	16.250,00	6.460,00	13.750,00	10.360,00	21.930,00	19.292,00	17.178,00	105.220,00
PEAD e PP	5.128,00	5.608,40	6.396,00	8.018,00	5.972,00	8.377,00	6.836,00	5.721,00	52.056,40
PEBD	3.097,00	5.491,50	4.348,00	5.043,00	4.772,00	7.118,00	5.171,50	3.962,50	39.003,50
PET e PS	3.119,00	5.048,50	3.403,00	4.675,00	3.548,00	4.624,00	3.241,50	3.393,00	31.052,00

Fonte: LONGO (2019).

Para fins de comparação de resultados, optou-se por trazer apenas os resultados obtidos a partir da estimativa de emissão calculada através do método simplificado.

Utilizando os valores de consumo de energia elétrica na produção de materiais reciclados e virgens dispostos respectivamente no Quadro 22 e Quadro 23, foi possível obter a quantidade de energia consumida através do método simplificado. De posse desses valores, obteve-se a quantidade evitada (economizada) ao se usar matéria-prima reciclada, de 2128,31 Mwh. Para todos os materiais uma quantidade significativa de consumo de energia pode ser evitada com a reciclagem, exceto para o vidro, cuja obtenção de material reciclado também apresenta alto consumo de energia.

Quadro 22 - Consumo de energia elétrica no processo de reciclagem dos materiais

<b>Material</b>	<b>SECI (Mwh)</b>
Alumínio	0,70
PEAD e PP	0,83
PEBD	0,83
PET e PS	0,83
Papel e Papelão	1,47
Vidro	4,19

Fonte: LONGO (2019).

Quadro 23 - Consumo de energia elétrica para a produção de materiais.

<b>Material</b>	<b>SEBi (Mwh)</b>
Alumínio	17,60
PEAD e PP	5,00
PEBD	5,84
PET e PS	5,28
Papel e Papelão	4,98
Vidro	4,83

Fonte: LONGO (2019).

A Tabela 6 traz os resultados obtidos para a redução de emissões de GEE em t de CO<sub>2</sub>-eq. Pelo método simplificado, constatou-se que houve uma quantidade significativa de consumo de energia evitada com a reciclagem para todos os materiais, exceto para o vidro, cuja obtenção de material reciclado também apresenta alto consumo de energia.

Tabela 3 - Resultados dos cálculos da emissão de GEE dos resíduos coletados pela CORESO (Método simplificado)

<b>Cooperativa CORESO</b>							
<b>Material</b>	<b>Ton. de material reciclado</b>	<b>Recursos virgens</b>		<b>Recursos reciclados</b>		<b>Emissões evitadas</b>	
		<b>Emissão por ton. de recurso (t de CO<sub>2</sub>-eq)</b>	<b>Emissões totais (t de CO<sub>2</sub>-eq)</b>	<b>Emissão por ton. recursos (t de CO<sub>2</sub>-eq)</b>	<b>Emissões totais (t de CO<sub>2</sub>-eq)</b>	<b>Redução de Emissões (t de CO<sub>2</sub>-eq)</b>	<b>Redução de emissões por ton. de resíduo (t de CO<sub>2</sub>-eq)</b>
PEAD e PP	52,06	0,77	40,09	0,18	9,37	30,72	0,59
PEBD	39,00	0,91	35,49	0,18	7,02	28,47	0,73
PET e OS	31,05	0,81	25,15	0,18	5,59	19,56	0,63
Papel e Papelão	377,79	0,90	340,01	0,32	120,89	219,12	0,58
Vidro	105,22	0,94	98,91	0,92	96,80	2,10	0,02
Alumínio	10,73	3,87	41,53	0,15	1,61	39,92	3,72

Fonte: Adaptado de Longo (2019).

- **Estudo 3**

Esse estudo trata dos resíduos coletados pelo Programa Ecoelce, iniciativa da concessionária de distribuição de energia do Estado do Ceará, que concede descontos na fatura de energia dos clientes mediante a entrega de resíduos recicláveis.

Os resíduos considerados no estudo, foram os resíduos coletados durante os meses de junho, julho e agosto de 2012, disposto no Quadro 24. Estimou-se a redução das emissões de CO<sub>2</sub> proporcionada pelo projeto naqueles meses utilizando a metodologia utilizada foi a AMS-III.AJ: “Recovery and recycling of materials from solid wastes”. Como já mencionado esta metodologia apresenta os procedimentos necessários para o cálculo da redução das emissões de GEE proporcionadas pelas atividades de recuperação e reciclagem de materiais (Ver Equação 1).

Quadro 24 - Quantidade em Kg de resíduos coletados pelo Ecoelce nos meses da pesquisa.

Meses (2012)	Plástico	Alumínio	Aço	Metais	Vidro	Papel/Papelão	Total
<b>Junho</b>	28.320,70	2.480,24	4.634,32	20.232,58	11.800,29	58.397,10	125.865,23
<b>Julho</b>	32.463,84	3.053,21	5.374,54	22.323,17	15.436,27	78.075,38	156.726,41
<b>Agosto</b>	33.173,90	2.579,63	2.127,24	22.712,85	15.092,69	75.015,09	150.701,40
<b>Total</b>	93.958,44	8.113,08	12.136,10	65.268,60	42.329,25	211.487,57	433.293,04

Fonte: Lima (2012)

Uma vez que o processo de reciclagem implica em perdas de materiais, faz-se necessário aplicar um fator de ajuste para cada material, os fatores considerados nesse estudo estão dispostos no Quadro 25.

Como já mencionado, quantidade de resíduos considerada no estudo foi estimada em 433,293 toneladas.

Quadro 25 - Fator de ajuste para cada tipo de material

Material	LI
Alumínio	0,95
Plástico	0,75
Jornal	0,94
Papel Branco	0,66
Papelão	0,93
Papel Misto	0,71

<b>Material</b>	<b>LI</b>
Vidro	0,88
Metais	0,98

Fonte: USEPA (2006) Apud Lima (2012)

O fator de emissão que consta no Quadro 26 é utilizado na metodologia para calcular tanto as emissões decorrentes do uso da energia elétrica na produção de materiais quanto da reciclagem.

Quadro 26 - Fator de emissão de GEE pela geração de energia

<b>Ano</b>	<b>EF el (kgCO<sub>2</sub>/KWh)</b>
2009	0,1635
2010	0,3095
2011	0,1988

Fonte: Lima (2012)

O consumo de energia elétrica para a reciclagem e para a produção de materiais estão dispostos respectivamente nos Quadro 27 e Quadro 28.

Quadro 27 - Consumo de energia elétrica no processo de reciclagem dos materiais

<b>Material</b>	<b>SECi (Kwh)</b>
Alumínio	700
Plástico	1440
Papel	1470
Vidro	4190

Fonte: Calderoni (2003) Apud. Lima (2012)

Quadro 28 - Consumo de energia elétrica para a produção de materiais

<b>Material</b>	<b>SECbi (Kwh)</b>
Alumínio	17.600,00
Plástico	6.740,00
Papel	4.980,00
Vidro	4.830,00
Aço	6.840,00



<b>Material</b>	<b>SECbi (Kwh)</b>
Metais	2.777,78

Fonte: Calderoni (2003) e BIR (2008) Apud. Lima (2012)

A metodologia indica que os fatores de emissão dos combustíveis fósseis utilizados no cálculo da BE e da PE devem ser expressos em termos de quantidade de CO<sub>2</sub> por Joule. Assim, tem-se que esses valores expressão a quantidade de CO<sub>2</sub> emitida pela queima de cada MJ dos combustíveis fósseis consumidos na produção e na reciclagem dos materiais (Quadro 29).

Quadro 29 - Fator de emissão por quantidade de combustível fóssil consumido.

<b>Combustível</b>	<b>Fator (KgCO<sub>2</sub> /MJ)</b>
FC1 Óleo Combustível	0,076593
FC2 Óleo Diesel	0,073326
FC3 Gás Natural	0,05582
FC4 Licor Negro	0,09438
FC5 Madeira	0,11071

Fonte: Adaptados de Lima (2012)

No Quadro 30 são apresentados os consumos específicos de combustíveis fósseis (em MJ) utilizados para produção de 1 tonelada de cada material considerado pelo modelo.

Quadro 30 - Consumo de combustíveis fósseis para Produção dos Materiais.

<b>Material</b>	<b>Combustível</b>	<b>SFC bi (MJ)</b>	<b>Fonte</b>
Plástico	Gás Natural	15000	UNFCCC (2011)
Alumínio	Óleo combustível	24974,07	IPEA (2010)
Aço	Óleo combustível	250,48	
	Óleo diesel	41,71	
Vidro	Gás Natural	8025,6	MME (2011)
Papel	Gás Natural	9550	BRACELPA (2010)
	Óleo combustível	2123	
	Licor Negro	22122	

Fonte: Lima (2012)

A Tabela 7 traz os resultados obtidos nos cálculos realizados para a obtenção da redução de emissões de GEE em t de CO<sub>2</sub>-eq a partir da reciclagem dos resíduos coletados no

projeto Ecoelce. Vale ressaltar que os resultados obtidos foram os mesmo que Lima (2012) descreve.

Tabela 4 - Resultados dos cálculos da emissão de GEE dos resíduos coletados no Projeto ECOELCE em 2012

ECOELCE (2012)							
Material	Tonelada de material reciclado	Recursos virgens		Recursos reciclados		Emissões evitadas	
		Emissão por ton. de recurso (t de CO <sub>2</sub> -eq)	Emissões totais (t de CO <sub>2</sub> -eq)	Emissão por ton. de recurso (t de CO <sub>2</sub> -eq)	Emissões totais (t de CO <sub>2</sub> -eq)	Redução de Emissões (t de CO <sub>2</sub> -eq)	Redução de emissões por ton. de resíduo (t de CO <sub>2</sub> -eq)
Plásticos	93,96	1,63	153,43	0,29	26,90	126,53	1,35
Aço	12,13	1,35	16,43	0,35	4,29	12,14	1,00
Alumínio	8,11	5,03	40,82	0,14	1,13	39,69	4,89
Papel e Papelão	211,49	3,51	742,20	0,58	123,69	618,51	2,92
Vidro	42,33	1,24	52,46	0,97	41,23	11,23	0,27
Metais	65,27	0,45	29,19	0,01	0,46	28,73	0,44
Total	433,29	-	-	-	-	-	-

Fonte: Adaptados de Lima (2012)

- **Estudo 4**

O último estudo escolhido no âmbito da reciclagem de materiais secos, teve como um dos seus objetivos analisar a viabilidade técnica, econômica e sociopolítica para o acesso da reciclagem da Coleta Seletiva de Porto Alegre e as possíveis receitas dos mercados de carbono. Nesse estudo é aplicada a metodologia AMS-III.AJ para a avaliação das reduções propiciadas pela reciclagem de plásticos na Coleta Seletiva de POA. Como descrito anteriormente, a metodologia AMS-III.AJ considerada como “BE” as emissões relacionadas à produção de material virgem, enquanto a “PE” se refere às emissões decorrentes dos processos de reciclagem dos resíduos (Ver Equação 1). Os materiais considerados para os cálculos foram: PEAD, PEBD, PET e PP, e suas respectivas quantidades estão dispostas no Quadro 31 a seguir.

Quadro 31 - Toneladas de material considerado nos cálculos de emissões

<b>Material</b>	<b>Tonelada de material reciclado</b>
PEAD	239,3
PEBD	328,3
PET	378,9
PP	130,8

Fonte: Elaborado pela Autora (2022).

Como a metodologia sugere, o estudo utilizou o fator de ajuste “Li” para compensar as perdas no processo de reciclagem e na degradação da qualidade do material. Uma vez que os materiais são todos plásticos, com isso, tem-se que o fator de ajuste é o mesmo (Ver Quadro 32).

Quadro 32 - Fator de ajuste para cada tipo de material

<b>Material</b>	<b>LI</b>	<b>Fonte</b>
PEAD	0,75	USEPA (2006)
PEBD	0,75	
PET	0,75	
PP	0,75	

Fonte: Elaborado pela Autora (2022).

No Quadro 33 é apresentado o fator de emissão de CO<sub>2</sub> da energia elétrica referente ao ano de 2013. Esse fator que é utilizado na metodologia deve ser utilizado para calcular tanto as emissões decorrentes do uso da energia elétrica na produção de materiais quanto da reciclagem daquele ano.

Quadro 33 - Fator de emissão de GEE pela geração de energia

<b>Ano</b>	<b>EF el (tCO<sub>2</sub>/MWh)</b>	<b>Fonte</b>
2010	0,3941	ENERGIMP (2013)

Fonte: Adaptado de Godecke (2013)

O fator utilizado no estudo de 0,3941 (tCO<sub>2</sub>/MWh) foi calculado pelo projeto CDM de Usina Eólica Acaraú I, da empresa Energimp S.A. No entanto, nesse mesmo ano o MCTI publicou um fator de emissão bem abaixo de 0,0512 (tCO<sub>2</sub>/MWh). Optou-se por refazer os cálculos utilizando todos os parâmetros dados pelo autor, exceto o fator de emissão de energia, o qual utilizou-se o publicado pelo MCTI (2022).

A Quadro 34 apresenta os consumos de energia elétrica para produção de 1 tonelada de cada material.

Quadro 34 - Consumo de energia elétrica para a produção de materiais.

<b>Material</b>	<b>SECbi (MWh/t)</b>
PEAD	0,83
PEBD	1,67
PET	1,11
PP	0,56

Fonte: Godecke (2013)

No Quadro 35 estão dispostos o fator de emissão do combustível fóssil óleo diesel, utilizados para reciclagem de 1 tonelada de cada material.

Quadro 35 - Fator de combustíveis fósseis para Produção dos Materiais.

<b>Material</b>	<b>Combustível</b>	<b>EFff (tCO<sub>2</sub>/Gj)</b>
PEAD	Óleo diesel	0,0741
PEBD	Óleo diesel	0,0741
PET	Óleo diesel	0,0741

<b>Material</b>	<b>Combustível</b>	<b>EFff (tCO<sub>2</sub>/Gj)</b>
PP	Óleo diesel	0,0741

Fonte: IPCC (2006) Apud Godecke (2013)

O Quadro 36 apresenta os consumos de energia elétrica para reciclagem de 1 tonelada de cada material.

Quadro 36 - Consumo de energia elétrica no processo de reciclagem dos materiais

<b>Material</b>	<b>SECbi (Mwh)</b>
PEAD	0,83
PEBD	0,83
PET	0,83
PP	0,83

Fonte: Godecke (2013)Quadro 37, estão dispostos o consumo combustível fóssil, neste caso o óleo diesel, utilizados para produção de 1 tonelada de cada material.

Quadro 37 - Consumo de Combustíveis fósseis para reciclagem dos materiais

<b>Material</b>	<b>Combustível</b>	<b>SFC bi (GJ/t)</b>
PEAD	Óleo diesel	15,00
PEBD	Óleo diesel	15,00
PET	Óleo diesel	15,00
PP	Óleo diesel	11,60

Fonte: Adaptado de Godecke (2013)

Por fim, de posse dos fatores necessários para utilizar as fórmulas da metodologia, realizou-se os cálculos. A traz os resultados obtidos a partir dos resíduos plásticos coletados durante o ano 2011 em Porto Alegre.

Realizou-se os cálculos desse estudo para conferir os resultados trazidos no artigo em questão, utilizando os mesmos parâmetros e metodologia propostos pelo autor, com exceção do fator de emissão de energia. A Tabela 8 traz os resultados obtidos, os quais se mostram diferentes dos resultados de Godecke (2013), como esperado.

Tabela 5 - Potencial de redução das emissões de CO<sub>2</sub> decorrentes das quantidades recuperadas em POA em 2013

<b>Resíduos plásticos coletados em POA em 2011</b>							
<b>Material</b>	<b>Tonelada de material reciclado</b>	<b>Recursos virgens</b>		<b>Recursos reciclados</b>		<b>Emissões evitadas</b>	
		<b>Emissão por ton de recurso (t de CO<sub>2</sub>-eq)</b>	<b>Emissões totais (t de CO<sub>2</sub>-eq)</b>	<b>Emissão por ton recursos (t de CO<sub>2</sub>-eq)</b>	<b>Emissões totais (t de CO<sub>2</sub>-eq)</b>	<b>Redução de Emissões (t de CO<sub>2</sub>-eq)</b>	<b>Redução de emissões por ton. de resíduo (t de CO<sub>2</sub>-eq)</b>
PEAD	239,30	0,87	207,11	0,04	10,17	196,94	0,82
PEBD	328,30	0,90	294,73	0,04	13,95	280,78	0,86
PET	378,90	0,88	332,01	0,04	16,10	315,91	0,83
PP	130,80	0,67	87,14	0,04	5,56	81,58	0,62

Fonte: Adaptado de Godecke (2013).

Dentre os estudos citados, tem-se que as informações sobre geração e coleta de resíduos sólidos urbanos, em geral, estão disponíveis, muito por conta do trabalho realizado pelas associações de catadores.

Observa-se que, independentemente do ano do estudo, o alumínio foi o material que, quando reciclado, mais contribuiu para a redução de emissões de GEE, com uma média de 3,75 tCO<sub>2</sub>-eq /t. Isso se deve ao fato de sua produção demandar elevado consumo energético e, em contrapartida, sua reciclagem consumir poucos recursos. Já a reciclagem do vidro, em termos de redução de emissão de GEE, foi o que menos apresentou vantagens, uma vez que tanto sua produção quanto reciclagem demandam de consumo energético similar, com uma média de 0,18 tCO<sub>2</sub>-eq/t. A Tabela 9 traz o resumo das reduções médias de emissão de cada material reciclado.

Tabela 6- Redução de emissão média por material

Material	Redução média (tCO <sub>2</sub> -eq /t)	redução média (%)
Plástico	1,15	85,00
PEAD	0,67	73,00
PEBD	0,87	78,00
PET	0,73	75,00
Papel e Papelão	1,62	64,00
Vidro	0,18	18,67
Alumínio	3,75	91,00

Fonte: Elaborado pela Autora (2022)

Para estimar a quantidade de energia elétrica e combustíveis fósseis utilizados na produção e na reciclagem dos materiais foram utilizados dados da literatura. As fontes disponíveis na literatura, que trazem valores do consumo de energia elétrica para produção dos materiais, datam de 2003 e, certamente, já não são mais as mesmas. Há variações de consumos entre indústrias que fabricam ou reciclam o mesmo tipo de material, uma vez que os consumos dependem da tecnologia e dos insumos utilizados nos processos.

Um fator que muda de acordo com o ano do estudo, é o fator de emissão de energia. Isso pois, dependendo das fontes de geração de energia do ano, as emissões de qualquer processo que dependa de energia elétrica também vão mudar. Quanto maior o fator de emissão de energia, mais emissão de GEE ocorrerá.



Os resultados trazem também a importância de se levar em conta todas as variáveis energéticas do processo de reciclagem, tanto o consumo de energia elétrica como o de combustíveis fósseis. A redução das emissões não se dá apenas reduzindo-se o consumo de energia elétrica com a reciclagem dos resíduos, mas também pela redução do consumo de combustíveis fósseis (LIMA, 2012). A Tabela 10 traz o resumo dos resultados de cada estudo apresentado.

Tabela 7 - Resumo das emissões de cada estudo

Material		Redução de emissões por ton de resíduo (t de CO <sub>2</sub> -eq)			
		Coreso (2016)	Estudo de POA (2013)	Estudo de Londrina (2017)	Programa Ecoelce(2012)
Plástico	PEAD e PP	0,59	-	0,96	1,35
	PEAD	-	0,75		
	PP	-	0,48		
	PEBD	0,73	1,00		
	PET e OS	0,63	0,83		
Papel e Papelão		0,58	-	2,59	2,92
Vidro		0,02	-	0,26	0,27
Alumínio		3,72	-	3,23	4,89
Aço		-	-	-	1,00
Metais		-	-	-	0,44

Fonte: Elaborado pela Autora (2022).

## 5.2 ESTUDOS E RESULTADOS: COMPOSTAGEM

### • Estudo 5

Um estudo realizado em San Jose, Califórnia, realizou uma avaliação de ciclo de vida (ACV) das emissões de resíduos em diferentes processos de gestão: aterros sanitários, compostagem e digestão anaeróbia seca. Os dados utilizados no estudo são referentes aos resíduos de uma instalação da Zero Waste Energy Development Company (ZWEDC) que opera um digestor anaeróbico seco. Comparou-se então alternativas hipotéticas para avaliar qual seria o cenário mais favorável em relação as emissões de GEE. Para construir um inventário de ciclo de vida para cada cenário, foram coletados dados diretos de massa e fluxo de energia nos quatro anos de operação da instalação ZWEDC. Como o resultado depende diretamente da composição de resíduos estudada, para fins de análise, considerou-se resíduos de desperdício de alimentos (NORDAH et.al, 2020).

Foram estudados diversos cenários, no presente estudo optou-se por avaliar apenas quatro opções de tratamento/disposição de resíduos: aterros sanitários, compostagem, digestor anaeróbico seco com tratamento do lodo por compostagem e digestor anaeróbico seco com envio do lodo para aterro sanitário. Uma terceira possibilidade para tratamento/disposição dos lodos dos digestores, seria a disposição direta no solo, sendo equivalente ao uso de fertilizantes. Contudo, essa aplicação só é possível durante parte do ano, uma vez que durante o inverno chuvoso, há escoamento dos nutrientes (NORDAH et.al, 2020). A Tabela 11 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** traz o resumo das emissões de cada cenário.

Tabela 8 - Emissão de CO<sub>2</sub>-eq a partir de cada tecnologia analisada.

Emissão	Aterro sanitário	Compostagem e uso de fertilizantes	Digestão Anaeróbia seca e Aterro	Digestão Anaeróbia seca e deposição no solo	Digestão Anaeróbica seca sem aterro
kg CO <sub>2</sub> -eq/ton de resíduos	400	-41	40	27	9
Ton. CO <sub>2</sub> -eq/ton de resíduos	0,40	-0,041	0,04	0,027	0,009

Fonte: Elaborado pela Autora (2022).

As emissões de GEE das alternativas que não exigem nenhuma etapa com aterro, são muito menores do que os cenários que envolvem o aterro sanitário. Os resultados demonstram que a opção que envia os resíduos para aterros sanitários é a que mais emite GEE. A segunda

opção que mais emite GEE foi a configuração do digestor anaeróbio e o lodo enviado para aterro sanitário, com uma emissão de 40 kg de CO<sub>2</sub>-eq/ton de resíduos. Assim, tem-se que a disposição dos resíduos em aterros sanitários emitem cerca de 10 vezes mais do que a tecnologia de digestão anaeróbica seca, ainda que os lodos sejam enviados posteriormente ao aterro.

Quando há a possibilidade de deposição dos lodos dos digestores diretamente no solo, a emissão chega a 27 kg de CO<sub>2</sub>-eq/ton de resíduos. O cenário que combina o digestor com a compostagem de lodos dos digestores (processos atuais da ZWEDC) resulta em uma pegada de GEE de 9 kg de CO<sub>2</sub>-eq por tonelada de resíduos orgânicos. O cenário em que os resíduos são enviados para compostagem, resultou em um valor negativo, totalizando -41 kg de CO<sub>2</sub>-eq/ ton de resíduos orgânicos.

Os valores negativos de emissão de GEE, se devem ao fato de o composto final da compostagem ser utilizado como fertilizando e, desta forma há emissões de gases evitadas na produção de fertilizantes sintéticos.

#### • Estudo 6

Outro estudo, também realizado na Califórnia, feito pela Universidade da Califórnia de Riverside, analisou os benefícios da compostagem na perspectiva dos GEE, no qual calculou-se as emissões evitadas de CO<sub>2</sub>-eq dos resíduos que iriam para aterros sanitários, assim como as emissões evitadas a partir do uso do adubo proveniente da compostagem (California Environmental Protection Agency, 2017). O estudo demonstra que o tratamento dos resíduos orgânicos, por meio da compostagem, resulta em eficiência energética não apenas considerando a produção de gases durante o processo de decomposição, pois a aplicação do composto orgânico resultante aumenta a qualidade do solo, resultando em menor quantidade necessária de fertilizantes sintéticos, e, também, diminui a erosão do solo e reduz o uso de herbicidas. Este estudo coloca ainda que o teor de nitrogênio do adubo, juntamente com as contribuições de fósforo e potássio, possibilita a redução da quantidade de fertilizantes aplicados aos sistemas agrícolas. E em relação aos gases de efeito estufa, o estudo quantifica a emissão evitada em processos de produção de nitrogênio sintético, potássio e fósforo como sendo um benefício da compostagem. A Equação 7 traz a fórmula utilizada pela metodologia.

$$\text{CERF} = (\text{ALFb} + ((\text{Eb} + \text{Fb} + \text{Hb}) * \text{Cuse}) - \text{Etotal} \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

CERF = Fator de redução de emissão (MTCO<sub>2</sub>-eq /ton de resíduo fresco)

ALFb = Emissão evitada de GEE pela não disposição de resíduos em aterro sanitário (MTCO<sub>2</sub>-eq /ton de resíduo fresco)

Eb = Redução da emissão associada ao decréscimo de erosão do solo (MTCO<sub>2</sub>-eq /ton de resíduo fresco)

Fb = Fator de redução pelo uso de fertilizante (MTCO<sub>2</sub>-eq /ton de composto)

Hb = Fator de redução pelo uso de herbicida (MTCO<sub>2</sub>-eq /ton de composto)

Cuse = Fator de conversão de tonelada de composto para tonelada de resíduo fresco

Ettotal = Emissões devido ao processo de compostagem (MTCO<sub>2</sub>-eq /ton de resíduo fresco)

No estudo em questão, para fins de resultados, optou-se por considerar apenas os fatores de redução pelo uso de fertilizante e emissões evitadas pela não deposição de resíduos em aterro sanitário de resíduos considerados “restos de alimentos”.

As emissões causadas pela compostagem foram divididas em três: transporte, o processo em si e emissões fugitivas. Conforme a Equação 8:

$$E_{total} = T_e + P_e + F_e \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

Ettotal = Emissão total da compostagem (MTCO<sub>2</sub>-eq /ton de resíduo fresco)

Te = Emissão do transporte (MTCO<sub>2</sub>-eq/ton de resíduo fresco)

Pe = Emissões do processo da compostagem (MTCO<sub>2</sub>-eq /ton de resíduo fresco)

Fe = Emissões fugitivas da compostagem (MTCO<sub>2</sub>-eq /ton de resíduo fresco)

Os resultados obtidos para cada uma das emissões estão dispostos no Quadro 38.

Quadro 38 - Emissões provenientes da compostagem

<b>Tipo de Emissão</b>	<b>Emissão (ton CO<sub>2</sub>-eq /ton de resíduo fresco)</b>
Transporte	0
Emissões do processo	0
Emissões fugitivas CH <sub>4</sub>	0,049

<b>Tipo de Emissão</b>	<b>Emissão (ton CO<sub>2</sub>-eq /ton de resíduo fresco)</b>
Emissões fugitivas N <sub>2</sub> O	0,021
<b>Total</b>	<b>0,07</b>

Fonte: California Environmental Protection Agency (2017).

Uma vez que as emissões causadas pelo processo de compostagem são feitas considerando uma tonelada do resíduo fresco, deve-se utilizar um fator de conversão para as demais emissões que levam em consideração uma tonelada do composto pronto. Em síntese, o fator de conversão é usado para converter toneladas de adubo para toneladas de resíduos frescos. Esta conversão foi feita com base no peso. O estudo utilizou uma série de referências para chegar no valor de 0,58.

Neste método utilizado, os benefícios devidos a compostagem são dados pela Equação 9.

$$B_{total} = ALFb + (Fb * Cuse) \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

$B_{total}$  = Redução de emissão total devido ao uso do composto (MTCO<sub>2</sub>-eq /ton de resíduo fresco)

$ALFb$  = Emissão evitada de GEE pela não disposição de resíduos em aterro sanitário

$Fb$  = Fator de redução pelo uso de fertilizante (MTCO<sub>2</sub>-eq /ton de composto)

$Cuse$  = Fator de conversão de tonelada de composto para tonelada de resíduo fresco

Para o cálculo da redução de emissões devido a compostagem, o estudo indicou o uso das considerações feitas por Favoino e Hogg (2008). Esse estudo considera que o nitrogênio do composto vai sendo liberado ao longo de um período de 10 anos. Desta forma, o estudo também assumiu que o nitrogênio é "conservado" no solo ao longo do tempo, de modo que o nitrogênio disponível ao longo de 10 anos é maior do que o conteúdo inicial de nitrogênio. Então, ao invés de assumir uma taxa de decaimento de 30% como Favoino e Hogg (2008), o presente estudo utilizou 38% durante um período de 10 anos para garantir que a disponibilidade de nitrogênio

não incluisse o conteúdo "conservado" de nitrogênio. Este estudo também presumiu que a taxa de decaimento do potássio e fósforo era semelhante à do nitrogênio.

Foi utilizado um fator de emissão para cada tipo de fertilizante (N, P e K), os quais foram baseados nas emissões do ciclo de vida evitadas da produção de fertilizantes que ocorreriam na ausência do uso de adubo. Os fatores de emissão para N, P, e K são 8,9, 1,8 e 0,96 de CO<sub>2</sub>-eq /kg, respectivamente (California Environmental Protection Agency, 2017). Na Tabela 12 estão dispostos os benefícios de cada fertilizante no período de 10 anos.

Tabela 9 - Benefícios dos fertilizantes pela aplicação da compostagem

Fertilizante	Peso (%)	Massa em 1 ano (kg/ton de composto)	Massa em 10 anos (kg/ton de composto)	Benefício em 10 anos (MT CO <sub>2</sub> -eq - ton de composto)
Nitrogênio	1,00	9,10	24,00	0,210
Fósforo	0,80	7,30	19,30	0,035
Potássio	0,70	6,40	16,90	0,017
-	-	-	<b>Total</b>	<b>0,262</b>

Fonte: California Environmental Protection Agency (2017).

Para quantificar as emissões de metano evitadas pelo desvio de resíduos dos aterros, esse estudo se baseou no modelo do IPCC "First Order Decay" (FOD). Esse modelo foi adaptado afim de quantificar as emissões que ocorreriam ao longo de cem anos, a partir da deposição de uma tonelada de resíduos no aterro. O modelo foi executado utilizando dois valores diferentes para o fator de oxidação do metano (10% e 35%), que representa a fração do metano gerado que é oxidado pelo material de cobertura do aterro, e dois cenários diferentes de eficiência da coleta de gás do aterro.

Como já descrito anteriormente, grande parte do grau de emissões evitadas de GEE se devem às características dos resíduos. Por exemplo, os resíduos orgânicos que contêm uma fração maior de carbono orgânico anaerobicamente degradável terão maior geração líquida de metano por tonelada de material. Assim como a taxa de decaimento é um parâmetro importante, pois, quanto maior a taxa de decaimento, mais metano será emitido logo após o descarte e assim a coleta de gás será mais eficiente. No Quadro 39 estão os principais parâmetros que foram inseridos no modelo para o cálculo das emissões de GEE em aterros sanitários.

Quadro 39 - Parâmetros chave para determinar as emissões de GEE em aterro sanitário

Parâmetro	Valor	Unidade
Taxa de decaimento	0,072	yr <sup>-1</sup>
Carbono orgânico degradável	0,176	MT C/tWaste
Carbono orgânico anaeróbicamente degradável	0,117	MT C/tWaste
Fator de oxidação (OX)	0,1 e 0,35	-
Eficiência na coleta de gás	Fase típica: 0 (ano 1- 2) 50% (ano 3) 75% (ano 4 – 10) 95% (ano 11-100) Desativação da coleta no ano 60: 0 (ano 1- 2) 50% (ano 3) 70% (ano 4 – 5) 80% (ano 6-60) 0% (ano 60 – 100)	%
Retardo na decomposição	6	meses
Eficiência na combustão de gás	99,77	%
GWP	25	-

Fonte: California Environmental Protection Agency (2017).

Tabela 10 - Resultado dos cálculos da emissão de tCO<sub>2</sub>-eq /ton

Fase com coleta de gás		Fase com coleta de gás desativada		Média
Fator de oxidação		Fator de oxidação		
10%	35%	10%	35%	
0,377	0,272	0,525	0,379	0,388

Fonte: California Environmental Protection Agency (2017).



Como descrito anteriormente, deve-se utilizar um fator para converter as emissões causadas pelo processo de compostagem considerando uma tonelada do composto pronto, para as uma tonelada de resíduo fresco. O estudo utilizou uma série de referencias para chegar no valor de 0,58. O resultados estão dispostos na Tabela 14.

Tabela 11 - Emissões de GEE evitadas pelo processo de compostagem

<b>Tipo de emissões evitadas</b>	<b>Redução (ton CO<sub>2</sub>-eq /ton de composto)</b>	<b>Taxa de conversão</b>	<b>Emissão evitada final - desperdício de alimento</b>
Aterro sanitário	-	-	0,39
Decréscimo do uso de Fertilizante	0,26	0,58	0,15
<b>Total</b>	-	-	<b>0,54</b>

Fonte: California Environmental Protection Agency (2017).

De posse das emissões evitadas pelo decréscimo do uso de fertilizantes e a não deposição dos resíduos em aterros, subtrai-se as emissões geradas no processo de compostagem e obtém-se a emissão final Tabela 15.

Tabela 12 - Emissão evitada, emissão do processo de compostagem e final (tCO<sub>2</sub>-eq /ton de composto)

<b>Tipo de emissão</b>	<b>Emissão evitada</b>	<b>Emissão do processo de compostagem</b>	<b>Emissão evitada final (tCO<sub>2</sub>-eq /ton de composto)</b>
Decréscimo do uso de Fertilizante	0,15	0,07	0,08
Aterro sanitário	0,39	0,07	0,32

Fonte: California Environmental Protection Agency (2017).

É importante observar que os cenários de coleta de gás utilizados neste documento são baseados em estudos que representam práticas comuns de aterros sanitários na Califórnia e em todo o país, e levam em conta as diferentes idades dos aterros, os parâmetros climáticos locais e a diversidade de tecnologias de controle de emissões e as melhores práticas de gestão.

• **Estudo 7**

O último estudo que será tratado nos resultados, foi realizado a partir dos resíduos coletados por uma empresa no Rio de Janeiro. Todos os cálculos seguiram as orientações fornecidas pela metodologia aprovada AMS-III.F. Para o cálculo de base das emissões de CH<sub>4</sub>, considerou-se o envio dos resíduos para o aterro sanitário Santa Rosa em Seropédica-RS (SILVA SANTOS, 2020).

Os resultados encontrados para as emissões geradas no aterro sanitário se referem as emissões que ocorreram ao longo dos anos em decorrência da decomposição gradual da matéria (de 2007 à 2031). Ou seja, mesmo após o fim da data imposta pelo trabalho para deposição de resíduos no local (2019), ainda ocorrerá geração de CH<sub>4</sub> até 2030. Já para os resultados da compostagem, tem-se que ao final do processo de compostagem encerram-se também as emissões. Essa é a maior diferença entre a degradação em condições aeróbias e anaeróbias (SILVA SANTOS, 2020).

A ferramenta utilizada para calcular as emissões de CH<sub>4</sub> geradas em aterros sanitários foi a CDM Tool AM04 Methodological tool: Emissions From Solid Waste Disposal Sites – Version 08.0. A Equação 10 apresenta a fórmula para cálculo das emissões de CH<sub>4</sub> em aterros sanitários:

$$BE_{CH_4,SWDS,y} = \varphi \cdot (1 - f) \cdot GWP_{CH_4} \cdot (1 - OX) \cdot \frac{16}{12} \cdot F \cdot DOC_f \cdot MCF \cdot \sum_{x=1}^y \sum_j W_{j,x} \cdot DOC_j \cdot e^{-kj(y-x)} \cdot (1 - e^{-kj})$$

Equação 10

Os parâmetros adotados para esse cálculo encontram-se no Quadro 40.

Quadro 40 - Parâmetros para cálculo de emissões de CH<sub>4</sub> na linha de base (aterros sanitários).

Parâmetro	Valor adotado	Premissa
φ	0,9	Valor padrão para o fator de correção para incertezas do modelo
F	0,5	Fração de metano capturado no aterro sanitário e queimada em flare/incinerado
GWPCH <sub>4</sub>	28	Potencial de aquecimento global

Parâmetro	Valor adotado	Premissa
OX	0,1	Fator de oxidação (reflete a quantidade de metano do aterro que é oxidado no solo ou em outro material que cobre o resíduo)
f	0,5	Fração de metano no gás de aterro (em volume)
DOCf	0,5	Fração de Carbono orgânico degradável (DOC) que pode decompor
MCF	1,0	Fator de correção do metano
DOCj	0,15	Fração de carbono orgânico degradável (por massa) no resíduo tipo "j"
Kj	0,4	Taxa de decaimento do resíduo do tipo "j"
X	2007	Ano de início das atividades da empresa de compostagem
Y	2031	Ano que finaliza o tempo necessário para degradação total da matéria orgânica no aterro sanitário.

Fonte: Adaptado de SILVA SANTOS (2020).

A ferramenta que possibilita inventariar as emissões de GEE da compostagem que a MAS-III.F exige é a CDM Tool Methodological tool AM 013:Project and leakage emissions from composting também da UNFCCC, a qual apresenta valores padronizados de emissões, caso o projeto não tenha monitoramento in loco. Cálculo das emissões de CH<sub>4</sub> no processo de compostagem foi feito seguindo a ferramenta CDM Tool AM 013 (Equação 11).

$$PE_{CH_4y} = Q_y * EF_{CH_4y} * GWP_{CH_4} \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

$PE_{CH_4y}$  = Emissão de metano pelo projeto de compostagem no ano “y” (tCO<sub>2</sub>-eq/ano)

$Q_y$  = Quantidade de resíduos compostados (t/ano);

$EF_{CH_4y}$  = Fator de emissão de metano por tonelada de resíduo compostado no ano (tCO<sub>2</sub>-eq/ano)

$GWP_{CH_4}$  = Potencial de aquecimento global do metano.

O fator de emissão (tCO<sub>2</sub>-eq/ano) foi considerado de 0,002, valor sugerido pelo UNFCCC (2017) e o potencial de aquecimento global adotado foi de 28, valor dado pelo IPCC (2013).

De posse dos resultados de  $PE_{CH_4}$  e  $BE_{CH_4,SWDS,y}$ , e utilizando-se a metodologia AMS-III.F, obteve-se os valores dispostos no Quadro 41. Os resultados foram obtidos a partir da diferença de emissão de CH<sub>4</sub> do processo de compostagem e da disposição de resíduos no aterro de Seropédia-RJ.

Quadro 41 - Reduções de emissões de CH<sub>4</sub>

Tonelada de material resíduos total	Emissões na linha de base		Emissões na compostagem		Emissões evitadas	
	Emissão por ton de recurso (tCO <sub>2</sub> -eq/t)	Emissões totais (tCO <sub>2</sub> -eq)	Emissão por ton recursos (tCO <sub>2</sub> -eq/t)	Emissões totais (tCO <sub>2</sub> -eq)	Redução de Emissões (tCO <sub>2</sub> -eq)	Redução de emissões (tCO <sub>2</sub> -eq/ton. de resíduo)
78.053,00	0,338	26.443,62	0,056	4.370,97	22.072,66	0,28

Fonte: Adaptado de SILVA SANTOS (2020).

Os resultados apontaram que a cada tonelada de resíduos destinados ao aterro sanitário CTR Seropédica são gerados 338 kg de CO<sub>2</sub>-eq e a cada tonelada de resíduos compostados são gerados cerca de 56 kg de CO<sub>2</sub>-eq. Indicando que resíduos compostados emitem cerca de 6 vezes menos metano que os enviados para o aterro sanitário.

Embora as análises avaliem apenas os benefícios da perspectiva de GEE, existem diversos outros benefícios que podem ocorrer com a aplicação de composto, como por exemplo, o aumento da biomassa abaixo do solo quando aplicada aos pastos. Além da economia de fertilizantes inorgânicos e fixação de carbono, o espalhamento do composto na terra pode resultar em maior retenção de água no solo (redução da irrigação), redução das exigências de herbicidas/biocidas e redução da erosão. Todos estes aspectos citados também poderiam implicar em alguma economia de GEE, que não estão quantificados nos estudos devido à falta de dados ou à alta incerteza relacionada a isso (BOLDRIN, 2009).

Os resultados demonstram que todos os estudos que analisam o envio dos resíduos orgânicos para aterros sanitários, concluem que essa é a destinação final que mais emite GEE.

A emissão média de uma tonelada depositada em aterros foi de 0,38 tCO<sub>2</sub>-eq e de uma tonelada compostada foi de 0,063 tCO<sub>2</sub>-eq.

### 5.3 ANÁLISE DO POTENCIAL DE REDUÇÃO DE EMISSÃO DE GEE: SÉRIE HISTÓRICA DO SNIS

Utilizando os dados informados pela série histórica de 2010 até 2020 do SNIS, foi possível estimar as emissões que poderiam ter sido evitadas caso os resíduos secos e orgânicos coletados tivessem sido enviados 100% para reciclagem e compostagem respectivamente.

Como pode-se observar na Tabela 2, pelo código UP007 - quantidade de RDO e RPU recebida na unidade de processamento, de 2010 a 2020 foram coletadas 534.036.785 toneladas de resíduos e apenas 1.993.391 toneladas foram recuperadas em unidades de compostagem. Considerando que em média 50% dos resíduos coletados são orgânicos (BRASIL, 2019) foram coletadas 267.018.392 de toneladas de resíduos orgânicos (Ver Tabela 3).

Para o cálculo das quantidades de resíduos secos reciclados, é necessário levar em consideração os indicadores sobre coleta seletiva e triagem utilizados pelo SNIS. A Tabela 3 traz os indicadores utilizados no presente estudo. Uma vez que parte dos municípios participantes da pesquisa do SNIS preenchem apenas o indicador CS009, optou-se por recalcular as quantidades obtidas no site para melhor análise dos dados. Há ainda uma quantidade de resíduos que vão para as unidades de triagem e são encaminhados para disposição final, chamados de rejeitos da reciclagem, no entanto, no presente estudo optou-se por desconsiderar esses rejeitos e assumir que todo material triado foi reciclado. A Tabela 2 traz também as quantidades coletadas e recicladas de plástico, papel e papelão e vidro durante os 10 anos segundo o SNIS (UP007).

Tabela 13 - Análise das quantidades de resíduos recebidas nas unidades de processamento (UP007) de 2010 a 2020

UP007 - Quantidade de RDO e RPU recebida na unidade de processamento	2020	2019	2018	2017	2016	2015	2014	2013	2012	2011	2010	Total
Lixão	7.990.799	5.665.187	5.357.208	5.908.787	6.096.277	6.347.022	8.007.472	6.746.667	5.252.649	3.937.950	1.322.174	62.632.191
Unidade de manejo de galhadas e podas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Aterro controlado	6.827.176	5.757.356	5.110.967	4.912.089	5.694.481	7.433.347	8.416.792	9.151.426	8.117.265	6.823.680	4.560.112	72.804.691
Aterro sanitário	45.292.597	38.000.764	36.986.685	37.127.899	34.756.918	38.152.749	33.485.574	31.963.475	30.081.767	24.737.729	14.719.478	365.305.634
Aterro de Resíduos da Construção Civil (=inertes)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.139	1.139
Unidade de compostagem (pátio ou usina)	285.526	279.191	123.762	246.405	172.420	121.613	281.721	71.249	224.601	146.182	40.720	<b>1.993.391</b>
Outra	810.913	954.788	315.859	371.334	475.231	393.289	211.186	404.722	94.135	80.239	80.034	4.191.730
Unidade de triagem (galpão ou usina)	5.021.630	4.423.044	3.045.115	2.990.385	1.656.417	2.304.480	1.581.971	1.281.416	2.136.075	2.109.734	558.881	27.109.148
Vala específica de RSS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Unid. tratamento por microondas ou autoclave	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Área de reciclagem de RCD (=un reciclagem entulho)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Área de reciclagem de RCC (=un reciclagem entulho)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Unidade de transbordo	10.008.268	7.265.734	10.489.973	10.384.925	9.691.672	10.140.632	9.350.055	9.860.916	7.349.389	8.761.535	7.982.016	101.285.115
Área de transb e triagem de RCC e volumosos (=ATT)	222.856	118.334	144.194	71.371	67.840	256.883	16.479	19.540	197.933	75.962	11.320	1.202.712
Unidade de tratamento por incineração	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>TOTAL</b>	<b>66.228.641</b>	<b>55.080.330</b>	<b>50.939.595</b>	<b>51.556.899</b>	<b>48.851.743</b>	<b>54.752.501</b>	<b>51.984.717</b>	<b>49.618.955</b>	<b>45.906.492</b>	<b>37.835.514</b>	<b>21.281.398</b>	<b>534.036.785</b>

Fonte: SNIS (2022)

Tabela 14 - Composição gravimétrica estimada dos resíduos no Brasil

<b>Composição gravimétrica padrão</b>	<b>%</b>	<b>2020</b>	<b>2019</b>	<b>2018</b>	<b>2017</b>	<b>2016</b>	<b>2015</b>	<b>2014</b>	<b>2013</b>	<b>2012</b>	<b>2011</b>	<b>2010</b>	<b>Total</b>
Orgânicos	50%	33.114.320	27.540.165	25.469.798	25.778.449	24.425.872	27.376.251	25.992.358	24.809.477	22.953.246	18.917.757	10.640.699	<b>267.018.392</b>
Plástico	15%	9.934.296	8.262.050	7.640.939	7.733.535	7.327.761	8.212.875	7.797.707	7.442.843	6.885.974	5.675.327	3.192.210	80.105.518
Papel e papelão	10%	6.622.864	5.508.033	5.093.960	5.155.690	4.885.174	5.475.250	5.198.472	4.961.895	4.590.649	3.783.551	2.128.140	53.403.678
Metais	5%	3.311.432	2.754.017	2.546.980	2.577.845	2.442.587	2.737.625	2.599.236	2.480.948	2.295.325	1.891.776	1.064.070	26.701.839
Vidro	3%	1.986.859	1.652.410	1.528.188	1.546.707	1.465.552	1.642.575	1.559.541	1.488.569	1.377.195	1.135.065	638.442	16.021.104
Rejeitos	15%	9.934.296	8.262.050	7.640.939	7.733.535	7.327.761	8.212.875	7.797.707	7.442.843	6.885.974	5.675.327	3.192.210	80.105.518
Outros	2%	1.324.573	1.101.607	1.018.792	1.031.138	977.035	1.095.050	1.039.694	992.379	918.130	756.710	425.628	10.680.736

Fonte: SNIS (2022)

Tabela 15 - Indicadores sobre coleta seletiva e triagem utilizados pelo SNIS

<b>Indicadores</b>	<b>2020</b>	<b>2019</b>	<b>2018</b>	<b>2017</b>	<b>2016</b>	<b>2015</b>	<b>2014</b>	<b>2013</b>	<b>2012</b>	<b>2011</b>	<b>2010</b>	<b>Total reciclado</b>
CS010 - Quantidade de Papel e papelão recicláveis recuperados	388.539	350.115	387.938	377.776	358.683	439.052	390.149	319.232	208.236	102.134	385.127	3.706.982
CS011 - Quantidade de Plásticos recicláveis recuperados	267.226	225.948	208.371	234.588	231.003	274.296	230.543	188.223	131.008	42.370	360.144	2.393.721
CS012 - Quantidade de Metais recicláveis recuperados	126.998	112.665	121.175	110.970	105.159	141.914	131.305	111.423	73.320	19.369	161.770	1.216.068
CS013 - Quantidade de Vidros recicláveis recuperados	130.100	105.936	112.350	99.290	81.679	90.069	95.811	79.487	49.870	13.347	150.232	1.008.171

Fonte: SNIS (2022)

Assim, é possível estimar que então apenas 0,75% dos resíduos orgânicos foram destinados para compostagem e 99,25% (265.025.001,30 de toneladas) foram para aterros ou lixões (Ver Tabela 16). Pode-se concluir então, pelos estudos apresentados, que a destinação correta para a compostagem desses resíduos teria evitado 82.952.825,41 (tCO<sub>2</sub>-eq /t) nos anos 10 anos utilizados como referência (Ver Tabela 17).

Tabela 16 - Resíduos Orgânicos coletados de 2010 a 2020

Resíduos orgânicos coletados	Resíduos orgânicos coletados (t)	%
Total	267.018.392,30	100,00%
Destinado a aterros sanitários	265.025.001,30	99,25%
Destinados a compostagem	1.993.391,00	0,75%

Fonte: Elaborado pela Autora (2022).

Tabela 17 - Emissões evitadas pela compostagem de 2010 a 2020.

Emissão evitada Aterros x Compostagem			
Destinação final	Emissão Média (tCO <sub>2</sub> -eq /t)	Resíduos coletadas (t)	Emissão total (tCO <sub>2</sub> -eq)
Aterro	0,376	265.025.001,30	99.649.400,49
Compostagem	0,063		16.696.575,08
-	-	Emissão evitada	82.952.825,41

Fonte: Elaborado pela Autora (2022).

A mesma metodologia foi aplicada aos resíduos secos. Contudo, fez-se necessário a obtenção da série histórica dos indicadores apresentados no Quadro 42.

Quadro 42 – Indicadores e suas respectivas descrições utilizados pelo SNIS

Indicador	Descrição
CS009	Quantidade total de materiais recicláveis recuperados
CS010	Quantidade de Papel e papelão recicláveis recuperados
CS011	Quantidade de Plásticos recicláveis recuperados
CS012	Quantidade de Metais recicláveis recuperados



<b>Indicador</b>	<b>Descrição</b>
CS013	Quantidade de Vidros recicláveis recuperados
CS014	Quantidade de Outros materiais recicláveis recuperados (exceto pneus e eletrônicos)

Fonte: Elaborado pela Autora

A Tabela 2 traz as quantidades coletadas e recicladas de plástico, papel e papelão e vidro durante os 10 anos segundo o SNIS (UP007). A Tabela 18 traz a quantidade de plástico, papel e papelão e vidro foram coletados e reciclados de 2010 a 2020.

Tabela 18 - Resíduos coletados e reciclados segundo a série histórica do SNIS

<b>Material</b>	<b>Total coletado (t)</b>	<b>Não reciclados (t)</b>	<b>Reciclados (t)</b>	<b>% Reciclada</b>
Plásticos	80.105.517,69	77.711.797,03	2.393.720,66	2,99%
Papel e papelão	53.403.678,46	49.696.696,01	3.706.982,45	6,94%
Vidro	16.021.103,54	15.012.932,94	1.008.170,60	6,29%

Fonte: Elaborada pela Autora (2022).

De posse da quantidade de resíduos coletados não reciclados e das emissões médias evitadas pela reciclagem de cada um dos materiais, calculou-se as emissões evitadas. A Tabela 19 traz as emissões que poderiam ter sido evitadas caso todo o resíduo reciclável tivesse sido de fato reciclado.

Tabela 19 - Emissão de tCO<sub>2</sub>-eq evitada pela reciclagem de materiais de 2010 a 2020.

<b>Material</b>	<b>Emissão média evitada (tCO<sub>2</sub>-eq/t)</b>	<b>Resíduos coletados não reciclados (t)</b>	<b>Emissão evitada (tCO<sub>2</sub>-eq)</b>
Plásticos	1,15	77.711.797,03	89.368.566,58
Papel e papelão	1,62	49.696.696,01	80.508.647,54
Vidro	0,18	15.012.932,94	2.702.327,93

Fonte: Elaborada pela Autora (2022).

Com isso, tem-se que os plásticos que deixaram de ser reciclados durante os 10 anos analisados foram os mais emitiram tCO<sub>2</sub>-eq com 89.368.566,58, seguido do papel e papelão com 80.508.647,54 e vidro com 2.702.327,93. Ao todo, pode-se estimar então que poderiam ter sido evitadas cerca de 172,579 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>-eq.

Essas 172,579 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>-eq, somadas as emissões evitadas pela compostagem de 82,952 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>-eq, equivalem a quase 2,6 anos de

emissões do setor de resíduos no Brasil, se considerado o ano de 2019, no qual foi contabilizada uma emissão de 96,1 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>-eq apenas pelo setor de resíduos.

## 6 CONCLUSÃO

Parte das fontes disponíveis na literatura, que trazem os parâmetros necessários para o uso das metodologias requeridas, datam de 2003 e, certamente, diversos dados mudaram bastante ao longo dos anos. Tem-se, por exemplo, as variações de consumos entre indústrias que fabricam ou reciclam o mesmo tipo de material, as quais tem seus consumos diretamente ligado as tecnologias e insumos utilizados nos seus processos.

A partir dos estudos abordados, foi possível identificar e quantificar a contribuição na redução das emissões de GEE de resíduos a partir de reciclagem de resíduos secos e compostagem de resíduos orgânicos. Tem-se que, caso os resíduos secos e orgânicos coletados de 2010 a 2020 tivessem sido reciclados e compostados, poderiam ter sido evitadas cerca de 255,532 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>-eq.

Utilizando as tecnologias de reaproveitamento e tratamento de resíduos de forma integrada os municípios poderão alcançar resultados cada vez melhores a custos reduzidos, em termos econômicos, sociais e ambientais.

Além dos benefícios ambientais da reciclagem, ressaltamos os seus benefícios socioeconômicos, que incluem o fornecimento de oportunidades de emprego (catadores). É notável a importância e presença das associações de catadores para os estudos de emissões de GEE no setor de resíduos, uma vez que boa parte dos dados de granulometria são obtidos através dos catadores no setor informal.

Por fim, entende-se que, mesmo avançando em soluções de gestão de resíduos, a melhor forma de mitigar os impactos dos RSU, seria com a mudança nos padrões de consumo da sociedade e uma redução na quantidade de resíduos sólidos gerados. Uma premissa para que essas transformações sejam possíveis, é a percepção de resíduos como recursos, trazendo valor a ele (IPEA, 2016 Apud Gutberlet, 2012).

## REFERÊNCIAS

ABISOLO - Associação Brasileira as indústrias de tecnologia em nutrição vegetal - **Compostagem e os desafios. da destinação dos resíduos orgânicos no Brasil.** BELTRAME. K. G. São Paulo, 2020. Disponível em: <<https://smastr16.blob.core.windows.net/home/2020/11/abisolo-sima-cirs.pdf>>. Acesso em: 30 de maio de 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Atlas Brasileiro de Emissões de GEE e Potencial Energético na Destinação de Resíduos Sólidos.** São Paulo, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil.** São Paulo, 2021.

Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama/>>. Acesso em: 23 de abril de 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2018/2019.**

Disponível em: < <https://abrelpe.org.br/download-panorama-2018-2019/>>. Acesso em: 23 de abril de 2022.

BALHAR, Michael. Estado da Arte e Potencial de Desenvolvimento do Tratamento Mecânico-Biológico na Alemanha. In: FRICKE, Klaus; PEREIRA, Christiane; LEITE, Aguinaldo; BAGNATI, Marius. (Coords.). **Gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos: transferência de experiência entre a Alemanha e o Brasil.** Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2015. Disponível em: <<https://goo.gl/BE246I>>. Acesso em: 03 maio 2022.

Bogner, J., M. Abdelrafie Ahmed, C. Diaz, A. Faaij, Q. Gao, S. Hashimoto, K. Mareckova, R. Pipatti, T. Zhang, Waste Management, Climate Change 2007: Mitigation. **Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Disponível em < <https://www.researchgate.net/>>. Acesso em: 20 de abril de 2022.

Boldrin, A., Andersen, J. K., Møller, J., Christensen, T. H., & Favoino, E. (2009). **Composting and compost utilization: accounting of greenhouse gases and global warming contributions.** *Waste Management and Research*, 27(8), 800-812. DOI: 10.1177/0734242X09345275

BRASIL. Lei nº 12.305, 2 de agosto de 2010. **Institui a política nacional de resíduos sólidos, altera a lei nº9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.** Diário Oficial, República Federativa do Brasil. Brasília, 2010. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2010/lei-12305-2-agosto-2010-607598-publicacaooriginal-128609-pl.html>. Acesso em: 1 de abril de 2022.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Qualidade Ambiental. **Programa Nacional Lixo Zero.** Brasília, DF, 2019. 72 p. (Agenda Nacional de Qualidade Ambiental Urbana, 2). Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/agendaambientalurbana/lixao-zero/Programa-Lixao-Zero.pdf/@@download/file/Programa-Lixao-Zero.pdf>. Acesso em: 4 junho de 2022.

BRASIL. Lei nº 14.026, 15 de julho de 2020. **Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000.** Diário Oficial, República Federativa do Brasil. Brasília, 2020. Disponível em: < [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2019-2022/2020/Lei/L14026.htm#art7](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2020/Lei/L14026.htm#art7)>. Acesso em: 1 de abril de 2022.

CALDERONI, S. **O\$ bilhões\$ perdido\$ no lixo.** 4ª edição, São Paulo: Humanitas/USP, 2003.

CANDIANI, G.; VIANA, E. **Emissões fugitivas de metano em aterros sanitários.** *Geosp – Espaço e Tempo (Online)*, v. 21, n. 3, p. 845-857, dez. 2017. ISSN 2179-0892. Disponível em: < <https://www.revistas.usp.br/geosp/>>. Acesso em: 2 de abril de 2022.

CARSON, Rachel. **Primavera Silenciosa.** 2ª edição, 1969. Edições Melhoramentos

CALIFORNIA ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Method For Estimating Greenhouse Gas Emission Reductions from Diversion of Organic Waste from Landfills to Compost Facilities.** California. 2017.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Quantificação e Relato de Emissões de Gases de Efeito Estufa.** São Paulo. 2021. Disponível em:

<https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2021/04/Nota-Tecnica-01-Quantificacao-e-Relato-de-Emissoes-de-Gases-de-Efeito-Estufa.pdf>. Acessado em: 14 de julho de 2022.

CRIPPA, M., et al. **Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions**. Disponível em: <https://www.researchgate.net/project/edgar-emission-inventory>. Acessado em: 14 de julho de 2022.

Cointreau, S. **Declaration of principles for sustainable and integrated solid waste management**. World Bank, Washington, D.C., 4 pp. 2001.

Cointreau-Levine, S., 1994: Private sector participation in municipal solid waste services in developing countries, Vol.1, The Formal Sector. Urban Management and the Environment, 13, UNDP/UNCHS (United Nations Centre for Human Settlements), World Bank, Washington, D.C.

CUHLS, Carsten. Tratamento de Emissões Gasosas Provenientes de Plantas de Tratamento Mecânico-Biológico de Resíduos Sólidos Urbanos. In: FRICKE, Klaus; PEREIRA, Christiane; LEITE, Aguinaldo; BAGNATI, Marius. (Coords.). **Gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos: transferência de experiência entre a Alemanha e o Brasil**. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2015. Disponível em: <[https://www.pmf.sc.gov.br/arquivos/arquivos/pdf/25\\_09\\_2015\\_13.21.46.9fdd4b7641b3904868227ca4a5277dd2.pdf](https://www.pmf.sc.gov.br/arquivos/arquivos/pdf/25_09_2015_13.21.46.9fdd4b7641b3904868227ca4a5277dd2.pdf)>. Acesso em: 03 maio 2022.

DINH, Nguyen Quoc. DAILLIER, Patrick. PELLET, Alain. **Direito Internacional Público**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1999.

FEDERATIVE REPUBLIC OF BRAZIL Paris Agreement NATIONALLY DETERMINED CONTRIBUTION (NDC). Brasília, 2022. <https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/Brazil%20First/Updated%20-%20First%20NDC%20-%20%20FINAL%20-%20PDF.pdf>.

FRICKE, K.; PEREIRA, C. **Eficiência Energética da Reciclagem de Materiais e da Recuperação Energética de Frações Seleccionadas dos Resíduos**. In: FRICKE, Klaus; PEREIRA, Christiane; LEITE, Aguinaldo; BAGNATI, Marius. (Coords.). **Gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos: transferência de experiência entre a Alemanha e o Brasil**. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2015. Disponível em: <

[https://www.pmf.sc.gov.br/arquivos/arquivos/pdf/25\\_09\\_2015\\_13.21.46.9fdd4b7641b3904868227ca4a5277dd2.pdf](https://www.pmf.sc.gov.br/arquivos/arquivos/pdf/25_09_2015_13.21.46.9fdd4b7641b3904868227ca4a5277dd2.pdf) >. Acesso em: 02 maio 2022

GIEGRICH, J. **Manual da Calculadora de Emissões de GEE para Resíduos**. Cooperação técnica Brasil-Alemanha. 2021.

GIL, A. C. Como Elaborar Projetos de Pesquisa. 4th ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GIOVANNONI, M.P; ARCHANGELO, V.S. **Estudo de um Anteprojeto de MDL para Valoração Ambiental da Reciclagem de Resíduos Sólidos Urbanos no Município de Guarujá**. São Paulo. 2022. Disponível em <  
[https://repositorio.unifesp.br/bitstream/handle/11600/63459/TCC\\_Final\\_Matheus%20Pellizzaro%20Giovannoni\\_91929\\_Victor%20Samhan%20Archangelo\\_91900.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unifesp.br/bitstream/handle/11600/63459/TCC_Final_Matheus%20Pellizzaro%20Giovannoni_91929_Victor%20Samhan%20Archangelo_91900.pdf?sequence=1&isAllowed=y)>. Acesso em: 5 de junho de 2022.

GODECKE, M.V. **A Inserção da Reciclagem nos Mercados de Carbono: Avaliação da Situação Brasileira e Estudo de Caso do Município de Porto Alegre, Rio Grande do Sul**. Novo Hamburgo. 2013. Disponível em:< [https://www.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/3/2014/12/godecke\\_mv\\_insercao\\_novohamburgo2013.pdf](https://www.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/3/2014/12/godecke_mv_insercao_novohamburgo2013.pdf)>. Acessado em: 26 de junho de 2022.

Gutberlet, J.; King, M. F. **Contribution of cooperative sector recycling to greenhouse gas emissions reduction: A case study of Ribeirão Pires, Brazil**. Waste Management 2013. Disponível em <  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X13003759?via%3Dihub>>. Acesso em: 25 de maio de 2022.

HAUG, R.T. **Practical Handbook of Compost Engineering**. 2a. Ed. Taylor & Francis Inc. Boca Raton, Florida. 1993.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico**. Cap. 9. Rio de Janeiro. 2010.<[https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv53096\\_cap9.pdf](https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv53096_cap9.pdf)>. Acesso em: 13 de maio de 2022.

Inácio, C.T.; Bettio, D. B.; Miller, P. R. M. **O papel da compostagem de resíduos orgânicos urbanos na mitigação de emissões de metano**. Embrapa. Rio De Janeiro, 2010. Disponível

em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/35983/1/documentos-127.pdf>

Acessado em 22 de março de 2022.

INÁCIO, C.T., MILLER, P. R. M. **Compostagem: ciência e prática para a gestão de resíduos orgânicos. Rio de Janeiro.** Embrapa Solos, 2009. p. 33.

IPCC (2006). IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Volume 5 Waste, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). IGES, Japan.

Intergovernmental Panel on Climate Change – AR5 Climate Change. 2014. Disponível em <[https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc\\_wg3\\_ar5\\_full.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_full.pdf)>. Acesso em 22 de março de 2022.

Intergovernmental Panel on Climate Change – **AR6 Mudanças Climáticas 2021: A Base da Ciência Física.** Disponível em: <[https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_SPM\\_final.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf)>. Acesso em 22 de março de 2022.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC 2022b) - AR4 Mudanças Climáticas 2021: A Base da Ciência Física. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4-wg1-chapter2-1.pdf> Acessado em 22 de março de 2022.

Instituto Brasileiro de Florestas (IBF). **Compensação de CO2 com Plantio de Florestas.** Disponível em <<https://www.ibflorestas.org.br/conteudo/compensacao-de-co2>>. Acesso em: 12 de junho de 2022.

Instituto de pesquisa Economia Aplicada (IPEA). **Catadores de materiais recicláveis um encontro nacional. Cap 22: Contribuição de cooperativas de reciclagem para redução de emissão de Gases de Efeito Estufa.** 2016. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/>>. Acesso em: 18 de abril de 2022.

JRC/PBL. **Emission Database for Global Atmospheric Research (EDGAR).** European Commission, Joint Research Centre (JRC)/PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. 2016. Disponível em: [https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2016-trends-in-global-co2-emissions-2016-report-2315\\_4.pdf](https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2016-trends-in-global-co2-emissions-2016-report-2315_4.pdf). Acesso em: 15 de abril de 2022.



KAZA, S.; YAO, L. C.; BHADA-TATA, PERINAZ; VAN WORDEN, F. **What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050**. Urban Development;. Washington, DC: World Bank. 2018.

Longo, G. L.; Nunes, A. O.; Barrios, C. C.; Paiva, J. M. F.; Moris, V. A. S. **Comparação das Emissões de Gases de Efeito Estufa em uma Cooperativa de Reciclagem de Materiais**. Rev. Virtual Quim., 2019, 11 (1), 190-209. Disponível em: <http://static.sites.sbq.org.br/rvq.sbq.org.br/pdf/v11n1a14.pdf> . Acessado em: 17 de março de 2022.

LIMA, Guilherme Cardim Gouveia de. Modelo de valoração ambiental da reciclagem de resíduos sólidos urbanos. Recife, 2012. 84 f. Dissertação (mestrado) - UFPE, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, 2012. Disponível em: [https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/10790/1/Disserta%c3%a7%oc3%a3o\\_Guilherme%20Cardim.pdf](https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/10790/1/Disserta%c3%a7%oc3%a3o_Guilherme%20Cardim.pdf). Acesso em: 30 de maio de 2022.

MASSI, Edson Henrique Gaspar; LUIZ, Leliana Aparecida Casagrande; MASSI, Clarissa Gaspar. Valoração ambiental da reciclagem para a redução de emissões de CO<sub>2</sub>. Revista Técnico-Científica, n. 19, 2019. Disponível em <https://revistatecie.crea-pr.org.br/index.php/revista/article/view/566>. Acesso em: 29 de maio de 2022.

MELLO, G. Notas sobre o gerenciamento de resíduos sólidos urbanos no Brasil. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, BNDES. Disponível em: [https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/?locale=pt\\_BR](https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/?locale=pt_BR) . Acesso em 13 de junho de 2022.

MCTIC – Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. **Fator médio – Inventários corporativos**. 2021. Disponível em: [https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/textogeral/emissao\\_corporativos.html](https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/textogeral/emissao_corporativos.html)>. Acessado em: 23 de junho de 2022.

MMA - Ministério do Meio Ambiente. Convenção-quadro das nações unidas sobre mudança do clima (UNFCCC). In: <https://antigo.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas.html>. Acesso em 29 de maio de 2022.

MEADOWS, Donella H., MEADOWS, Denis L., RANDERS, Jorgen, WILLIAN, W. Behens. **Limites do crescimento**. Um relatório para o projeto do Clube de Roma sobre o Dilema da Humanidade. São Paulo: Perspectiva, 1978.

NORDAHL, S.L et al. Life-Cycle Greenhouse Gas Emissions and Human Health Trade-Offs of Organic Waste Management Strategies. 2020. Disponível em:<<https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acs.est.0c00364>>. Acessado em: 30 de maio de 2022.

ONU (a) – Organização das Nações Unidas. Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento. **Nosso futuro comum, Relatório Brudtland**. Rio de Janeiro: Editora da Fundação Getúlio Vargas, 2. Ed. 1991.

ONU (b)– Organização das Nações Unidas. **Estocolmo+50 discute cooperação internacional para enfrentar tripla crise planetária**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/search?key=estocolmo>. Acesso em 29 de maio de 2022.

ONU (c)– Organização das Nações Unidas. **Panorama da gestão de resíduos na america latina e no caribe**. 2018(a). Disponível em:<[https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/26436/Waste\\_summary\\_PT.pdf?sequence=5&isAllowed=y](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/26436/Waste_summary_PT.pdf?sequence=5&isAllowed=y)> Acesso em 25 de abril de 2022.

ONU (d)– Organização das Nações Unidas. Meio ambiente aponta lacunas na reciclagem global de plástico. (2018b) <https://brasil.un.org/pt-br/82048-onu-meio-ambiente-aponta-lacunas-na-reciclagem-global-de-plastico>

PHILIPPI, A. Jr., TUCCI, C. E. M., HOGAN, NAVAGANTES, D. J., R. Uma Visão Atual e Futura da Interdisciplinaridade em C&T Ambiental. In: **Interdisciplinaridade em ciências ambientais**. PHILIPPI, A. Jr., TUCCI, C. E. M., HOGAN, NAVAGANTES, D. J., R (Editores). São Paulo: Signus Editora, 2000

PMF – Prefeitura Municipal de Florianópolis. Disponível em <<https://www.pmf.sc.gov.br/entidades/comcap/index.php?cms=coleta+seletiva+de+verdes&menu=7&submenuid=283>>. Acesso em 17 de abril de 2022.

PROTEGEER – Cooperação para a proteção do clima na gestão dos resíduos sólidos urbanos. Disponível em:<<http://protegeer.gov.br/images/documents/610/LA%C3%89RCIO%20FARACE%20BR>

[AGA%20CHAVES\\_Produ%C3%A7%C3%A3o%20de%20CDR%20em%20Pernambuco.pdf](#)

. Acesso em 17 de abril de 2022.

SILVA SANTOS, C.F.C. Compostagem como Redutor de Gases de Efeito Estufa, uma Alternativa à Disposição de Resíduos Orgânicos em Aterros Sanitários. Rio de Janeiro. 2020. Disponível em: <<http://www.peamb.eng.uerj.br/trabalhosconclusao/2020/Dissert-PEAMB-2020-Carlos-Felipe-Catorza.pdf>>. Acessado em: 9 de junho de 2022.

Sistema nacional de informação de saneamento (SNIS) – **DIAGNÓSTICO DO MANEJO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS. 18º Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos.** Brasília. 2020. Disponível em [http://www.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/rs/2019/Diagnostico\\_RS2019.pdf](http://www.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/rs/2019/Diagnostico_RS2019.pdf) . Acessado em: 23 de março de 2022

Sistema nacional de informação de saneamento (SNIS) – **DIAGNÓSTICO DO MANEJO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS. 17º Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos.** Brasília. 2019. Disponível em [http://www.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/rs/2018/Diagnostico\\_RS2018.pdf](http://www.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/rs/2018/Diagnostico_RS2018.pdf). Acessado em: 23 de março de 2022

Suski, C. A., & Luiz, B. V. (2019). **Análise de ciclo de vida dos processos de valorização de resíduos sólidos domiciliares em Florianópolis (SC) para redução de gases de efeito estufa.**

United Nation. **PARIS AGREEMENT.** 2015. Disponível em [https://unfccc.int/files/essential\\_background/convention/application/pdf/english\\_paris\\_agreement.pdf](https://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf). Acessado em: 25 de junho de 2022.