

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM CLIMA E AMBIENTE**

BRUNO VIEIRA LUIZ

**ANÁLISE DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA DOS
RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DO MUNICÍPIO DE
FLORIANÓPOLIS A PARTIR DA PROPOSIÇÃO DE CENÁRIOS DE
VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS**

FLORIANÓPOLIS, 2022

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM CLIMA E AMBIENTE**

BRUNO VIEIRA LUIZ

**ANÁLISE DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA DOS
RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DO MUNICÍPIO DE
FLORIANÓPOLIS A PARTIR DA PROPOSIÇÃO DE CENÁRIOS DE
VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Clima e Ambiente do Câmpus Florianópolis do Instituto Federal de Santa Catarina para a obtenção do diploma de Mestre em Clima e Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Cássio Aurélio Suski

FLORIANÓPOLIS, 2022

CDD 551.5
L953a

Luiz, Bruno Vieira

Análise de emissões de gases de efeito estufa dos resíduos sólidos urbanos do município de Florianópolis a partir da proposição de cenários de valorização de resíduos [DIS] / Bruno Vieira Luiz; orientação de Cássio Aurélio Suski – Florianópolis, 2022.

1 v.: il.

Dissertação de Mestrado (Clima e Ambiente) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Inclui referências.

1. Resíduos sólidos urbanos. 2. Gases de efeito estufa. 3. Valorização de resíduos. 4. Análise de ciclo de vida. I. Suski, Cássio Aurélio. II. Título.

Sistema de Bibliotecas Integradas do IFSC
Biblioteca Dr. Hercílio Luz – Campus Florianópolis
Catalogado por: Ana Paula F. Rodrigues - CRB 14/1117

Aluno (a): Bruno Vieira Luiz

Título:	ANÁLISE DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DO MUNICÍPIO DE FLORIANÓPOLIS A PARTIR DA PROPOSIÇÃO DE CENÁRIOS DE VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS
----------------	---

Aprovado (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de Mestre em Clima e Ambiente

Documento assinado digitalmente
 Cassio Aurelio Suski
Data: 15/03/2022 21:30:53-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Dr(a). Cássio Aurélio Suski

Orientador(a) / Presidente / IFSC / Itajaí – SC

Participação: () Presencial (x) Videoconferência
(X) **Aprovado** () Reprovado



Documento assinado digitalmente
MARIO FRANCISCO LEAL DE QUADRO
Data: 21/03/2022 09:49:21-0300
CPF: 539.913.030-00
Verifique as assinaturas em <https://v.ifsc.edu.br>

Dr(a). Mário Francisco Leal de Quadro

Avaliador(a) Interno / IFSC / Florianópolis - SC

Participação: () Presencial (x) Videoconferência
(X) **Aprovado** () Reprovado

Dr(a). Walter Martin Widmer



Avaliador(a) Interno / IFSC / Florianópolis - SC

Participação: () Presencial (x) Videoconferência
(X) **Aprovado** () Reprovado



Documento assinado digitalmente
ARMANDO BORGES DE CASTILHOS JUNIOR
Data: 15/03/2022 19:39:20-0300
CPF: 231.091.499-15
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Dr(a). Armando Borges de Castilhos Junior

Avaliador(a) Externo / UFSC / Florianópolis - SC

Participação: () Presencial (x) Videoconferência
(X) **Aprovado** () Reprovado

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

(X) unanimidade

RESUMO

A gestão dos resíduos sólidos urbanos (RSU) tem relação direta com o aquecimento global, pois possibilita a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) oriundos da decomposição dos resíduos em sua destinação final, além do reaproveitamento dos materiais, o que permite redução da exploração de matérias primas, evitando gasto de energia e, conseqüentemente, geração de GEE associada aos processos de produção, minimizando desta forma, direta ou indiretamente, a emissão de gases que contribuem para o aumento do efeito estufa. Este estudo tem por objetivo analisar a emissão de GEE de RSU por meio de ferramentas de Análise de Ciclo de Vida (ACV) nos processos de valorização dos resíduos no município de Florianópolis – SC, propondo alternativas tecnológicas para a gestão dos RSU do município de Florianópolis-SC, utilizando a ACV para quantificar as emissões atuais de GEE. Os cenários contemplam a valorização dos resíduos por meio de compostagem, biodigestores anaeróbios, reciclagem, geração de energia e disposição em aterro sanitário. Foram estabelecidos 5 cenários com percentuais distintos da combinação destas tecnologias. As emissões de GEE de cada cenário foram modeladas por meio do software Waste Reduction Model (WARM). Os resíduos foram categorizados considerando a gravimetria dos RSU no município, estabelecendo um cenário base para comparação com os cenários propostos, quantificando assim a redução de GEE. A partir dos valores obtidos foi realizada a projeção do impacto das emissões na temperatura, de modo a estimar como as tecnologias propostas nos cenários influenciariam esta variável. Os resultados demonstraram os benefícios ambientais com a inclusão de novas alternativas, proporcionando aos gestores uma ferramenta que estabelece qual a configuração ambientalmente mais adequada a ser adotada em termos de redução de GEE. Observou-se que a pior opção neste sentido foi o encaminhamento ao aterro sanitário. Concluiu-se que a ordem de prioridade deve observar a separação em três frações: recicláveis, orgânicos e rejeitos, sendo que a primeira fração demonstrou ser a mais significativa. Quanto aos tratamentos, constatou-se a seguinte ordem: reciclagem, compostagem, digestão anaeróbia, incineração com geração de energia e aterro sanitário. A metodologia de AVC na gestão de RSU se apresentou como uma ferramenta eficiente, quantificando os benefícios ambientais esperados para tratamentos que buscassem a recuperação energética dos

resíduos. Por fim, possibilitou a publicação dos resultados, por meio de produto tecnológico, que o município está alcançando em tempo real na página web Prefeitura Municipal de Florianópolis, demonstrando o quanto de GEE está deixando de ser emitido por meio das ações de valorização de resíduos atualmente implementadas no Município.

Palavras-chave: Resíduos Sólidos Urbanos, Gases de Efeito Estufa, Valorização de Resíduos, Cenários, Análise de Ciclo de vida.

ABSTRACT

The management of municipal solid waste (MSW) is directly related to global warming, as it allows the reduction of greenhouse gases (GHG) emissions arising from the decomposition of waste in its final destination. In addition, by allowing the reuse of substances, the correct waste management reduces the exploitation of raw materials and avoids unnecessary energy expenditure, which reduces the generation of GHG associated with production processes. This article proposes the implementation of technological alternatives for USW management in the city of Florianópolis-SC using a Life Cycle Assessment (LCA) methodology to quantify the current GHG emissions, proposing scenarios that promote waste valorization by using treatment technologies as composting, anaerobic digesters, recycling, incineration with energy generation and disposal in landfill. A base scenario will be established and, afterwards, five others, resulting from the combination of the aforementioned techniques in different percentages. Subsequently, the GHG emissions of each scenario will be analyzed using the Waste Reduction Model (WARM) software. The waste was categorized and modeled in the software, allowing the comparison of the emission between the proposed scenarios, in which technological alternatives for MSW valorization will be included, thus quantifying the reduction of GHG. From the values obtained, a projection of the impact of emissions on temperature was performed, in order to estimate how the technologies proposed in the scenarios would influence this variable. We demonstrate the environmental benefits of the proposed alternatives, quantitatively and qualitatively, that form a management model which becomes an important tool for the manager's choice regarding the most environmentally appropriate configuration. The results allow us to visualize which technological alternatives are potentially more suitable for reduction of GHG emissions in USW management. The objective of this study is to stimulate municipalities to adopt alternative technologies in USW management with a methodology that quantifies the environmental gain according to the most appropriate configuration at the local level.

Keywords: Urban Solid Waste, Greenhouse Gases, Waste Valorization, Scenarios, Life Cycle Assessment.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Justificativa	15
1.2	Definição do Problema.....	16
1.3	Objetivos.....	17
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	18
2.1	Resíduos Sólidos Urbanos – histórico, conceito e legislação	18
2.2	Gestão dos RSU em Florianópolis-SC.....	20
2.2.1	Coleta Convencional	22
2.2.2	Coleta Seletiva	23
2.2.3	Centro de Valorização de Resíduos	25
2.3	Análise de Ciclo de Vida na gestão dos RSU	27
2.4	Efeito Estufa e Gases de Efeito Estufa	31
2.5	Influência dos GEE nos elementos meteorológicos.....	34
3	METODOLOGIA.....	40
3.1	Estabelecimento dos cenários de GRSU de Florianópolis.....	41
3.2	Análise da emissão de GEE por meio de simulação computacional.....	48
3.2.1	Distância do centro logístico de operação.....	50
3.2.2	Características do Aterro Sanitário.....	51
3.2.3	Características do Digestor Anaeróbio	51
3.2.4	Distância do centro de reciclagem	52
3.2.5	Quadro resumo das variáveis	52
3.3	Determinação da influência dos gases de efeito estufa na variação dos elementos meteorológicos.....	52
3.4	Publicação de informações relacionadas às emissões de GEE e RSU ao público em geral.	55
4	RESULTADOS.....	56
4.1	Comparativo entre os cenários	59
4.2	Emissões por tipo de tratamento	64
4.3	Emissões por tipo de resíduo	65
4.4	Emissões por tipo de gases e de recursos	67
4.5	Emissões por tipo de processo.....	69
4.6	Influência nos elementos meteorológicos	71
5	DISCUSSÃO	80
5.1	Comparativo entre os cenários	81
5.2	Por tipo de tratamento	82
5.3	Por tipo de resíduo.....	83
5.4	Por tipo de gases e de recursos	85
5.5	Por tipo de Processo.....	87
5.6	Influência dos resultados nos elementos meteorológicos.....	89
6	Produto Técnicos e Tecnológicos	90
6.1	Residuômetro	90
6.2	Publicação de Artigo Científico	94
6.3	Participação em Eventos Científicos.....	95
7	CONCLUSÃO.....	95
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclo proposto pelo Programa Florianópolis Lixo Zero.....	22
Figura 2 - Equipe de coleta convencional (a), transbordo dos resíduos (b), aterro sanitário localizado no município de Biguaçu (c e d).....	23
Figura 3 - Equipe da coleta seletiva na ACMR - Associação de Catadores de Materiais Recicláveis (a e b), aspecto geral da ARESP - Associação de Recicladores Esperança (c) controle de estoque de fardos de alumínio na ACMR (d)	24
Figura 4 - Equipe da coleta seletiva de verdes (a) e triturador de beneficiamento das podas para tratamento via compostagem (b).....	25
Figura 5 - Coleta de vidros (a) e depósito temporário de vidro (b)	25
Figura 6 - Coleta (a e b), triagem dos resíduos volumosos coletados (c) e	26
Figura 7 - Trituração dos resíduos verdes (a), montagem das leiras de compostagem (b e c) e pilha de composto orgânico em maturação (d)	27
Figura 8 - Diagrama geral representando as emissões de cada etapa de coleta, tratamento e disposição final dos RSU	28
Figura 9 - Sistema de produto para Avaliação de Ciclo de Vida de RSU.	29
Figura 10 - Emissões brutas de gases de efeito estufa no Brasil, por setor, de 1990 a 2015 (Tg = milhões de toneladas).....	32
Figura 11 - Representação do processo de efeito estufa (esquerda) e o aumento deste em função do aumento da concentração de GEE causado pela intensificação as atividades antrópicas (direita).....	33
Figura 12 – Emissões de CO ₂ pelos modelos SSP1-1.9, SSP-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5.	37
Figura 13 – Variação da temperatura pelos modelos SSP1-1.9, SSP-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5.....	37
Figura 14 – Impacto das emissões até 2100 dos cenários na temperatura, considerando emissões de CO ₂ , outros GEE e síntese de carbono pela terra e oceanos.....	38
Figura 15 – Impacto nas mudanças na intensidade e frequência de picos de temperatura, precipitação extrema sobre a terra e intensidade e frequência de secas nos cenários, conforme modelo CMIP-6	39
Figura 16 – Localização do município de Florianópolis em relação ao Brasil.	42
Figura 17 - Caracterização dos RSU de Florianópolis-SC	43

Figura 18 - Características de cada cenário proposto.....	48
Figura 19: Total de emissão de GEE dos cenários e redução em relação ao Cenário Base.	59
Figura 20: Eficiência de redução em relação ao cenário base	61
Figura 21 - Diagrama de Sankey para o Cenário Base, Cenário 2021, Cenário 1 e Cenário 2.....	62
Figura 22 - Diagrama de Sankey para o Cenário 3, Cenário 4 e Cenário 5	63
Figura 23 - Total de emissão de GEE, em $TMCO_2eq$, por tipo de tratamento e cenário	64
Figura 24 - Total de emissão de GEE, em $TMCO_2eq$, por tipo de resíduo e cenário	66
Figura 25 - Gráfico comparativo de emissão por tipo de gases e recursos.....	68
Figura 26 - Gráfico comparativo de emissão por tipo de processo	70
Figura 27 - Redução da temperatura nos diferentes cenários – Método UCAR....	77
Figura 28 - Redução da temperatura nos diferentes cenários – Método Elis, Roberts	77
Figura 29 – Gráfico da evolução da concentração de CO_2 atmosférico nos modelos CMIP6, cenário Base e Cenário 5	79
Figura 30 – Imagem do <i>Dashboard</i> do SISCORE.....	91
Figura 31 – Programação do Residuômetro em PowerBI - Imagem da conexão das tabelas da base de dados do SISCORE.	92
Figura 32 - Quadro resumo das variáveis informadas pelo Residuômetro.....	93
Figura 33 - Quadro resumo das variáveis informadas no software	94
Figura 34 - Redução da temperatura de cada cenário em relação ao cenário base	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos RSU quanto às suas características	19
Tabela 2 - Classificação dos RSU quanto à origem	20
Tabela 3 - Potencial de aquecimento global dos principais gases de ação antrópica em termos de toneladas métricas de CO ₂	33
Tabela 4 - Influência na temperatura dos modelos SSP1-1.9, SSP-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5 a curto, médio e longo prazo.	38
Tabela 5 – Tipos de resíduos da caracterização do Plano Municipal Integrado de Resíduos Sólidos (PMF, 2017) e categoria considerada no software WARM.....	44
Tabela 6 – Metas de desvios de resíduos secos e orgânicos definidas para Florianópolis	46
Tabela 7 - Relação de tratamentos disponíveis no WARM com suas descrições.	47
Tabela 8 – Distribuição das opções de tratamento e disposição final dos RSU entre o cenário base e os cenários propostos.	47
Tabela 9 – Quadro resumo das variáveis informadas no software.....	52
Tabela 10 – Quadro resumo das variáveis informadas no software WARM.	58
Tabela 11 – Comparativo entre a emissão de GEE dos cenários	60
Tabela 12 – Eficiência de cada cenário em relação ao cenário base.....	61
Tabela 13 - Emissão de GEE dos cenários por tipo de resíduo	65
Tabela 14 - Emissão de GEE por tipo de gases e de recursos	67
Tabela 15 - Emissão de GEE por tipo de processo.....	69
Tabela 16 – Fator de multiplicação em função da população	71
Tabela 17 – Redução global de GEE de cada cenário.....	71
Tabela 18 - Comparativo da mudança de temperaturas até 2121 nos cenários propostos pelos 2 métodos apresentados.....	73
Tabela 19 – Redução de temperatura para o ano de 2100 para cada cenário, em °C	78
Tabela 20 – Concentrações de CO ₂ atmosférico nos modelos CMIP6, cenário Base e Cenário 5.....	78
Tabela 21 – Descrição dos tipos de gases e recursos	86

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV – Análise de Ciclo de Vida
CH₄ – Gás metano
CMIP – Coupled Model Intercomparison Project Phase
CO – Monóxido de carbono
CO₂ – Dióxido de carbono
COMCAP – Autarquia de Melhoramentos da Capital
CVR – Centro de Valorização de Resíduos
EPS – Poliestireno expandido
GEE – Gases de efeito estufa
IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change
N₂O – Óxido nitroso
NBR – Norma Técnica Brasileira
PEAD – Polietileno de alta densidade
PEBD – Polietileno de baixa densidade
PET – Polietileno tereftalato
PMF – Prefeitura Municipal de Florianópolis
PMGIRS – Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos
PNMC – Política Nacional de Mudanças Climáticas
PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos
PP – Polipropileno
PVC – Policloreto de vinila
RSU – Resíduo sólido urbano
SMMA – Secretaria Municipal de Meio Ambiente
SO₂ – Dióxido de enxofre
TMC_{CO₂eq} – Toneladas métricas de dióxido de carbono equivalentes
WARM – Waste Reduction Model

1 INTRODUÇÃO

O aquecimento global e a consequente necessidade de redução de emissão de GEE são importantes preocupações relacionadas ao clima e ao meio ambiente. A falta de investimentos aliado à falta de informações e de projetos práticos por parte do poder público justifica o lento avanço nas conquistas ambientais nesta área.

A disposição de RSU (alimentos, vidro, metal, plásticos, embalagens, podas de árvores e rejeitos em geral) em locais ambientalmente inadequados, ou até mesmo em aterros sanitários, aumenta as emissões gasosas que causam o efeito estufa.

Entender as emissões é o primeiro passo para que seja possível realizar ações para reduzi-las, assim como para pensar planos de ação climática e de adaptação (CNM, 2021).

Segundo o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), a decomposição desses resíduos no ambiente gera gás metano, com potencial de aquecimento global 25 vezes maior comparado ao dióxido de carbono.

Dentre os objetivos e metas da Política Nacional de Mudanças Climáticas (PNMC) está a redução de emissão de GEE relacionados com a decomposição de resíduos sólidos, prevendo a criação de “medidas que estimulem o desenvolvimento de processos e tecnologias, que contribuam para a redução de emissões e remoções de gases de efeito estufa” (Art. 6º, XII).

Se, por um lado, a PNMC estabeleceu a meta de redução entre 36,1 e 38,9% das emissões de GEE até 2020, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010 prevê o desvio de 20% de resíduos sólidos domiciliares dos Aterros Sanitários. O Decreto nº 7.390/2010, que regulamenta a PNMC, estabelece, além da adoção de fontes renováveis, a redução de emissão de GEE por meio do tratamento eficiente dos resíduos sólidos domiciliares, procedimento que, além da redução de emissão, incrementa a eficiência energética do processo.

Para minorar os impactos negativos referentes à emissão de GEE, políticas públicas e programas governamentais devem ser compatibilizados com os princípios, objetivos, diretrizes e instrumentos da Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), instituída pela Lei nº 12.187/2009.

O aumento da temperatura global é potencializado pelas ações antrópicas que interferem no efeito estufa natural do planeta devido ao aumento de emissões de GEE oriundos da queima de combustíveis fósseis pela exploração de recursos naturais em busca de matérias primas para fabricação de novos produtos e pela decomposição de resíduos em aterros sanitários e outras formas de disposição inadequadas. Os principais gases gerados pela decomposição dos resíduos sólidos urbanos (RSU) são o monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), dióxido de enxofre (SO₂) e gás metano (CH₄).

A gestão dos resíduos sólidos tem relação direta com o aquecimento global, seja minimizando as emissões de carbono pela decomposição dos resíduos, seja com o reaproveitamento dos materiais evitando partes significativas dos processos de produção, os quais emitem, direta ou indiretamente, partículas que contribuem para o aumento do efeito estufa.

A PNRS, coerentemente com a PNMC definiu entre os seus objetivos a adoção, desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias limpas, como forma de minimizar impactos ambientais (Art. 7º, IV), e o incentivo ao desenvolvimento de sistemas de gestão ambiental e empresarial voltados à melhoria dos processos produtivos e ao reaproveitamento dos resíduos sólidos, inclusive a recuperação e o aproveitamento energético (Art. 7º, XIV). O principal instrumento da PNRS, os Planos de Gestão de Resíduos Sólidos deverão incorporar a atenção a estas questões para minimizar os impactos ambientais do transporte de resíduos em geral (neste aspecto, reduzindo a emissão de CO₂) e da destinação dos resíduos orgânicos, como restos de alimentos, podas e rejeitos de indústrias alimentícias e agropastoris.

Portanto, essas políticas, através de suas diretrizes, objetivos e instrumentos se alinham e se unem em busca de um objetivo comum. Entretanto, apesar de marcos regulatórios serem instituídos, o índice de reciclagem e recuperação energética no Brasil representa de 2 a 3% do total de resíduos gerados no país, sendo do restante produzido, 59,1% são encaminhados para aterro sanitário, 22,9% para aterro controlado e 18,0% para lixões a céu aberto (ABRELPE, 2017).

No ano de 2021 a Prefeitura Municipal de Florianópolis realizou o beneficiamento de 7.574 toneladas de resíduos orgânicos, encaminhou para reciclagem 11.234 toneladas de recicláveis secos e destinou 188.707 toneladas de rejeitos para o aterro sanitário. Portanto, de todos os resíduos produzidos no

município, apenas 9,06% foram desviados do aterro sanitário, muito aquém do que poderia ser reaproveitado, muito embora esteja acima da média nacional (COMCAP, 2021).

Do ponto de vista de impacto ambiental, o aterramento de resíduos, mesmo que em aterros sanitários, é o pior cenário para disposição de resíduos sólidos urbanos em termos de emissão de gases de efeito estufa (IQBAL *et al.*, 2019; MOULT *et al.*, 2018).

A principal consequência do aumento de emissão antrópica de GEE é o aquecimento global. Este aquecimento observado nas últimas décadas está associado com inúmeros componentes do ciclo hidrológico, como padrões, intensidade e extremos de precipitações; derretimento de neve e gelo; aumento do vapor atmosférico; aumento da evaporação; aumento da percolação e umidade do solo (IPCC, 2008).

Por isso deve-se buscar alternativas tecnológicas que sejam mais eficientes do que a simples disposição dos resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários, que contemplem a reutilização, reciclagem e recuperação energética. A adoção de alternativas combinadas reduz significativamente a emissão de metano, gás carbônico e outros gases. Portanto, a geração de conhecimento e pesquisas na área é fundamental para subsidiar decisões de gestores quanto à adoção de alternativas tecnológicas. Ao contrário de outras áreas do saneamento, como tratamento de água e de esgoto, a temática de resíduos sólidos é insuficientemente estudada, havendo escassos investimentos e poucos pesquisadores nesta área.

Este estudo pretende avaliar quantitativamente o potencial de implantação de tecnologias alternativas com a consequente redução de gases de efeito estufa, buscando alcançar resultados satisfatórios no âmbito climático e ambiental.

Diante deste contexto, uma das principais técnicas disponíveis para relacionar a gestão dos RSU com a emissão de GEE é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), que consiste em uma técnica que fornece informações a partir do estudo de aspectos ambientais e impactos potenciais associados a um produto mediante: à compilação de um inventário de entradas e saídas pertinentes de um sistema de produto; à avaliação dos impactos ambientais potenciais associados a essas entradas e saídas; à interpretação dos resultados das fases de análise de inventário e de avaliação de impactos em relação aos objetivos dos estudos, ou seja, a ACV estuda os aspectos ambientais e os impactos potenciais ao longo da vida de um

produto (isto é, do “berço ao túmulo”), desde a aquisição da matéria-prima, passando por produção, uso e disposição (ABNT, 2001).

1.1 Justificativa

As recentes políticas ambientais, legislações e acordos para a gestão dos RSU estimulam o tratamento diferenciado dos resíduos a fim de permitir ganhos ambientais, com a redução da quantidade emitida de GEE, salientando o equilíbrio entre a PNMC e a PNRS, bem como está relacionado aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU (ODS) “Cidades e comunidades sustentáveis” (ODS11) e “Energia acessível e limpa” (ODS7).

O poder público possui papel fundamental no processo de gestão deste impacto negativo e deve contribuir à proteção ambiental, propondo e implantando políticas e ações práticas. O Decreto nº 7.404/2010, que regulamenta a PNRS estabelece no Art. 35º que “na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deverá ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos”. Portanto, antes de se buscar alternativas de destinação e disposição final para os RSU, deve ser pretendida ao máximo a redução da geração de RSU.

Em relação ao tratamento e disposição final, a principal alternativa deve ser o tratamento diferenciado destes resíduos, aplicando-se técnicas de recuperação que visem a redução das emissões provocadas pela decomposição orgânica, promovendo tratamento em ambientes controlados, além do reaproveitamento de recicláveis secos e recuperação energética dos rejeitos. Processos como o reaproveitamento energético através da geração de energia elétrica e/ou térmica com digestores, bem como com incineradores com geração de energia contribuem com a eficiência energética e o controle sobre a emissão de GEE, evitando o lançamento do gás metano na atmosfera, que representa o gás com maior potencial de provocar o efeito estufa.

No entanto, para tal, se faz necessária a implantação de ferramentas para avaliar as reduções de emissão das atividades antrópicas, dentre elas, a gestão dos RSU. Este trabalho pretende aplicar a metodologia de ACV para avaliar quanto de emissão de GEE que o município de Florianópolis atualmente (ano base de 2021)

está reduzindo com aplicação de tecnologias de tratamento de RSU, bem como propor a aplicação de novas tecnologias em cenários plausíveis de serem implantados, reportando quantitativamente as potenciais reduções nestes cenários.

O estudo propõe a utilização de tecnologias em cenários plausíveis, quantificando o quanto representa a redução de GEE em cada um deles, ou seja, alternativas efetivamente possíveis de serem implementadas, demonstrando a vantagem ambiental de cada uma delas em relação ao cenário base.

Busca-se demonstrar a necessidade de investimento por parte dos gestores públicos em tecnologias de tratamento de resíduos para que seja possível alcançar metas e resultados esperados no controle de emissão de GEE relacionados ao aproveitamento energético e ao tratamento de biomassa. Também se espera que as ferramentas de modelagem e ACV deste trabalho possam ser difundidos para propor mudanças de gestão dos RSU em outros municípios.

1.2 Definição do Problema

Embora a PNRS tenha impulsionado os municípios a investirem em sistema de coleta seletiva e tratamento diferenciado dos resíduos orgânicos, apenas 18% dos municípios brasileiros possuem o serviço de coleta seletiva (CEMPRE, 2016).

O município de Florianópolis-SC está dentre os municípios que mais reciclam no país, atingindo a marca de 9,06% no ano de 2021. O município instituiu a coleta seletiva no ano de 1988, ou seja, há mais de 30 anos, e nos últimos anos vem ampliando alternativas, como o tratamento de orgânicos (resto de alimentos e podas urbanas), com a utilização do composto orgânico em hortas comunitárias e arborização pública (COMCAP, 2020).

Apesar dos investimentos na valorização dos RSU, não há dados do quanto este investimento representa em ganhos ambientais relacionados com a emissão de GEE.

A implantação de uma ferramenta para quantificar esse ganho se torna fundamental para que seja possível o município reportar o quanto está refletindo ambientalmente.

Da mesma forma, o estabelecimento de cenários permitirá aos tomadores de decisão analisarem quais alternativas que proporcionarão maiores benefícios ambientais na gestão dos RSU.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Analisar a emissão de GEE de RSU por meio de ferramentas de ACV nos processos de valorização dos resíduos no município de Florianópolis – SC.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Propor cenários para a gestão dos resíduos sólidos municipais visando a redução de gases de efeito estufa;
2. Possibilitar a comparação, por meio de ferramentas de Análise de Ciclo de Vida (ACV), das diferentes alternativas tecnológicas a serem adotadas na gestão dos RSU do município de Florianópolis-SC;
3. Determinar a influência dos gases de efeito estufa na variação dos elementos meteorológicos;
4. Incentivar o investimento e adoção de tecnologias alternativas para o tratamento dos RSU, quantificando e publicizando as respectivas vantagens ambientais.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Resíduos Sólidos Urbanos – histórico, conceito e legislação

A PNRS (2010) conceitua, através do seu artigo 3º, inciso XVI, resíduo sólido como sendo:

Material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível.

Segundo a norma brasileira NBR 10.004 (2004), os resíduos sólidos são definidos como:

Aqueles resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades da comunidade de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face a melhor tecnologia disponível.

Essas definições evidenciam a diversidade e complexidade dos resíduos sólidos. Os RSU compreendem aqueles produzidos pelas atividades desenvolvidas em áreas urbanizadas, abrangendo resíduos de várias origens, como residencial, comercial, de estabelecimentos de saúde, industriais, da limpeza urbana, dentre outros. No caso dos resíduos comerciais, estes podem ser aceitos para coleta e disposição no aterro desde que autorizado pelas instituições responsáveis pelo GRSU. Ressalta-se que o gerenciamento de resíduos de origem não domiciliar, como é, por exemplo, o caso dos resíduos de serviço de saúde ou da construção civil, é de responsabilidade do gerador, estando sujeitos à legislação específica vigente (CASTILHOS JÚNIOR, 2003).

Quanto à classificação, esta é relevante para a escolha da estratégia de gerenciamento mais viável. A norma NBR 10.004 (2004), trata da classificação de resíduos sólidos quanto a sua periculosidade, ou seja, característica apresentada pelo resíduo em função de suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas, que podem representar potencial de risco à saúde pública e ao

meio ambiente. De acordo com sua periculosidade os resíduos sólidos podem ser enquadrados conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação dos RSU quanto às suas características

Categoria / Classificação	Definição / Características
Classe I ou Perigosos	São aqueles que, em função de suas características intrínsecas de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade, podem apresentar risco à saúde pública, provocando mortalidade, incidência de doenças ou acentuando seus índices, ou riscos ao meio ambiente, quando o resíduo for gerenciado de forma inadequada.
Classe II A ou Não-Inertes	São os resíduos que podem apresentar propriedades como combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água, com possibilidade de acarretar riscos à saúde ou ao meio ambiente, não se enquadrando nas classificações de resíduos Classe I – Perigosos – ou Classe IIB – Inertes.
Classe II B ou Inertes	São aqueles que, por suas características intrínsecas, não oferecem riscos à saúde e ao meio ambiente, e que, quando amostrados de uma forma representativa, e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

Fonte: ABNT/NBR 10.004 (2004), p. 03.

Pode-se ainda classificar os resíduos conforme sua origem, sendo que o IPT/CEMPRE (2010) classifica conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Classificação dos RSU quanto à origem

Resíduo	Classificação
Domiciliar	Aquele originado pela rotina das residências, constituído de alimentos, papéis, embalagens plásticas, garrafas de vidro e vários outros itens (inclusive tóxicos).
Comercial	Aquele originado pelos estabelecimentos comerciais diversos. Os resíduos destes locais possuem um grande número de plásticos, embalagens diversas e papéis.
Público	Originado através dos serviços de limpeza pública e áreas de feiras livres. Estes resíduos são constituídos por resíduos de varrição e limpeza de locais públicos.
Resíduos de Serviço de Saúde (RSS)	Aqueles originados em hospitais, clínicas, postos de saúde, consultórios médicos e veterinários. Em sua constituição podem apresentar resíduos infecto contagiantes (como agulhas, seringas, gazes, tecidos removidos, sangue coagulado entre outros).
Portos, aeroportos e terminais	Se constituem os resíduos sépticos que podem conter germes patogênicos em materiais de higiene, podendo veicular doenças provenientes de outras cidades.
Industrial	Originado nas diversas atividades industriais. O resíduo industrial é bastante variado, podendo conter cinzas, óleos, lodo, resíduos alcalinos ou ácidos, papéis, plástico, madeira, vidro, cerâmicas, entre outros.
Agrícola	Originados nas atividades agrícolas e pecuárias. Estes resíduos podem incluir embalagens de fertilizantes e defensivos agrícolas, rações, restos de colheita, dentre outros.
Resíduos da Construção Civil (RCC)	Resíduos da construção civil, composto por materiais de demolições, restos de obras, solos de escavações diversas, entre outros.

Fonte: Elaborado pelo Autor com base em Vilhena, 2010.

2.2 Gestão dos RSU em Florianópolis-SC

A gestão, planejamento e operação dos sistemas de manejo dos RSU no município de Florianópolis são realizadas pela Prefeitura Municipal de Florianópolis (PMF) através da Secretaria Municipal do Meio Ambiente (SMMA), criada em 2021 absorvendo os serviços prestados até então pela Autarquia de Melhoramentos da Capital (COMCAP). Além de operacionalizar a coleta de resíduos no município,

detém a atribuição de realizar a gestão municipal dos RSU, é responsável por definir as alternativas de tecnologias a serem aplicadas para a destinação e disposição final dos resíduos.

Os métodos de coleta disponibilizados aos munícipes são os seguintes:

- Coleta convencional (rejeitos) porta a porta;
- Coleta seletiva (recicláveis mistos) porta a porta;
- Ecopontos;
- Coleta de resíduos volumosos;
- Pontos de entrega voluntária (PEV) de vidros;
- Coleta por caixas estacionárias;
- Remoção de resíduos da limpeza pública e pontos de descarte irregular;
- Centro de Valorização de Resíduos (CVR).

O município de Florianópolis busca alcançar as metas estabelecidas no Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS) - Decreto nº 17.910/2017, que estabelece metas progressivas até 2030, buscando a redução de resíduos encaminhados ao aterro sanitário, sendo que esta meta também foi designada como Programa Florianópolis Capital Lixo Zero 2030, instituído pelo Decreto nº 18.646/2018, o qual prevê as seguintes diretrizes: incentivo a não geração e a redução dos RSU; atendimento às metas de reduções estabelecidas pelo PMGIRS; promoção da valorização dos RSU; desenvolvimento e aplicação de programas educacionais; criação de governança para proposição e controles a gestão e políticas públicas; promoção da inclusão social; articulação e integração com as demais políticas públicas municipais; incentivo à busca de soluções integradas com os Municípios da Região Metropolitana.

Este programa considera ordem de prioridade na gestão dos RSU, conforme se observa na Figura 1, sendo ele: consumo consciente (não geração), segregação e disposição em três frações (rejeitos, recicláveis secos e recicláveis orgânicos); coleta separada em três frações; encaminhamento adequado e; retorno dos materiais ao ciclo produtivo ou natureza.

Figura 1 - Ciclo proposto pelo Programa Florianópolis Lixo Zero



Fonte: COMCAP, 2020.

2.2.1 Coleta Convencional

Todos os resíduos coletados pela coleta convencional são encaminhados ao transbordo localizado no Centro de Valorização de Resíduos (CVR) da SMMA, onde são transferidos para caminhões de maior porte para que estes façam o transporte para o aterro sanitário, localizado no município de Biguaçu-SC, distante 49,7 quilômetros de distância do transbordo.

Nesta forma de coleta os resíduos são coletados com caminhões compactadores geralmente com o auxílio de elevadores mecânicos e contentores no caso de edificações multifamiliares e comerciais, sendo posteriormente transferidos para caminhões com maior capacidade no Centro de Valorização de Resíduos (CVR). A Figura 2 apresenta as etapas de coleta, transbordo e aterramento dos resíduos.

Observa-se que, quando os RSU são dispostos à coleta convencional, todo o montante é encaminhado ao aterro sanitário para disposição final, não havendo qualquer manipulação ou triagem destes.

Figura 2 - Equipe de coleta convencional (a), transbordo dos resíduos (b), aterro sanitário localizado no município de Biguaçu (c e d)



(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: COMCAP, 2020.

2.2.2 Coleta Seletiva

Todos os resíduos secos coletados pela coleta seletiva porta a porta são destinados às associações e cooperativas de catadores, atendendo as diretrizes da PNRS, a qual prevê a integração dos catadores de materiais recicláveis (Art. 7º, XII) e o incentivo à criação e ao desenvolvimento de cooperativas ou associações de catadores (Art. 8º, IV). A Figura 3 apresenta o aspecto geral do trabalho de recebimento e triagem realizado pelos galpões.

Figura 3 - Equipe da coleta seletiva na ACMR - Associação de Catadores de Materiais Recicláveis (a e b), aspecto geral da ARESP - Associação de Recicladores Esperança (c) controle de estoque de fardos de alumínio na ACMR (d)



(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: COMCAP, 2020.

Além da coleta seletiva de recicláveis secos, a COMCAP realiza a coleta seletiva de orgânicos, em duas frações: restos de alimentos e verdes (podas, gramas, folhas, etc).

Ambas frações são encaminhadas para o tratamento, utilizando a técnica de compostagem em leiras estáticas, em pátio localizado no CVR, localização estratégica do ponto de vista de logística, já que nesta hipótese elimina-se totalmente a necessidade de transporte para o destino final. A Figura 4 demonstra a coleta seletiva de verdes e o picador onde as podas são trituradas para serem destinadas para o tratamento através da técnica de compostagem.

Figura 4 - Equipe da coleta seletiva de verdes (a) e triturador de beneficiamento das podas para tratamento via compostagem (b)



Fonte: COMCAP, 2020.

Outra forma de coleta disponível no município é a coleta através de pontos de entrega voluntária de vidro, onde os contêineres são distribuídos em um total de 91 locais para que moradores e estabelecimentos comerciais tenham a opção de descartarem este tipo de material a ser encaminhado para reciclagem. A Figura 5 apresenta a coleta e descarga dos vidros em depósito temporário, para posterior encaminhamento à indústria de reciclagem de vidros.

Além de aumentar o índice de reciclagem, a coleta de vidro separada dos demais recicláveis secos propicia um menor risco de acidentes tanto aos garis, quanto aos recicladores, já que o principal causador de acidentes de trabalho é por objetos perfurocortantes (COMCAP, 2019).

Figura 5 - Coleta de vidros (a) e depósito temporário de vidro (b)



Fonte: COMCAP, 2020.

2.2.3 Centro de Valorização de Resíduos

O Centro de Valorização de Resíduos – CVR da COMCAP está localizado na Rodovia Admar Gonzaga nº 72, bairro Itacorubi, com uma área total de 103.788,99m², dispondo de estruturas administrativas e operacionais, se caracterizando, principalmente, por ser o centro logístico do manejo de resíduos em Florianópolis. Neste ponto todos os resíduos são pesados em balanças rodoviárias integrados a software – SISCORE (Sistema de coleta de Resíduos) para que sejam lançados em base de dados própria. Cada pesagem recebe informações sobre qual o tipo de coleta, qual tipo de resíduo, qual origem e qual destino será aplicado àquela carga.

Além disto, esta instalação possui uma série de depósitos temporários, como de resíduos perigosos, resíduos de serviço de saúde, pneus, óleo de cozinha, isopor, madeira, entulhos, vidros e eletrônicos. Após a coleta destes – seja em locais de depósito irregular ou entrega nos ecopontos da SMMA, os mesmos são triados para que sejam encaminhados ao destino final adequado, buscando a maior recuperação possível. A Figura 6 mostra o serviço de coleta e triagem de resíduos volumosos com a finalidade de encaminhamento à reciclagem por tipo de resíduo.

Figura 6 - Coleta (a e b), triagem dos resíduos volumosos coletados (c) e depósito temporário de pneus (d)



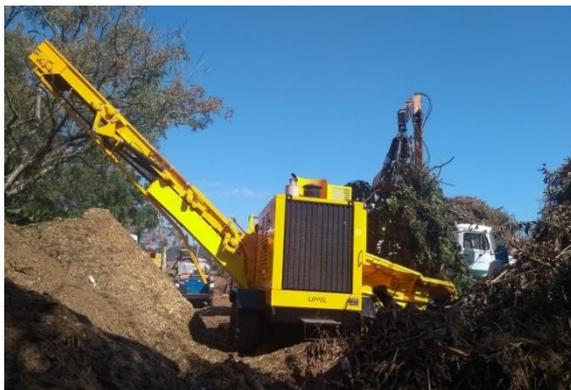
Fonte: COMCAP, 2020.

Os resíduos orgânicos coletados separadamente são encaminhados para o

tratamento por meio de leiras de compostagem. Tais resíduos são coletados em grandes geradores, tais como restaurantes, supermercados, hotéis, feiras, dentre outros.

Para a montagem das leiras, é realizada a montagem observando a proporção de mistura de 2:1 entre resíduos orgânicos verdes triturados e restos de alimentos. No caso das podas, estas passam por um triturador para reduzir em pequenas frações, servindo de base para as camadas das leiras. Conforme é possível verificar na Figura 7, as duas frações dos resíduos orgânicos são incorporados utilizando técnicas de compostagem, resultando em composto orgânico de qualidade para aplicação em hortas urbanas e paisagismo urbano.

Figura 7 - Trituração dos resíduos verdes (a), montagem das leiras de compostagem (b e c) e pilha de composto orgânico em maturação (d)



(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: COMCAP, 2020.

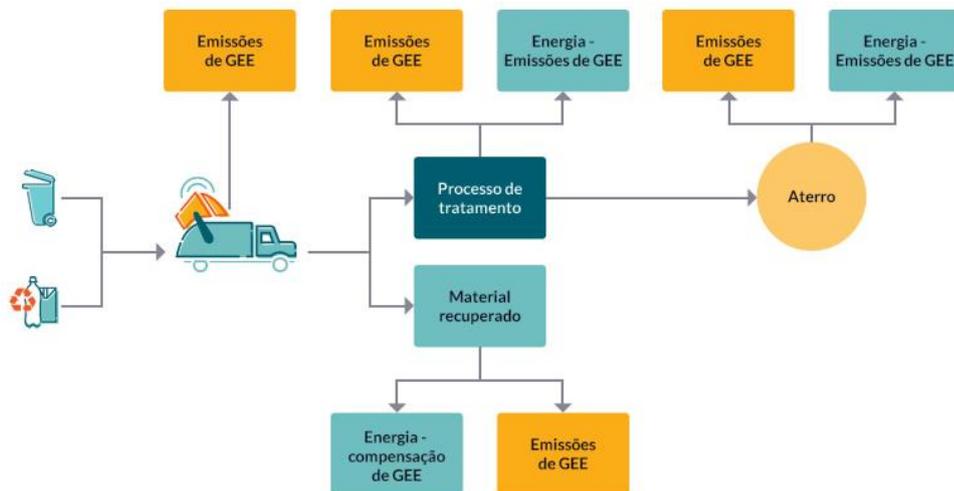
2.3 Análise de Ciclo de Vida na gestão dos RSU

Os produtos antes de serem consumidos ou utilizados, passam por processos industriais de transformação, desde a exploração de suas matérias-primas até a efetiva utilização pelo consumidor. Portanto, há emissões de GEE

durante todo processo de exploração, fabricação, transporte, utilização e destinação final, ou seja, ao longo de todo o ciclo de vida do produto.

O gerenciamento dos RSU gera impactos ao meio ambiente, principalmente, no que diz respeito às alterações sobre a atmosfera, considerando que todos os municípios geram e gerenciam seus resíduos, é possível afirmar que este gerenciamento tem potencial de afetar e causar alterações em âmbito global em maior ou menor escala dependendo das alternativas de gestão adotadas. A Figura 8 apresenta, de maneira geral, as emissões em cada etapa do sistema de coleta, tratamento e disposição final.

Figura 8 - Diagrama geral representando as emissões de cada etapa de coleta, tratamento e disposição final dos RSU



Fonte: PROTEGEER, 2018.

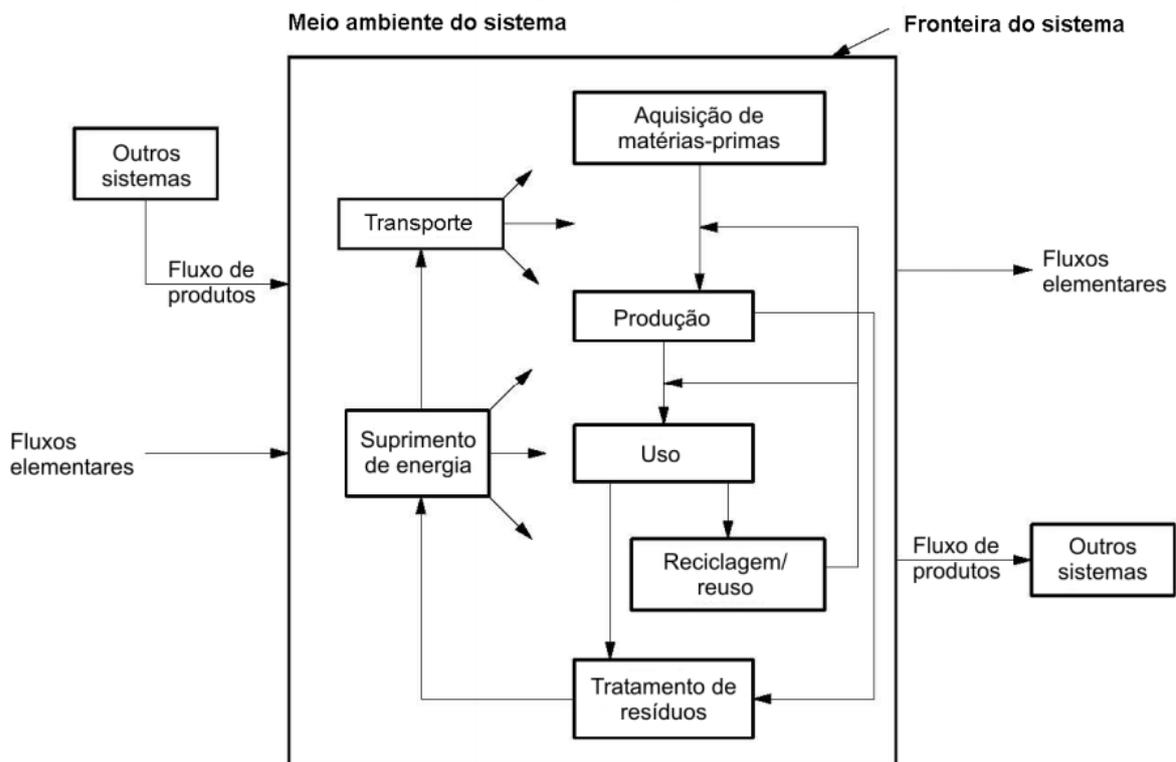
A avaliação de ACV voltadas à gestão de RSU é uma ferramenta relativamente nova, sendo mundialmente pouco difundida e a maior parte das publicações ocorreram a partir da década de 2010.

A ABNT NBR ISO 14.040:2009 define a ACV como sendo uma ferramenta que “enfoca os aspectos ambientais e os impactos ambientais potenciais - por exemplo, uso de recursos e as consequências de liberações para o meio ambiente ao longo de todo o ciclo de vida de um produto, desde a aquisição das matérias-primas, produção, uso, tratamento pós-uso, reciclagem até a disposição final (isto é, do berço ao túmulo).”

Ainda de acordo com esta norma, a ACV modela o ciclo de vida de um produto por meio de seu sistema de produto, que desempenha uma ou mais funções

definidas. Os processos elementares¹ são ligados uns aos outros por fluxos de produtos² intermediários e/ou de resíduos para tratamento, a outros sistemas de produto por fluxos de produtos e ao meio ambiente por fluxos elementares³. A subdivisão de um sistema de produto nos processos elementares que o compõem facilita a identificação das entradas e saídas do sistema de produto. Um processo elementar também gera outras saídas (fluxos elementares e/ou produtos) como resultado de suas atividades. O nível de detalhamento da modelagem, requerido para satisfazer o objetivo do estudo, determina as fronteiras de um processo elementar. A Figura 9 ilustra os fluxos de ACV dos RSU apresentando os diferentes processos, onde observa-se a fronteira do sistema, também conhecido como limite de controle, onde estão inseridos os processos de exploração das matérias primas, transporte, produção, utilização, gasto energético, reciclagem e tratamento dos resíduos.

Figura 9 - Sistema de produto para Avaliação de Ciclo de Vida de RSU.



Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2006.

¹ Processo elementar: menor elemento considerado na análise de inventário do ciclo de vida para o qual dados de entrada e saída são quantificados (ABNR NBR, 2006).

² Fluxo de produto: entrada ou saída de produtos provenientes de ou com destino a um outro sistema de produto (ABNR NBR, 2006).

³ Fluxo elementar: material ou energia retirado do meio ambiente e que entra no sistema em estudo sem sofrer transformação prévia por interferência humana, ou material ou energia que é liberado no meio ambiente pelo sistema em estudo sem sofrer transformação subsequente por interferência humana.

Ressalta-se que os critérios utilizados no estabelecimento da fronteira do sistema são importantes para o grau de confiança nos resultados de um estudo e para a possibilidade de se atingir seu objetivo (ABNT NBR, 2006).

Conforme afirma a Environmental Protection Agency (EPA, 2017), os ganhos potenciais relacionados à redução de emissão de GEE com a aplicação de cada tecnologia, em resumo, consistem em:

Reciclagem: a redução de exploração de matéria prima para gerar novos produtos, além de preservar os recursos naturais, acarreta na redução de energia gasta para produzir os produtos. O caminho alternativo ao aterramento de parte dos RSU – destinar novamente à indústria como matéria prima, demanda menor gasto com a exploração dos recursos naturais, transporte e beneficiamento, ocasionando redução significativa de emissão de GEE.

Compostagem: o tratamento dos resíduos orgânicos por meio da compostagem resulta em eficiência energética não apenas na produção de gases durante o processo de decomposição. Isso porque, 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. Outros benefícios são: a eficiência energética obtida pela redução de consumo de água; o aumento da capacidade produtiva do solo; e, o aumento da atividade microbiana, que resulta em um solo de maior qualidade. Portanto, espera-se significativa redução de emissão de GEE no processo global, demonstrando menor emissão nas demais etapas de utilização do composto em solo para agricultura e na redução do uso de fertilizantes e agrotóxicos.

Digestão anaeróbica: com benefícios similares à opção de compostagem, a digestão de RSU orgânicos sob temperatura e umidade controladas em reatores anaeróbicos devidamente dimensionados, permite o reaproveitamento energético através da captação e transformação em energia elétrica e/ou térmica com o beneficiamento do gás metano gerado no processo.

Incineração: a transformação de resíduos em energia térmica, ao contrário do que habitualmente se imagina, ocasiona redução de gases de efeito estufa. Do ponto de vista energético, o tradicional encaminhamento ao Aterro Sanitário desperdiça todo potencial de geração de energia dos resíduos, deixando-os decompor ao longo do tempo, gerando emissão de GEE e outros impactos

ambientais. Por outro lado, a geração de energia através desta massa, substitui outras fontes de geração energia, como termoelétricas por exemplo.

O aterramento dos resíduos, além de gerar impactos em sua disposição, como efluentes líquidos e gasosos, finda o ciclo dos materiais que ali se encontram, os quais poderiam se transformar em outros materiais ou serem recuperados energeticamente, como geração de energia.

A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América reconhecendo o potencial da redução na fonte e reciclagem dos RSU na redução dos GEE, incluiu metas em seu Plano de Ação de Mudanças Climáticas (*Climate Change Action Plan*) no ano de 1994, baseadas nos benefícios potenciais de mudança de gestão nesta área. Assim, ficou claro que deveria ser feita uma análise rigorosa para apurar o total de GEE que poderiam ser reduzidos (EPA, 2019).

Várias opções de gestão de RSU foram considerados em diversos estudos, resultando no desenvolvimento de uma ferramenta baseada na ACV em diversas categorias de resíduos, sendo publicadas seguidas versões nos anos de 1998, 2002 e 2006. Em 2010 a EPA reorganizou toda documentação em capítulos por materiais e por processos, incluindo definições mais aprofundadas relacionadas com os fatores de emissão de cada um destes (EPA, 2019).

Desta forma, EPA criou o Waste Reduction Model (WARM), para ajudar gestores e organizações da área de RSU a reportarem as reduções de emissões de GEE, economia de energia e impactos econômicos de diferentes sistemas de gestão de RSU. O WARM calcula e quantifica os impactos baseados no cenário base com os cenários alternativos, com base nas seguintes tecnologias de tratamento: redução na origem, reciclagem, digestão anaeróbia, incineração, compostagem e aterro sanitário (EPA, 2019).

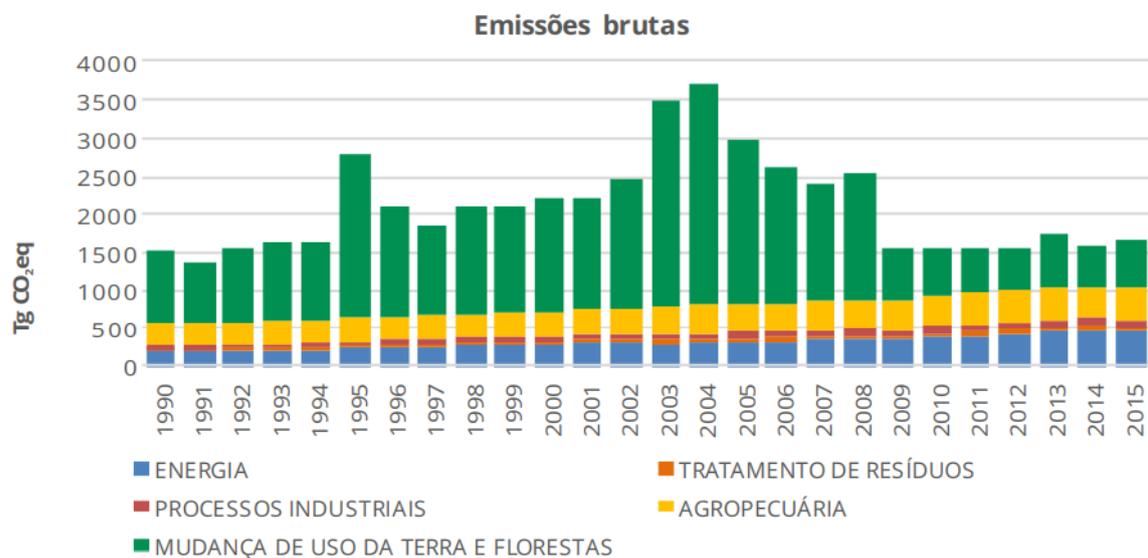
2.4 Efeito Estufa e Gases de Efeito Estufa

Embora o efeito estufa seja um mecanismo natural e indispensável à vida, ao longo dos anos está sendo afetado pelas ações antrópicas, provocando graves consequências nos elementos meteorológicos, especialmente na temperatura global. Isto se deve ao aumento da concentração de gases estufa na atmosfera, provenientes de certas atividades humanas. Em virtude do aumento desta

concentração, a temperatura terrestre tem se elevado, fenômeno conhecido como aquecimento global (IPCC, 2007).

Conforme observa o Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicações (MCTIC, 2017), as ações antrópicas que se destacam na emissão de GEE são: mudanças de uso da terra e florestas; agropecuária; geração de energia; tratamento de resíduos e; processos industriais (Figura 10).

Figura 10 - Emissões brutas de gases de efeito estufa no Brasil, por setor, de 1990 a 2015 (Tg = milhões de toneladas)



Fonte: MCTIC, 2017.

As emissões de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O), ocorrem de forma natural desde a formação do planeta. Cada um destes gases possui características específicas, vias de formação e potencial de impacto diferente. O CO₂ é um componente importante da atmosfera, liberado por processos naturais como respiração e erupções vulcânicas e por ações antrópicas como desmatamento, queima de combustíveis fósseis e sistemas de produção (NASA, 2016). O CH₄ é um hidrocarboneto produzido por atividades naturais, a partir de decomposição anaeróbica, e atividades antrópicas, como decomposição dos RSU. Considerando o potencial de aquecimento global, que consiste na probabilidade de uma molécula causar o aumento do efeito estufa e de suas consequências em um determinado período de tempo, o metano é cerca de 25 vezes mais nocivo em equivalência com o CO₂ (UOM, 2020). O N₂O é um poderoso gás do efeito estufa,

principalmente quanto ao seu potencial de aquecimento global, sendo de 298 vezes maior do que o dióxido de carbono (HU *et al.*, 2012). O óxido nitroso é produzido por processos de cultivo de origem antrópica, relacionados à fertilização e naturalmente, sendo oriundo dos processos de nitrificação e desnitrificação (NASA, 2016). A Tabela 3 mostra o potencial de aquecimento dos principais GEE relacionados à ação antrópica (UOM, 2020):

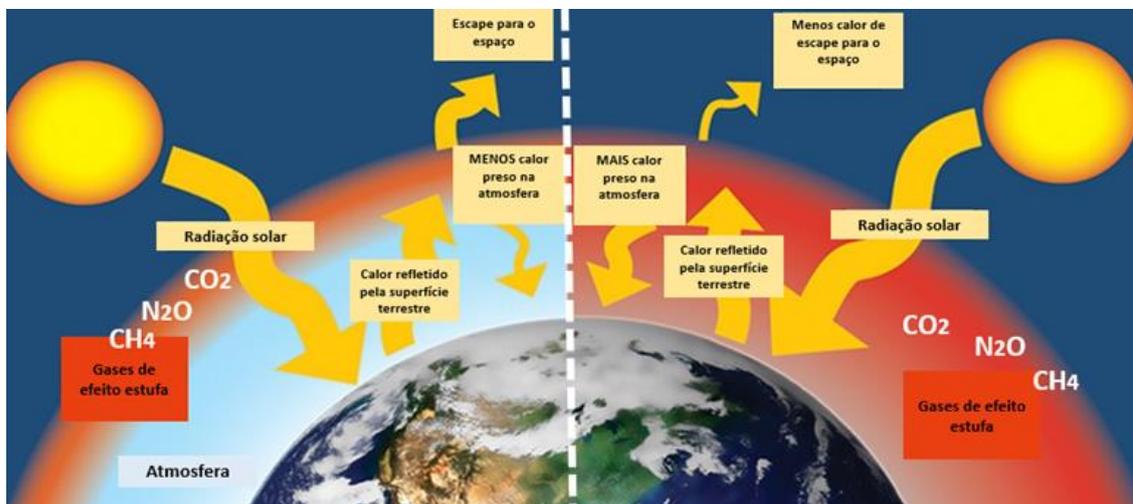
Tabela 3 - Potencial de aquecimento global dos principais gases de ação antrópica em termos de toneladas métricas de CO₂

Gás de Efeito Estufa	Fórmula química	Potencial de aquecimento (em T _{MC} CO ₂ eq)
Dióxido de Carbono	CO ₂	1,0
Metano	CH ₄	25,0
Óxido Nitroso	N ₂ O	298,0
Hexafluoreto de enxofre	SF ₆	22,8
Hidrofluorocarbono-23	CHF ₃	14,8
Hidrofluorocarbono-32	CH ₂ F ₂	675,0
Perfluorometano	CF ₄	7,3
Perfluoroetano	C ₂ F ₆	12,2

Fonte: Adaptado de University of Michigan, 2020.

A emissão destes gases contribui para o aumento do efeito estufa, responsável pelo aquecimento global e manutenção da temperatura média global através da absorção de radiação infravermelha emitida pelo aquecimento do planeta e refletida como energia térmica de volta para a Terra (IPCC, 2007). A Figura 11 representa a forma que a concentração dos gases impacta o aumento dos GEE.

Figura 11 - Representação do processo de efeito estufa (esquerda) e o aumento deste em função do aumento da concentração de GEE causado pela intensificação as atividades antrópicas (direita)



Fonte: Adaptado de ELDER, 2019.

A elevação sistemática de GEE na atmosfera ao longo dos últimos anos têm sido vinculada à ação antrópica, principalmente após o período da revolução industrial, quando foram descobertas novas tecnologias e fontes de energia, que resultou no aumento do efeito estufa e de 40% da concentração de CO₂ na atmosfera (IPCC, 2013). Como consequência, um conjunto de efeitos associados às mudanças climáticas afetaram ecossistemas naturais em escala mundial (IPCC, 2013). Registros da divisão de mudanças climáticas globais da NASA destacam o aumento da média global de temperatura e, conseqüentemente, degelo de calotas polares, aumento do nível, da temperatura e da acidificação dos oceanos e por último, aumento da frequência e intensidade de eventos extremos (NASA, 2016).

Em relação às alternativas de tratamento, a alternativa de aterro sanitário, onde são destinados a maior parte dos RSU dos municípios em nível nacional (SNIS, 2019) aproximadamente 97% das emissões de GEE são decorrentes das da geração de gás metano (CH₄) da degradação dos RSU e pela queima de combustível, especialmente pelo diesel consumido pelos maquinários pesados que operam no aterro (IQBAL *et al.*, 2019).

As emissões fugitivas de CH₄, geradas a partir de fonte biológica de carbono dos RSU no processo de decomposição no aterro sanitário é a principal fonte de emissão de GEE. Em contraste, quando se opta pela incineração com geração de energia, a alta fração de orgânico leva a uma redução significativa de emissão de GEE em função da redução de emissão de CH₄, e também pela recuperação energética desta alternativa (LIU *et al.*, 2017).

2.5 Influência dos GEE nos elementos meteorológicos

A variabilidade dos fatores ambientais pode resultar em efeitos significativos no clima regional e no clima global (WANG *et al.*, 2010), especialmente na relação de absorção de radiação pela atmosfera, que podem ser afetadas por fatores que alteram o ciclo do carbono terrestre, em especial pelas ações antrópicas. Estas ações podem refletir ou causar variações nas mudanças ambientais (PIELKE *et al.*, 2002). Os GEE estufa têm grande importância na química atmosférica e no balanço de radiação do sistema atmosfera-biosfera (CRUTZEN, 1991). As medições de CO₂ atmosférico são importantes para compreender o ciclo do carbono porque as taxas de mistura de CO₂ na atmosfera são fortemente afetadas pela fotossíntese, respiração, degradação da matéria orgânica, biomassa, queima de combustíveis

fósseis e processo de troca entre ar e água (MACHIDA *et al.*, 2003).

É relevante observar que nem toda energia solar incidente sobre a terra é absorvida. Boa parte dessa energia é refletida de volta para o espaço pela atmosfera e pela superfície do planeta. No caso da energia refletida pela superfície, em forma de radiação, esta é absorvida pela atmosfera antes que ela alcance o espaço exterior. Assim, havendo maiores concentrações de gases que absorvem esta radiação, principalmente em níveis inferiores da atmosfera, podem apresentar temperaturas mais altas (GOODY *et al.*, 1996), influenciando diretamente na temperatura, seja em micro ou em macro escala.

Ellis *et al.* (2013) afirma que mesmo o dióxido de carbono representando apenas 0,04% em concentração no ar, funciona como uma espécie de 'termostato da atmosfera terrestre', sendo que mesmo uma pequena variação em sua concentração pode resultar em uma significativa alteração na temperatura. Este fato se deve em função do nitrogênio e oxigênio que, mesmo constituindo a maior parte dos gases da atmosfera, não absorvem a radiação refletida pela superfície terrestre. Apesar do vapor de água e nuvens representarem 75% da radiação absorvida pela atmosfera, eles não podem determinar a temperatura da atmosfera, já que dependem da temperatura e da circulação atmosférica, enquanto o CO₂ não depende destas variáveis. Quando há condensação, o vapor de água não consegue manter uma estrutura de temperatura da atmosfera. O CO₂ é responsável por 80% dos gases não condensantes que mantêm a estrutura de temperatura da Terra, por este motivo, segundo o autor, este gás acaba controlando a quantidade de vapor d'água e nuvens. Ellis *et al.* (2013) também afirma que a absorção do CO₂ é muito significativa pois este gás absorve radiação na faixa frequência onde a emissão do calor da Terra (campo de Planck) é mais forte.

O aumento de temperatura ocasiona impacto sobre outros elementos meteorológicos, a exemplo da umidade, vento e pressão atmosférica. Por sua vez os ventos se constituem de veículos de transporte de calor, umidade e dispersão de gases atmosféricos.

Com o aumento da temperatura média global, ocorre a elevação da temperatura das águas superficiais, ocasionado o aumento de umidade no ar, modificando, além de condicionantes dos ecossistemas marinhos, a dinâmica da circulação atmosférica tendo efeitos sobre pressão atmosférica e ventos (IUCN, 2016).

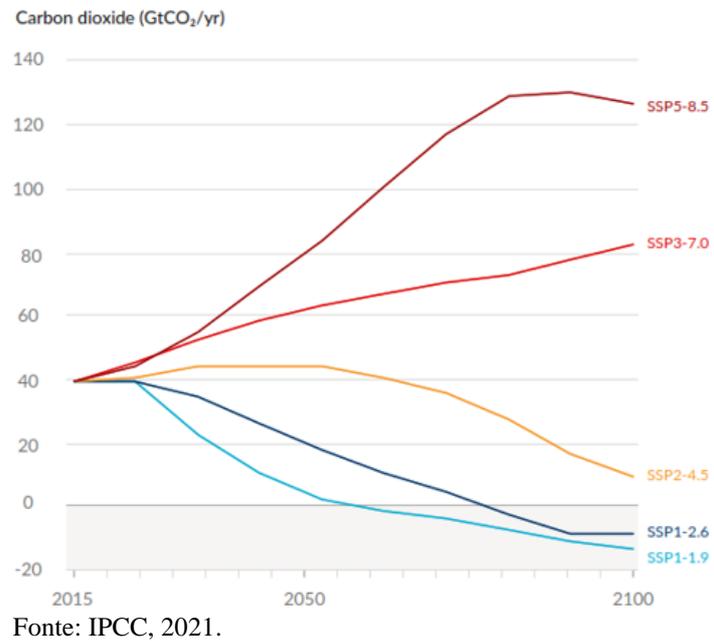
Dessa forma, com o aumento da temperatura do ar, a concentração do vapor de água também aumenta, amplificando o efeito estufa e provocando alterações nos demais elementos meteorológicos. Portanto, a emissão de GEE pelas ações antrópicas tem efeitos diretos e indiretos nas variáveis climáticas, já que estes gases por si só já refletem o aumento da temperatura, e conseqüentemente provocará o aumento da concentração de vapor de água da atmosfera, influenciando o clima.

Os efeitos da umidade sobre o clima refletem tanto nas temperaturas quanto no regime de chuvas. A água, em razão de seu calor específico, tende a conservar por mais tempo as temperaturas, fazendo com que haja uma menor amplitude térmica quanto maior for a umidade do ar. Em regiões mais úmidas ou que estejam mais afetadas pela umidade, o regime de chuvas tende a ser maior, pois a saturação do ar que provoca a condensação é mais frequente (IUCN, 2016).

Para entender como o aumento da concentração de gases de efeito estufa impactam no clima, modelos climáticos vêm sendo desenvolvidos e utilizados para entender como a Terra está mudando. Os modelos podem ser utilizados para avaliar o impacto nos elementos meteorológicos, como umidade, ventos, concentração de gases, derretimento de calotas polares, pressão e, especialmente, no que diz respeito ao aumento da temperatura global. Os modelos climáticos descrevem nosso planeta através de equações matemáticas. Para simular estas mudanças através de modelos, são necessárias equações para modelar a atmosfera, os oceanos e a superfície terrestre. Por causa da complexidade, muitos modelos climáticos tem aplicações limitadas, com restrições e com considerável grau de incerteza quanto aos resultados.

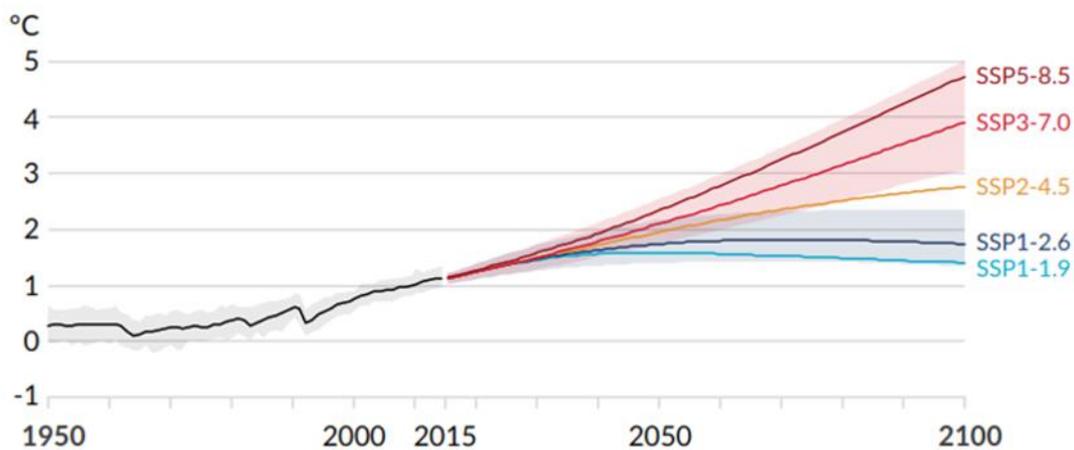
O relatório Summary for Policymakers (IPCC, 2021) apresenta cinco novos modelos (SSP1-1.9, SSP-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5) de emissões globais de GEE em resposta à diferentes emissões de GEE, considerando diferentes cenários com base nas emissões antrópicas, emissões naturais, alterações no uso da terra, dentre outras variáveis. Este conjunto de cenários permitem projetar cenários futuros de mudanças climáticas globais. Os resultados são fornecidos para curto prazo (2021–2040), médio prazo (2041–2060) e longo prazo (2081–2100). A Figura 12 apresenta graficamente a emissão de dióxido de carbono, em termos de giga toneladas por ano, por modelo.

Figura 12 – Emissões de CO₂ pelos modelos SSP1-1.9, SSP-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5.



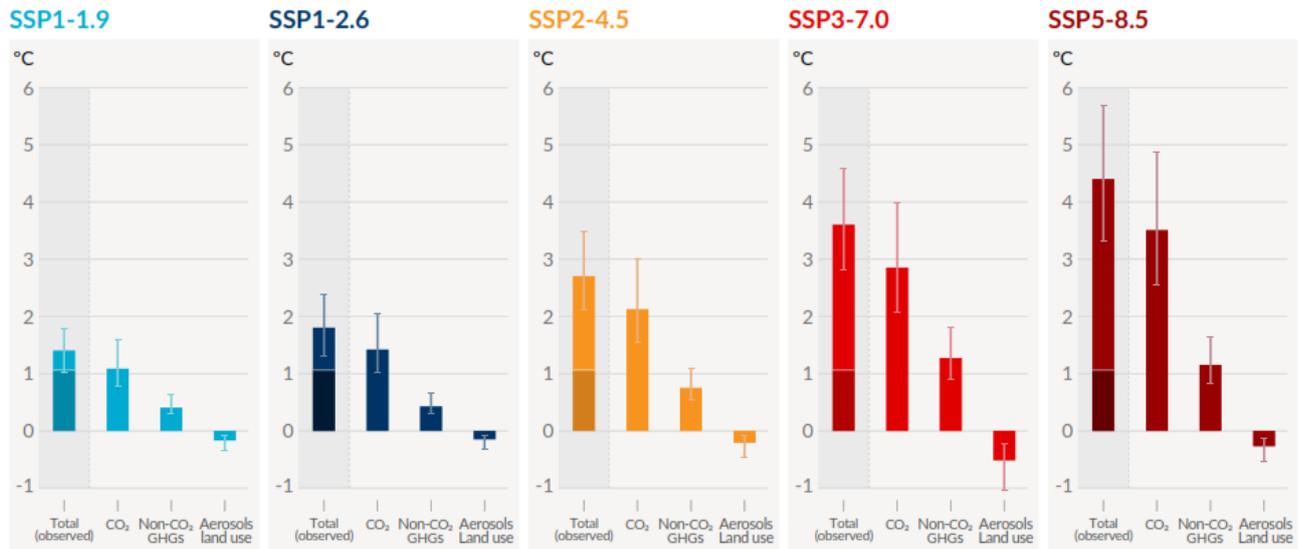
Já a Figura 13 apresenta o reflexo dos mesmos modelos na variação da temperatura ao longo dos anos.

Figura 13 – Variação da temperatura pelos modelos SSP1-1.9, SSP-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5.



A Figura 14 apresenta a influência das emissões antrópicas de cada cenário na temperatura global, considerando emissões de CO₂, outros GEE e síntese de carbono pela terra e oceanos nos cinco cenários (até 2100).

Figura 14 – Impacto das emissões até 2100 dos cenários na temperatura, considerando emissões de CO₂, outros GEE e síntese de carbono pela terra e oceanos



Fonte: IPCC, 2021.

A Tabela 4 apresenta a influência na temperatura em curto, médio e longo prazo dos modelos.

Tabela 4 - Influência na temperatura dos modelos SSP1-1.9, SSP-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5 a curto, médio e longo prazo.

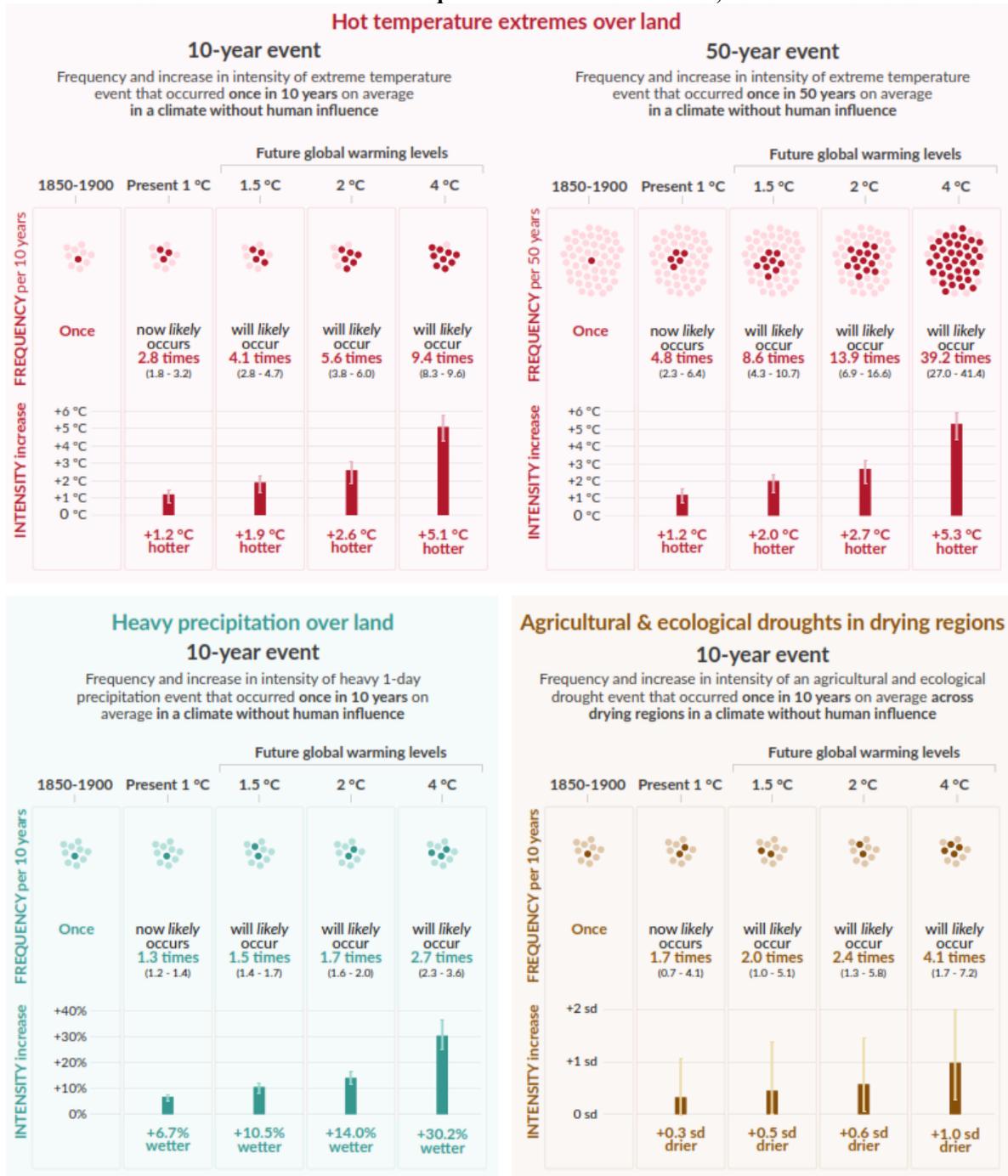
Cenário	Curto prazo (2021-2040)		Médio prazo (2041-2060)		Longo prazo (2081-2100)	
	Estimativa (°C)	Intervalo mais provável (°C)	Estimativa (°C)	Intervalo mais provável (°C)	Estimativa (°C)	Intervalo mais provável (°C)
SSP1-1.9	1.5	1.2 a 1.7	1.6	1.2 a 2.0	1.4	1.0 a 1.8
SSP1-2.6	1.5	1.2 a 1.8	1.7	1.3 a 2.2	1.8	1.3 a 2.4
SSP2-4.5	1.5	1.2 a 1.8	2.0	1.6 a 2.5	2.7	2.1 a 3.5
SSP3-7.0	1.5	1.2 a 1.8	2.1	1.7 a 2.6	3.6	2.8 a 4.6
SSP5-8.5	1.6	1.3 a 1.9	2.4	1.9 a 3.0	4.4	3.3 a 5.7

Fonte: Adaptado de IPCC, 2021.

A partir da definição de cenário futuro de emissões de GEE e consequente aumento de temperatura, é possível estimar o impacto em outros elementos meteorológicos, como precipitação, além de frequências de picos de temperatura e estiagens, por exemplo. O modelo Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP-6) a partir do aumento de temperatura média anual (1,5°C, 2°C e 4°C), projeta mudanças na intensidade e frequência de picos de temperatura, precipitação extrema sobre a terra e intensidade e frequência de secas, conforme

Figura 15.

Figura 15 – Impacto nas mudanças na intensidade e frequência de picos de temperatura, precipitação extrema sobre a terra e intensidade e frequência de secas nos cenários, conforme modelo CMIP-6



Fonte: IPCC, 2021.

Diante dos resultados da projeção do modelo CMIP-6, observa-se que para uma projeção de acréscimo de 4°C considerando 10 anos de tempo de retorno, a frequência de eventos extremos de pico de temperatura pode aumentar 9,4 vezes (com intensidade de +5,1°C), picos de precipitações 2,7 vezes (com intensidade de

+30,2%) e frequência de secas de 4,1 vezes. Para um tempo de retorno de 50 anos é projetado um aumento de frequência de 39,2 vezes no pico de temperatura, para intensidade de 5,3°C.

3 METODOLOGIA

O presente estudo realizou levantamento quantitativo de emissão de GEE em diferentes cenários utilizando o software Waste Reduction Model - WARM, o qual realiza modelagem computacional baseada em ACV de diferentes categorias de RSU. Após o lançamento dos dados de entrada – dados da produção de resíduos de Florianópolis no ano de 2021, o software forneceu dados de emissões de GEE referentes ao tratamento e destino final de diversos cenários, permitindo comparativo detalhado das emissões sobre as alternativas propostas, bem como possibilitando o cálculo de acréscimo na temperatura global.

Foram avaliados outros softwares que utilizam a ACV para relacionarem os tratamentos dos RSU com emissões de GEE, a exemplo dos softwares *Organic Waste Research* - ORWARE, EASEWASTE e EASETECH. Todos possuem a similaridade de realizarem modelagem de emissões a partir de inventário do ciclo de vida de RSU. A escolha do software WARM se deu em função de algumas características principais: calibração do sistema com a entrada das variáveis (*inputs*) dos cenários a serem avaliados (características dos tratamentos, distâncias das instalações e pontos logísticos, dentre outros); grande quantidade de RSU no inventário (60 tipos de resíduos diferentes); software constantemente atualizado e; software gratuito, o que permite a utilização por gestores de outros municípios, facilitando comparativos entre estudos similares realizados em outras localidades futuramente.

Os fluxos de ACV de cada resíduo analisado neste trabalho consta no Anexo I deste trabalho, onde é possível observar para cada etapa de cada alternativa de destinação final, os consequentes valores unitários de emissões.

Para alcançar os resultados propostos neste trabalho, serão realizadas as seguintes etapas, conforme apresentado no fluxograma a seguir:

Figura 16 – Fluxograma das etapas a serem realizadas

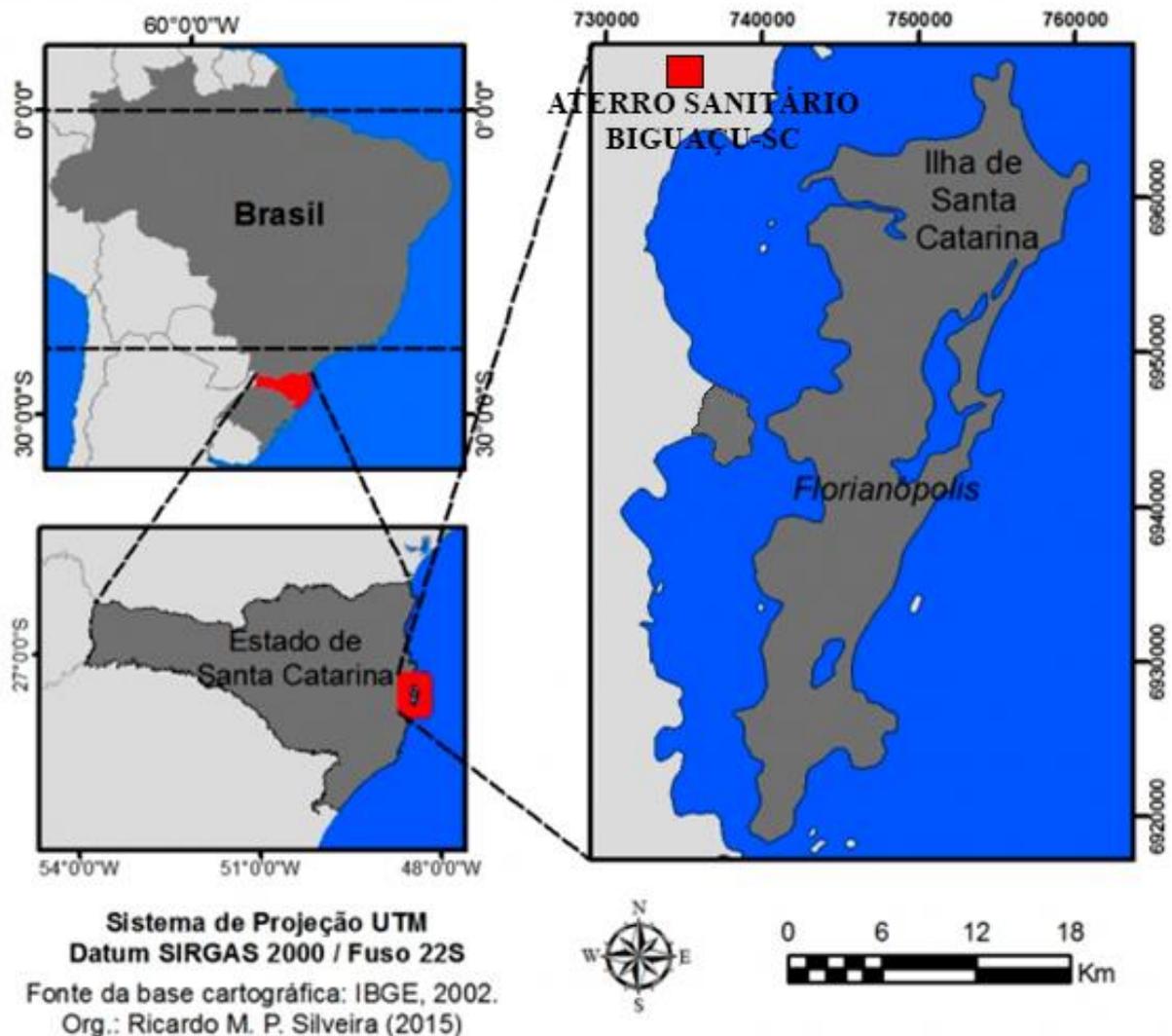
Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.1 Estabelecimento dos cenários de GRSU de Florianópolis.

O município de Florianópolis-SC foi escolhido para este estudo por possuir algumas iniciativas relacionadas à valorização de RSU, como considerável programa de coleta seletiva e reciclagem de resíduos secos (coleta porta a porta, ecopontos, pontos de entrega voluntária de vidro, etc.) e compostagem de resíduos orgânicos - tanto de verdes (podas, folhas, gramas e similares), quanto de restos de alimentos, bem como programa de aplicação de composto orgânico resultante em arborização pública e hortas comunitárias. A organização dos dados também se mostra confiável, já que toda movimentação dos RSU passa pelo Centro de Valorização de Resíduos, onde são pesados e organizados em um banco de dados, categorizados por tipo de coleta, tipo de resíduo, origem e destino.

A Figura a seguir apresenta a localização do município de Florianópolis-SC, bem como a localização do aterro sanitário, localizado a 49,6 quilômetros do Centro de Valorização de Resíduos.

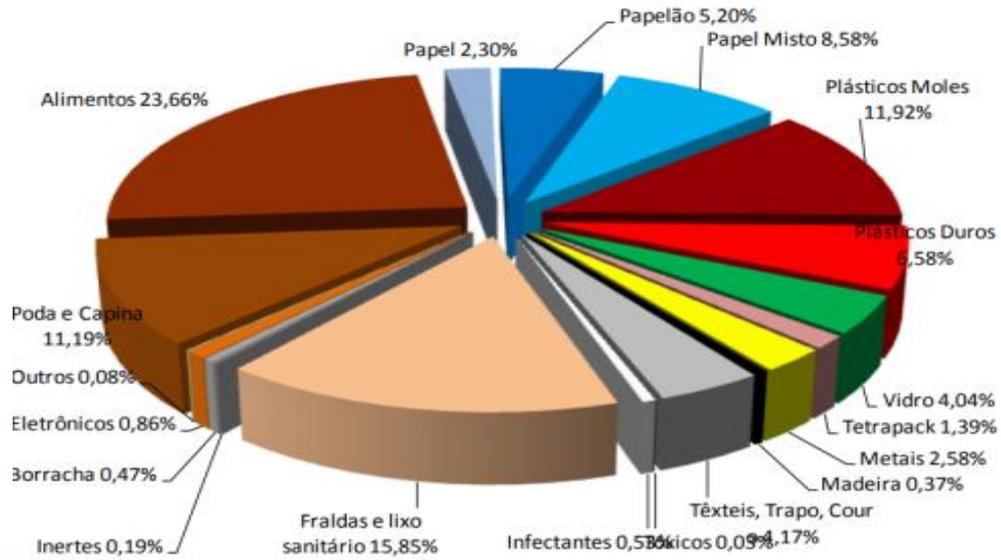
Figura 17 – Localização do município de Florianópolis em relação ao Brasil.



Fonte: adaptado de IBGE, 2002.

Com os dados de geração de RSU no ano de 2021 no município de Florianópolis, os resíduos foram categorizados utilizando como base a caracterização de resíduos, publicado pelo Município através do Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS - Decreto nº 17.910/2017), o qual realizou amostragem gravimétrica dos resíduos coletados em todas as regiões do município obtendo-se a composição dos RSU em termos percentuais, conforme mostra a Figura 18.

**Figura 18 - Caracterização dos RSU de Florianópolis-SC
Gravimetria - Florianópolis**



Fonte: Plano Municipal de Coleta Seletiva de Florianópolis, PMF, 2017.

Com base na gravimetria, os resíduos presentes na caracterização foram comparados com as categorias do banco de dados de ACV do software WARM, adequando-os conforme similaridade, conforme Tabela 5.

Tabela 5 – Tipos de resíduos da caracterização do Plano Municipal Integrado de Resíduos Sólidos (PMF, 2017) e categoria considerada no software WARM

Tipo de Resíduo na Caracterização dos RSU de Florianópolis-SC (PMGIRS, 2017)		Tipo de Resíduo de entrada no software WARM	Porcentagem correspondente	Peso Correspondente (Toneladas)
Categoria	Subcategoria			
Resíduo Orgânico	Poda e Capina	Yard Trimmings	11,19%	23.220,96
	Alimentos	Food Waste	23,66%	49.098,12
Papel		Mixed Paper (general)	2,30%	4.772,85
Papelão		Corrugated Containers	5,20%	10.790,80
Papel Misto		Mixed Paper (general)	8,58%	17.804,81
Plásticos Moles	PEAD	HDPE	4,90%	10.168,25
	PVC	Mixed Plastics	0,52%	1.079,08
	PEBD	Mixed Plastics	5,79%	12.015,14
	PP	Mixed Plastics	0,02%	41,50
	PS	Mixed Plastics	0,00%	0,00
	EPS	Mixed Plastics	0,00%	0,00
	Metalizado	Mixed Plastics	0,68%	1.411,10
Plásticos Duros	PET	Mixed Plastics	3,07%	6.370,72
	PEAD	Mixed Plastics	0,57%	1.182,84
	PVC	Mixed Plastics	0,29%	601,79
	PEBD	Mixed Plastics	0,02%	41,50
	PP	Mixed Plastics	1,20%	2.490,18
	PS	Mixed Plastics	0,72%	1.494,11
	EPS	Mixed Plastics	0,66%	1.369,60
	Metalizado	Mixed Plastics	0,03%	62,25
Outros	Mixed Plastics	0,01%	20,75	
Vidro		Glass	4,04%	8.383,62
Tetrapak		Mixed Paper (general)	1,39%	2.884,46
Metais	Alumínio	Aluminium cans	0,65%	1.348,85
	Ferro	Mixed Metals	1,94%	4.025,80
	Outros	Mixed Metals	0,01%	20,75
Madeira		Dimensional Lumber	0,37%	767,81
Têxteis		Mixed MSW	4,17%	8.653,39
Tóxicos	Baterias, Lâmpadas	Mixed Electronics	0,03%	62,25
Infecantes		Mixed MSW	0,53%	1.099,83
Fraldas e Sanitário		Mixed MSW	15,85%	32.891,18
Resíduos da Construção Civil		Mixed MSW	0,19%	394,28
Borracha/Pneus		Tires	0,47%	975,32
Eletrônicos		Mixed Electronics	0,86%	1.784,63
Óleo Vegetal		Food Waste (non-meat)	0,00%	0,00
Outros		Mixed MSW	0,09%	186,76
Total			100%	207.515,31

Fonte: Elaborado pelo Autor, com base em WARM, 2020 e nos dados de COMCAP, 2021.

O estabelecimento dos cenários foi construído propondo a combinação de diferentes tratamentos: reciclagem, compostagem, digestão anaeróbica, aterro sanitário e incineração com geração de energia. Os cenários foram construídos

aplicando gradativamente novas tecnologias e ampliando os quantitativos em cada uma delas.

Os critérios utilizados para construí-los foram os seguintes:

- Cenário Base: representa a opção de utilização exclusiva do aterro sanitário para encaminhamento de todos os RSU e servirá como base para comparação dos benefícios ambientais progressivos adotados pelo uso das tecnologias propostas;
- Cenário 2021: foi construído com os valores que o município apresenta em sua gestão, tendo como base o ano de 2021, ou seja, foram utilizados os quantitativos efetivamente realizados pelo município, o que permitirá estimar o quanto foi reduzido de GEE neste período – sendo 90,94% encaminhado ao aterro sanitário, 5,41% para reciclagem e 3,65% para compostagem;
- Cenário 1: este cenário foi proposto utilizando as metas que o PMGIRS previa para o ano de 2020, ou seja, encaminhamento para reciclagem 15,35% (equivalente a 37,00% do total de recicláveis secos) e 15,75% para compostagem (equivalente a 45,00% do total de orgânicos);
- Cenário 2: representa a meta prevista no PMGIRS para o ano de 2025, com 23,65% para reciclagem (equivalente a 55,00% do total de secos) e 29,75% para compostagem e digestão anaeróbia – sendo 15,75 e 14,00%, respectivamente (equivalente a 85,00% do total de orgânicos);
- Cenário 3: representa a meta prevista no PMGIRS para o ano de 2030, com 25,80% para reciclagem dos secos (equivalente a 55,00% dos recicláveis secos) e 31,50% para tratamento de orgânicos, divididos em partes iguais para compostagem e digestão anaeróbia (equivalente a 85,00% do total de orgânicos presentes nos RSU);
- Cenário 4: Meta final do PMGIRS, com os desvios previstos para o ano de 2030, ou seja, 34,40% para reciclagem dos secos (equivalente a 60,00% dos recicláveis secos) e 33,25% para tratamento de orgânicos, divididos em partes iguais para compostagem e digestão anaeróbia (equivalente a 90,00% do total de orgânicos);
- Cenário 5: Mesma situação do cenário 4, entretanto propondo a destinação do quantitativo referente à rejeitos – 32,34% do total para incineração com geração de energia (meta final do plano).

Conforme citado nos cenários 2, 3 e 4, foram consideradas as metas do município de Florianópolis estabelecidas em seu Plano Municipal Integrado de Resíduos Sólidos (PMGIRS). As metas são progressivas, com o horizonte final para serem alcançadas no ano de 2030, conforme Tabela 6.

Tabela 6 – Metas de desvios de resíduos secos e orgânicos definidas para Florianópolis

Ano	Meta Mínima de Desvio dos Recicláveis Secos (%)	Meta Mínima de Desvio dos Resíduos Orgânicos (%)
2016	18,0%	7,5%
2017	20,0%	15,0%
2018	24,0%	25,0%
2019	30,0%	35,0%
2020	37,0%	45,0%
2021	44,0%	55,0%
2022	50,0%	65,0%
2023	53,0%	75,0%
2024	54,0%	80,0%
2025	55,0%	85,0%
2026	57,0%	90,0%
2027	58,0%	90,0%
2028	58,0%	90,0%
2029	59,0%	90,0%
2030	60,0%	90,0%

Fonte: Plano Municipal Integrado de Resíduos Sólidos (PMGIRS), 2017.

Dentre os as alternativas consideradas no presente estudo, a Tabela 7 apresenta as circunstâncias que influenciam na emissão de GEE para cada tratamento e a Tabela 8 apresenta a distribuição dos cenários propostos.

Tabela 7 - Relação de tratamentos disponíveis no WARM com suas descrições

Tratamento	Descrição
Redução na fonte ⁴	Também pode ser descrito como 'não geração', por exemplo, a utilização de embalagens mais leves necessita menor quantidade de matéria prima, logo emissões de GEE são deixadas de serem geradas. Além disso, quando produtos de origem de celulose são reduzidos na fonte, adicionalmente é aumentado o sequestro de carbono nas florestas em razão da redução do desmatamento.
Reciclagem	As emissões de GEE são reduzidas em razão da diminuição do montante de matéria prima virgem utilizadas pelas indústrias. Na maioria dos casos a reciclagem reduz a emissão de GEE em função da manufatura utilizando produtos reciclados requerem menor energia do que a produção com matéria virgem.
Compostagem	A compostagem com aplicação dos compostos orgânicos produzidos (composto orgânico) nos solos resultam no estoque de carbono e menor emissão de CH ₄ e N ₂ O provenientes da decomposição.
Digestão Anaeróbia	A digestão anaeróbia captura o gás da digestão da matéria orgânica na ausência de oxigênio. É assumido que o biogás será utilizado como fonte de energia para produção de energia, substituindo emissões com o consumo de combustível fóssil, como o gás natural, por exemplo. Adicionalmente, o resíduo resultante da digestão anaeróbia é aplicado na agricultura resultando em estoque de carbono no solo substituindo fertilizantes sintéticos e reduz a emissão de CH ₄ e N ₂ O durante a digestão e após a aplicação na terra.
Aterro Sanitário	O aterramento dos RSU resulta tanto em emissão de CH ₄ em função da biodegradação quanto o estoque biogênico de carbono. Quando capturado, o CH ₄ pode ser queimado, sendo transformado em CO ₂ . Caso capturado e transformado em energia, substitui consumo de combustíveis fósseis.
Incineração	Quando os RSU são incinerados em uma planta waste-to-energy (incineração de RSU com geração de energia), resulta em geração de energia elétrica, reduzindo a geração de GEE com a substituição da utilização de combustíveis fósseis.

Fonte: Adaptado de EPA, 2019.

Tabela 8 – Distribuição das opções de tratamento e disposição final dos RSU entre o cenário base e os cenários propostos.

Tratamento	Cenário Base	Cenário 2021	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
Aterro Sanitário	100,00%	90,94%	68,90%	46,60%	42,70%	32,34%	0,00%
Reciclagem	0,00%	5,41%	15,35%	23,65%	25,80%	34,40%	34,40%
Compostagem	0,00%	3,65%	15,75%	15,75%	15,75%	16,63%	16,63%
Digestão Anaeróbia	0,00%	0,00%	0,00%	14,00%	15,75%	16,63%	16,63%
Incineração	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	32,34%

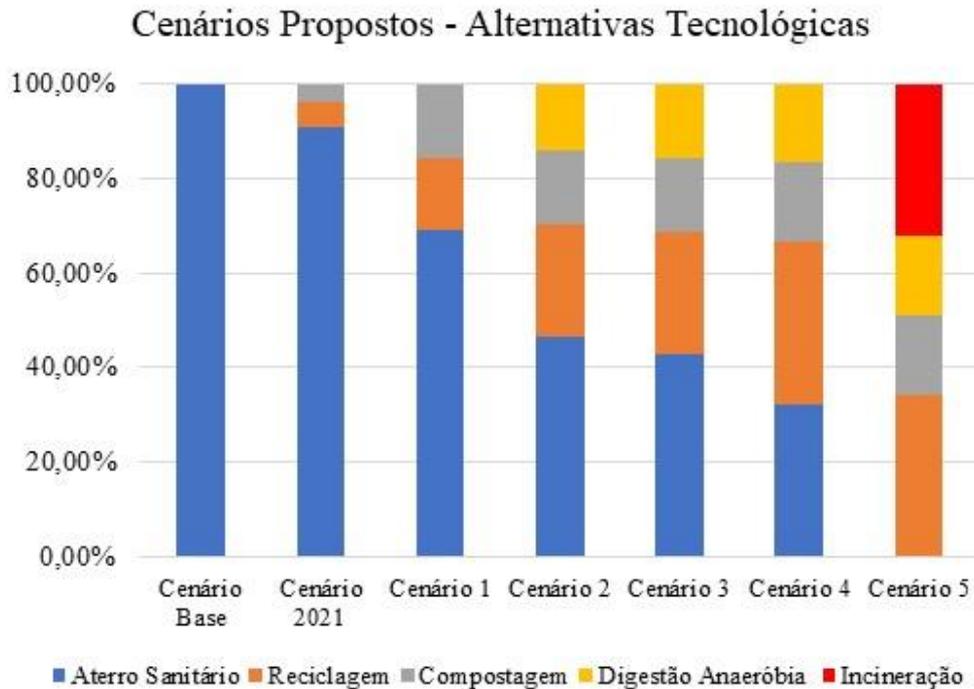
Fonte: Elaborado pelo Autor.

A Figura 19 permite visualizar a gradativa redução do encaminhamento dos resíduos ao aterro sanitário, partindo de 100% do cenário base até 0% no cenário

⁴ A aplicação da alternativa de redução na fonte demanda de políticas públicas e ações de educação ambiental junto à população. Como os resultados alcançados são imensuráveis, de difícil estimativa, esta alternativa não foi contemplada neste estudo.

5, incorporando-se gradativamente as alternativas de reciclagem, compostagem, digestão anaeróbia e incineração.

Figura 19 - Características de cada cenário proposto.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Observa-se que o percentual de resíduos orgânicos encaminhados para os tratamentos através de compostagem e digestão anaeróbia deve respeitar o limite percentual da composição gravimétrica destes resíduos, já que estas alternativas permitem apenas o tratamento da fração orgânica.

3.2 Análise da emissão de GEE por meio de simulação computacional

O software WARM utiliza métodos teóricos e analíticos baseados no ciclo de vida para quantificar e permitir a comparação entre a produção de gases de efeito estufa em cenários diferentes de disposição final dos resíduos, confrontando com processos de recuperação, calculando as diferenças de emissões entre os cenários definidos.

Este software foi desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América (EPA), para auxiliar organizações e gestores de sistemas de gerenciamento de resíduos sólidos a reportarem reduções de emissões de GEE, bem como reduções em termos de energia e impacto econômico entre seis

alternativas: redução na fonte, reciclagem, compostagem, digestão anaeróbia, incineração e aterro sanitário (EPA, 2020).

O modelo possui ampla base de dados contendo a ACV dos diversos resíduos que compõe os RSU e considera o balanço de massa de gases de efeito estufa em termos de emissão de dióxido de carbono equivalente expresso em toneladas, para cada cenário proposto, considerando as emissões desde a exploração dos recursos naturais, emissões provocadas para realizar a manufatura dos produtos, transportes, consumos energéticos e síntese de carbono nos processos de destinação final.

A metodologia de cálculo para a comparação entre cada cenário utiliza o balanço de massa entre as alternativas, ou seja, a diferença entre a emissão da alternativa proposta em cada cenário em comparação com a emissão que cada resíduo teria com o cenário base – o qual considera o encaminhamento de todos os resíduos ao aterro sanitário.

A equação geral para cada cenário é a seguinte:

$$\textit{Emissão Geral de GEE} = \textit{Emissão de GEE do Cenário Base} - (\textit{Aumento de estoque de carbono} + \textit{Emissão Evitada de GEE})$$

Após a inserção do cenário base e dos 5 cenários propostos, foi realizada a simulação computacional, obtendo-se, em termos de toneladas métricas equivalentes - $\text{TMCO}_{2\text{eq}}$, quanto representa, quantitativamente, cada um deles em relação à emissão de GEE. Com isso foi realizado o comparativo entre os cenários, onde foi obtida qual a configuração mais benéfica visando a redução de emissão de GEE, assim como quais os benefícios de cada uma das alternativas de tratamento mais contribuem para a redução desta emissão.

Para iniciar a modelagem é necessário informar algumas variáveis, que são basicamente as características do sistema de gestão do município em estudo e dos tratamentos propostos, como distância do centro logístico e condições de operação do aterro sanitário utilizado. As variáveis são informadas na fase anterior à modelagem, calibrando o sistema, sendo as variáveis descritas nos itens a seguir.

A entrada de valores no software consiste no lançamento da quantidade de resíduos coletados por tipo de material, separados em 60 materiais, produtos e categorias mistas (plásticos, metais, papéis, orgânicos, por exemplo).

O quantitativo de RSU considerado foi o total coletado no município de Florianópolis, com dados fornecidos pela COMCAP/SMMA, o qual possui dados históricos das coletas convencional, seletiva, de resíduos orgânicos, de rejeitos, etc. Também foi possível a segregação dos valores em termos das diferentes categorias de materiais para entrada no software, já que o município realizou em 2017 a caracterização dos resíduos produzidos em Florianópolis, sendo possível informar a porcentagem de cada categoria de resíduo.

3.2.1 Distância do centro logístico de operação

Deve ser considerada a distância do centro logístico de operação - no caso de Florianópolis trata-se do Centro de Valorização de Resíduos (CVR) da COMCAP, localizado no bairro Itacorubi até o local onde estão as instalações de tratamentos atuais e propostos (aterro sanitário, incineração, reciclagem, compostagem e digestão anaeróbia), para que sejam calculados os impactos com o transporte dos resíduos para as diferentes alternativas.

No município de Florianópolis todos os RSU coletados passam pelo CVR, onde são pesados em balança tipo rodoviária e lançadas as informações em software de controle para armazenamento em banco de dados próprio. Desta maneira, todas as distâncias consideradas para o destino final dos resíduos são medidas a partir deste local.

O aterro sanitário utilizado para destinar todos rejeitos está localizado no município de Biguaçu, distante 49,6 km do CVR da COMCAP, valor este informado como dado de entrada no software. Esta mesma distância foi considerada para uma eventual planta de incineração para a modelagem dos cenários que possuem esta alternativa.

A distância para a reciclagem foi estimada em 160 quilômetros – distância aproximada até o polo industrial localizado no planalto norte do estado de Santa Catarina. É importante considerar que a localização das indústrias de reciclagem varia conforme o tipo de resíduo que está sendo encaminhado, dependendo também da situação do mercado. Desta forma, dependendo do resíduo e do comprador, esta distância pode variar significativamente.

A título de exemplo, atualmente os vidros são destinados a indústrias nos estados do Paraná e de São Paulo principalmente. Já o papelão é processado no município de Palhoça, e sucatas metálicas e plásticos são encaminhados para

indústrias de beneficiamento no planalto norte, como Jaraguá do Sul, Joinville e Indaial. Portanto, foi estabelecida a distância média de 160 quilômetros para fins de modelagem do sistema de reciclagem.

A localização do tratamento por compostagem e digestão anaeróbia foi definida como sendo no próprio CVR da COMCAP, onde atualmente já existe o tratamento por compostagem e onde será proposta a instalação da planta de digestão anaeróbia e, desta forma, a distância informada foi zero.

3.2.2 Características do Aterro Sanitário

O modelo considera 3 principais características do aterro sanitário que influenciam na emissão de GEE desta instalação, sendo eles:

- Controle do gás metano: Existem as opções com e sem queima por *flare* do gás metano. No caso em estudo, o aterro sanitário possui este controle por queima sem reaproveitamento de energia;

- Eficiência de recuperação do gás do aterro sanitário: É possível informar no software se a eficiência de coleta do gás do aterro sanitário, o lançamento como: baixa eficiência, média eficiência e alta eficiência. Como esta é uma variável de difícil obtenção na prática, foi adotada eficiência moderada, caso que considera a eficiência ao longo dos anos: (anos 01-1: 0%, anos 2-4: 50%, anos 5-14: 75%, anos 15 até 1 ano antes do encerramento: 82,5%; após o encerramento: 90%);

- Condições de umidade e taxa de decaimento: Como há variações em termos da umidade e mudança ao longo dos anos de operação essas são classificadas em função da precipitação do local onde está inserido o aterro sanitário: Seco (menos de 508 mm/ano); Moderado (entre 508 e 1016 mm/ano); Úmido (mais de 1016 mm/ano); Biorreator (é adicionado água para se atingir alto grau de umidade para acelerar a decomposição da matéria orgânica). Como no município de Biguaçu a precipitação anual varia entre 1.300-1.700mm (EPAGRI, 2020), o aterro foi classificado como úmido.

3.2.3 Características do Digestor Anaeróbio

É possível classificar o tipo de digestor anaeróbio como sendo por digestão seca ou digestão úmida. No caso de digestão úmida, o software não apresenta valores para determinados tipos de orgânicos (como podas, gramas e folhas por exemplo). Desta forma foi proposta a instalação de digestor anaeróbio por digestão

seca.

Também é possível estabelecer se haverá cura ou não do composto resultante antes da aplicação no solo. Quando há a cura, o composto é desidratado, sendo esse líquido devolvido ao digestor. Foi proposta a utilização de digestor anaeróbio com cura do composto.

3.2.4 Distância do centro de reciclagem

Foi definida a distância média, para fins de modelagem no sistema, de 160 quilômetros entre o centro logístico da coleta de recicláveis secos e a indústria de reciclagem. Como cada material é encaminhado à uma usina de reciclagem distinta, com localizações diferentes, foi estipulada esta distância, sendo equivalente à distância entre o centro de valorização de resíduos em Florianópolis e o polo industrial do planalto norte de Santa Catarina, região com diversas indústrias que potencialmente reintroduzem recicláveis como matérias primas no processo produtivo.

3.2.5 Quadro resumo das variáveis

Após avaliação do sistema de gestão atual e proposto, foram lançadas as variáveis, conforme a Tabela 9.

Tabela 9 – Quadro resumo das variáveis informadas no software

Característica	Variável
Distância Aterro Sanitário	49,6 km
Distância Planta de Incineração	49,6 km
Distância Industria de Reciclagem	160 km
Distância pátio de Compostagem	0 km
Distância planta de digestão anaeróbia	0 km
Tratamento do gás do aterro sanitário	Queima com flare
Eficiência de coleta do gás do aterro sanitário	Moderada
Condições de umidade e taxa de decaimento	Úmido (k=0.06)
Tipo de digestor anaeróbio	Digestão seca
Tipo de cura do digestor anaeróbio	Com cura

Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.3 Determinação da influência dos gases de efeito estufa na variação dos elementos meteorológicos.

Diante dos dados obtidos de GEE, buscou-se relacionar a redução de emissão de GEE dos cenários propostos com a influência desta sobre os elementos meteorológicos, de forma a avaliar qual o impacto desta redução e consequente

mudança de concentração de CO₂ na atmosfera.

A equação utilizada para relacionar as diferenças de emissões com o aumento de temperatura e, conseqüentemente, com os impactos nos demais elementos meteorológicos, foi a equação de Ellis (2013):

$$\Delta T = 1.66 \ln (C/C_0) \text{ onde:}$$

- ΔT é a variação da temperatura global;
- C é a concentração final de CO₂; que será utilizada para estimar o aumento da temperatura;
- C_0 é a concentração inicial de CO₂.

O autor demonstra que uma duplicação instantânea da concentração de CO₂ aumenta a opacidade da atmosfera à radiação de calor, reduzindo sua reflexão para o espaço em aproximadamente 4 Watts/m². Desta forma, para se obter o aumento da temperatura em função da alteração de concentração da concentração de CO₂, é necessário calcular qual a temperatura que representaria o aquecimento da atmosfera da Terra para irradiar uma energia extra de 4 Watts/m² para restaurar o balanço de energia. Aplicando na equação a duplicação de concentração de CO₂, ou seja, $C = 2C_0$, obtém-se que quando a concentração de gás carbônico dobra, há um aumento na temperatura de 1,2°C.

Esta equação representa a variação de temperatura (ΔT) quando a concentração de CO₂ parte de C_0 para C , em partes por milhão (ppm).

Por meio desta mesma metodologia, pesquisadores da University Corporation for Atmospheric Research (UCAR) desenvolveram o *Very Simple Climate Model*, ou na tradução literal, Modelo Climático Muito Simples.

Nesse modelo a temperatura global média é determinada inteiramente pela concentração de dióxido de carbono atmosférico por meio do aquecimento da atmosfera com efeito de estufa e da absorção de dióxido de carbono pelo oceano e pela biosfera, que são mantidos constantes ao longo do tempo. Os impactos das mudanças na biosfera (como mudanças no uso da terra), mudanças nas nuvens e no clima, outros gases de efeito estufa e outros fatores não são considerados por este modelo.

A equação apresentada por este modelo é a seguinte:

$$T = T_0 + S \log_2\left(\frac{C}{C_0}\right), \text{ onde:}$$

- T é a temperatura a ser calculada em função do acréscimo de concentração de CO₂;
- T₀ é a temperatura de referência (temperatura anterior à avaliada);
- S é a sensibilidade climática (resultado do aumento de temperatura como resultado do aumento em dobro de CO₂);
- C é a nova concentração de CO₂ que será utilizada para estimar o aumento da temperatura;
- C₀ é a concentração de CO₂ inicial – no mesmo período da temperatura inicial (T₀).

Considera-se, nesse estudo, que cerca de 55% das emissões são absorvidas pelo oceano e pela biosfera, o que significa que apenas 45% das emissões de GEE acabam efetivamente aumentando a concentração da atmosfera. Cada 2,3 GtC das emissões que acabam na atmosfera aumentaria a concentração de CO₂ atmosférico em cerca de 1 ppm com base em estimativas da quantidade total de CO₂ na atmosfera (em gigatoneladas, abreviado GtC) e da concentração de CO₂.

A partir dos resultados obtidos nas modelagens, adotou-se estas duas metodologias apresentadas para realizar a projeção até o ano de 2100 de modo a analisar qual o impacto que a adoção do melhor cenário proposto teria na alteração da temperatura.

Para tanto foi considerada a evolução de alteração de concentração de CO₂ na atmosfera no período compreendido entre os anos de 1960 a 2020 (dados históricos do IPCC, 2020), estabelecendo, para fins de cálculo a premissa de que a partir de 2020 o aumento de concentração da atmosfera terrestre seguiria a tendência deste período, tendo a partir daí apenas a influência das reduções dos respectivos cenários de valorização dos RSU propostos.

Além disto, como o modelo climático utilizado é em escala global, extrapolou-se a quantidade de GEE reduzidos em Florianópolis utilizando como base comparativa a proporção em comparação à população mundial, ou seja, estimou-

se quanto a temperatura em nível global seria afetada com a aplicação dos cenários em nível mundial.

3.4 Publicação de informações relacionadas às emissões de GEE e RSU ao público em geral.

A partir da modelagem realizada foi possível desenvolver um software baseado na ferramenta PowerBI com base no banco de dados da Autarquia COMCAP, intitulado de 'Residuômetro', de modo a permitir a visualização por profissionais da área e público em geral de, além das informações sobre a geração de resíduos convencionais, seletivos e orgânicos no município de Florianópolis, do quantitativo de redução de emissões de GEE que as ações de valorização de RSU estão resultando. Os resultados e detalhes do produto desenvolvido será apresentado adiante, no item 4.7.

Destaca-se que a metodologia desenvolvida neste trabalho pode ser caracterizada como um inventário de emissões resultantes dos RSU atualizado automaticamente, podendo inclusive ser replicado a outros municípios.

Segundo enfatiza a Confederação Nacional de Municípios, "fazer um inventário de emissões é um trabalho caro e dispendioso, que demanda recursos técnicos e financeiros que muitas vezes os municípios não possuem. Por isso, menos de 5% das cidades brasileiras já realizaram um inventário para pelo menos um ano. É o poder local que regula vários elementos que implicam nas emissões de gases de efeito estufa, como por exemplo, a implementação de restrições ambientais, a definição e implantação de áreas verdes, a realização de licenciamento ambiental local, transporte e mobilidade urbana, planejamento territorial, critérios da construção civil, gestão de resíduos sólidos, serviços públicos de energia e estímulos para os diferentes setores da economia."

Após a finalização deste trabalho e desenvolvimento do software, o produto foi disponibilizado à Prefeitura Municipal de Florianópolis, a qual disponibilizou em sua página oficial publicando os resultados em tempo real.

A partir da aplicação da metodologia apresentada, foram realizadas as modelagens dos cenários, as quais serão apresentados a seguir, realizando

comparativo entre estes, e avaliando as emissões por tipo de tratamento, por tipo de resíduo, por tipo de gases e recursos, por tipo de processo e a influência dos cenários nos elementos meteorológicos.

4 RESULTADOS

Após o estabelecimento de cenários e a devida organização dos dados foi possível realizar a modelagem no software WARM, o qual forneceu resultados referente à redução de emissão de GEE de acordo com um ou mais itens a seguir (adaptado de EPA, 2019):

- Consumo de energia (especialmente do consumo de combustíveis fósseis) e emissões associadas com a extração de matérias primas, fabricação, transporte, uso e destino final dos RSU;

- Emissões não relacionadas a energia, como o dióxido de carbono (CO_2) emitido quando o calcário (CaCO_3) usado para fabricação de aço é convertido à cal (CaO) ou os perfluorocarbonetos (PFCs) gerados no processo de fundição do alumínio, por exemplo;

- Emissões de metano (CH_4) oriundo da decomposição de matéria orgânica em aterros sanitários;

- Dióxido de carbono (CO_2) e óxido nitroso (N_2O) emitidos pela combustão dos RSU;

- Sequestro e armazenamento de carbono, ocorridos em processos naturais e antrópicos, os quais removem carbono da atmosfera e armazenam por longos períodos ou permanentemente;

- Redução da exploração do estoque de carbono em florestas e em solos devido utilização de fontes alternativas à exploração de matérias primas, como a reciclagem e a síntese de carbono em solos decorrentes da utilização de composto orgânico resultante de compostagem e digestão anaeróbia;

- Redução e reutilização de gases provenientes do fim do ciclo de vida dos resíduos, como geração de energia com CH_4 da digestão anaeróbia, conversão do CH_4 em CO_2 nos queimadores de gases do aterro sanitário, dentre outros;

A depender das alternativas escolhidas em cada cenário, ocorre variação das emissões positivas (exploração de matérias primas, fabricação, e sequestro de carbono) e das emissões negativas (reciclagem, compostagem, combustão,

digestão anaeróbia e aterro sanitário), sendo que para cada tipo de RSU existe um diferente ciclo de vida, e conseqüentemente haverá conseqüências quando da mudança de tecnologia utilizada.

A Tabela 10 mostra os tipos de resíduos e as respectivas quantidades produzidas no município de Florianópolis no ano de 2021 e que foram inseridas como variáveis no software WARM a fim de simular as emissões de gases de efeito estufa, bem como sua influência no aumento da temperatura global.

Tabela 10 – Quadro resumo das variáveis informadas no software WARM.

Resíduo/Tipo de Coleta	Quantidade (toneladas)
Rejeitos	
Coleta convencional porta a porta	161.838,53
Remoção	3.122,74
Caixa Brooks	3.563,26
Roll-On Roll-Off	12.049,32
CVR	5.928,33
Rejeitos galpões de triagem	2.204,59
Total - Rejeitos	188.706,77
Recicláveis secos	
Coleta seletiva - porta a porta	6.473,09
Coleta seletiva - PEVs – Vidro	1.653,83
Ecopontos – Recicláveis secos	945,49
Ecopontos – Vidros	457,08
Doação recicláveis	451,38
CVR - Reciclagem Madeira	593,90
CVR - Reciclagem Metal	131,10
CVR – Reciclagem Pneus	37,16
CVR – Reciclagem Eletrônicos	37,98
Total – Recicláveis secos	11.233,67
Orgânicos	
Podas	5.391,20
Resto de Alimentos	2.183,67
Total – Orgânicos	7.574,87

Fonte: Adaptado de COMCAP, 2021.

Os resultados são apresentados nos subitens a seguir, separados entre: comparativo entre os cenários; emissões por tipo de tratamento; emissões por tipo de resíduo; emissões por tipo de gases e recursos; emissões por tipo de impacto/saída; e influência nos elementos meteorológicos. A discussão dos resultados será apresentada no item 5.

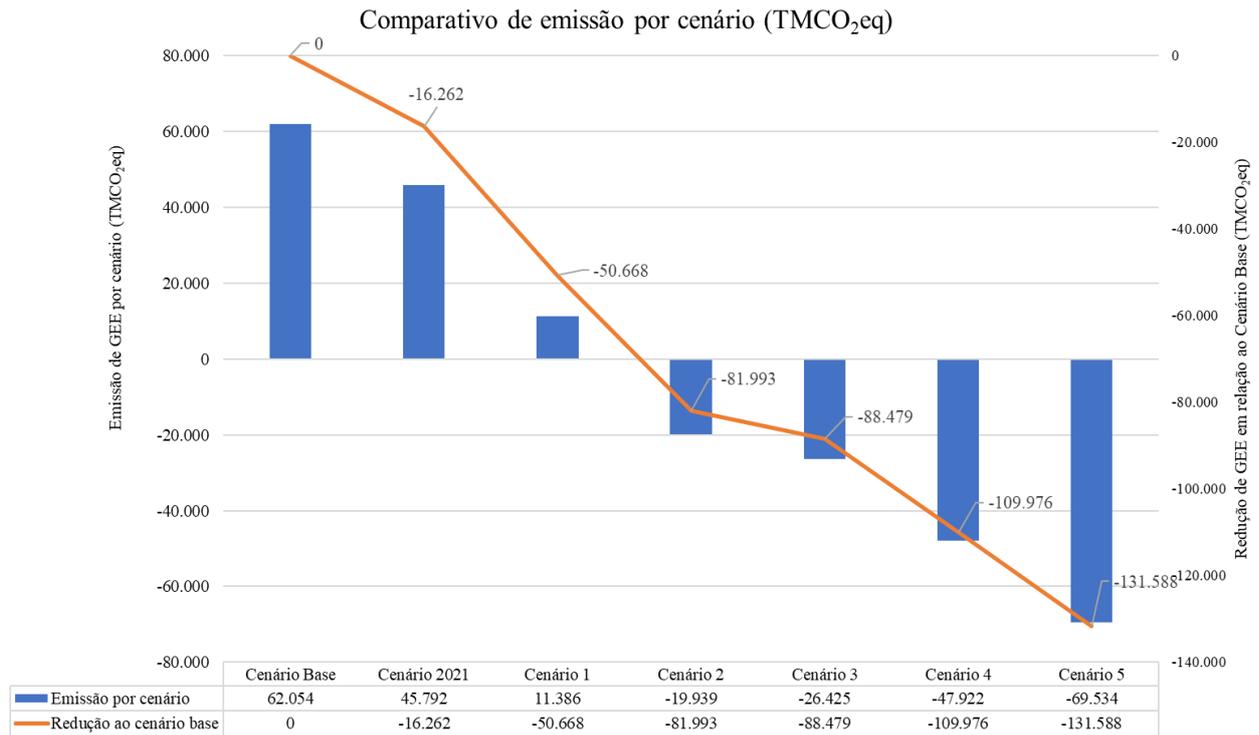
Valores negativos de emissão de GEE significam a síntese de carbono pela alternativa proposta, ou seja, processos que resultam em valores negativos de

MTCO₂eq, significam que, após realizado o balanço energético, há síntese de carbono ao invés de emissão quando comparados ao cenário base.

4.1 Comparativo entre os cenários

A Figura 20 apresenta o comparativo entre os cenários, bem como a redução de cada um deles a partir do comparativo com o cenário base.

Figura 20: Total de emissão de GEE dos cenários e redução em relação ao Cenário Base.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados demonstram uma redução gradativa na emissão de GEE à medida em que são incluídas novas alternativas de tratamento de RSU em substituição à destinação ao aterro sanitário.

A Tabela 11 apresenta os valores de emissão de GEE em termos de MTCO₂eq do cenário base e dos 5 cenários propostos. Nesta tabela são apresentados os cenários com a quantidade de resíduos encaminhados para cada tratamento proposto, com a respectiva quantidade de emissão de GEE. Também é apresentado o comparativo com o cenário base, demonstrando a diferença de emissão global com o cenário proposto.

O cenário 5 é a alternativa que se demonstra mais eficiente com uma redução potencial da ordem de 141.897 TMCO₂eq, seguido do cenário 4 com 109.976 TMCO₂eq.

Tabela 11 – Comparativo entre a emissão de GEE dos cenários

Destino Final dos RSU	Cenário Base			Cenário 2021			Cenário 1			Cenário 2			Cenário 3			Cenário 4			Cenário 5		
	Quantidade de RSU (ton)		Emissão de GEE	Quantidade de RSU (ton)		Emissão de GEE	Quantidade de RSU (ton)		Emissão de GEE	Quantidade de RSU (ton)		Emissão de GEE	Quantidade de RSU (ton)		Emissão de GEE	Quantidade de RSU (ton)		Emissão de GEE	Quantidade de RSU (ton)		Emissão de GEE
	%	Peso (ton)	TMCO ₂ eq	%	Peso (ton)	TMCO ₂ eq	%	Peso (ton)	TMCO ₂ eq	%	Peso (ton)	TMCO ₂ eq	%	Peso (ton)	TMCO ₂ eq	%	Peso (ton)	TMCO ₂ eq	%	Peso (ton)	TMCO ₂ eq
Aterro Sanitário	100,00%	207.515	62.054	90,94%	188.714	60.784	68,90%	142.976	48.173	46,60%	96.702	36.651	42,70%	88.609	35.041	32,35%	67.131	32.437	0%	0	10.308 ⁵
Reciclagem				5,11%	11.227	-14.368	15,35%	31.856	-33.188	23,65%	49.077	-51.111	25,80%	53.539	-55.752	34,40%	71.385	-74.326	34,40%	71.385	-74.326
Compostagem				3,65%	7.574	-624	15,75%	32.684	-3.599	15,75%	32.684	-3.599	15,75%	32.684	-3.599	16,63%	34.510	-3.801	16,63%	34.510	-3.801
Digestão Anaeróbia										14,00%	29.052	-1.879	15,75%	32.684	-2.114	16,63%	34.510	-2.232	16,63%	34.510	-2.232
Incineração																			32,35%	67.110	516
Emissão de (TMCO₂eq)			62.054			45.792			11.386			-19.939			-26.425			-47.922			-69.534
Redução de emissão em relação ao cenário base (TMCO₂eq)						-16.262			-50.668			-81.993			-88.479			-109.976			-131.588

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 12 e a Figura 21 apresentam a evolução, em porcentagem do quanto representaria em termos de eficiência de cada cenário em relação ao cenário base. Observa-se que as ações voltadas à valorização de resíduos pelo município de Florianópolis atualmente (cenário 2021), reduzem 16.262 TOMCO₂eq, o que representa uma eficiência de 26% quando comparado ao cenário base - encaminhamento de todos os resíduos ao aterro sanitário.

Já na eventualidade de implementação dos cenários propostos haveria um incremento de 82%, 132%, 143%, 177% e 229%, observando os ganhos em reduções de emissões dos cenários 1 ao 5, sucessivamente.

⁵ Embora não seja previsto o encaminhamento direto de nenhum RSU ao aterro sanitário, este valor se refere à sobra de cinzas oriundas do processo de incineração com geração de energia.

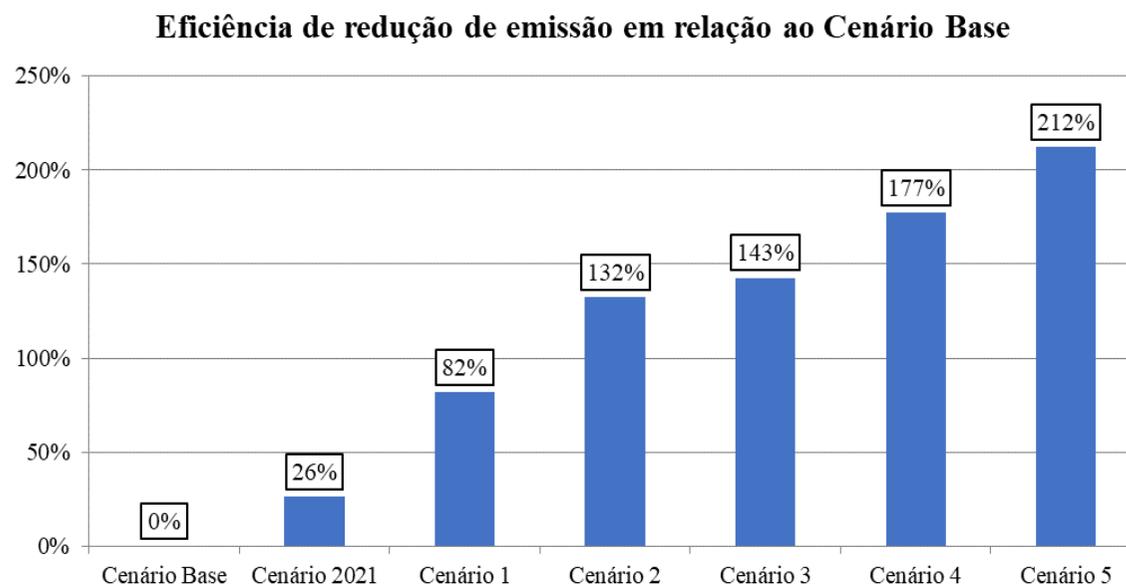
Com a finalidade de se estabelecer, de maneira quantitativa, qual a representatividade da aplicação de cada cenário em relação ao cenário base, fez-se o comparativo desta redução de emissão de GEE, representando a eficiência de aplicação de cada um deles, com apresentação dos valores apresentados na Tabela 12 e na Figura 21.

Tabela 12 – Eficiência de cada cenário em relação ao cenário base

Cenário	Emissão em MTCO ₂ eq	Redução em relação ao cenário base em MTCO ₂ eq	Eficiência em relação ao cenário base
Cenário Base	62.054	0,00	0%
Cenário 2021	45.792	-16.262	26%
Cenário 1	11.386	-50.668	82%
Cenário 2	-19.939	-81.993	132%
Cenário 3	-26.425	-88.479	143%
Cenário 4	-47.922	-109.976	177%
Cenário 5	-69.534	-131.588	229%

Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 21: Eficiência de redução em relação ao cenário base



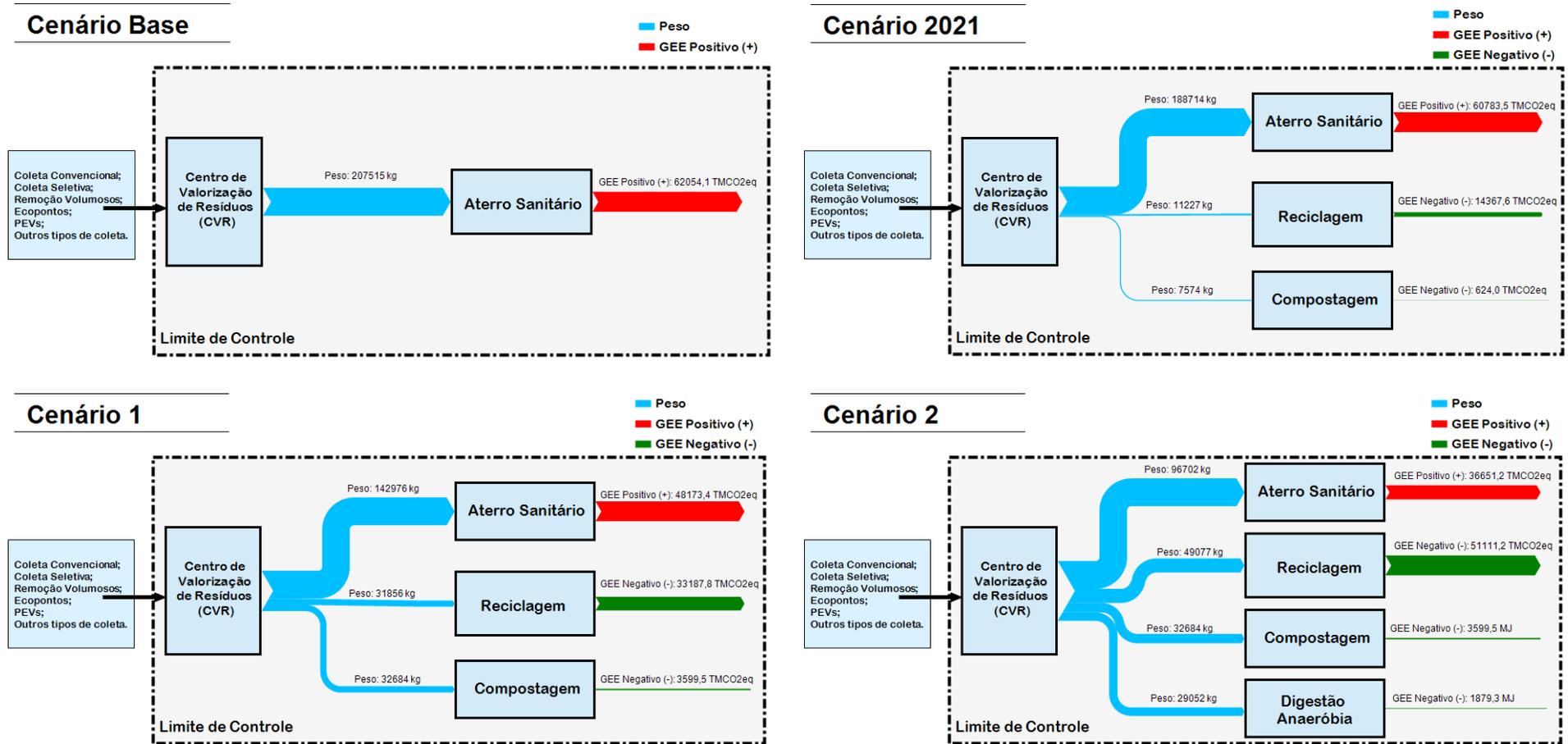
Fonte: Elaborado pelo Autor.

As Figuras 21 e 22 demonstram os fluxos de massa e emissão de cada cenário, representados por meio dos respectivos diagramas de Sankey, facilitando a visualização dos fluxos e interpretação dos resultados. Neste trabalho o fluxo envolve a transferência de emissões de GEE a partir da entrada de uma massa (peso dos RSU) em diferentes processos (alternativas de tratamento dos RSU). As emissões são representadas por setas cujas espessuras são proporcionais a quantidade de GEE sendo emitidas por cada alternativa.

Os diagramas permitem, por meio da comparação visual entre as setas vermelhas (emissões positivas de GEE) e verdes (emissões negativas de GEE) a evolução da redução de emissão a cada alternativa em que são propostas em contraste ao aterro sanitário.

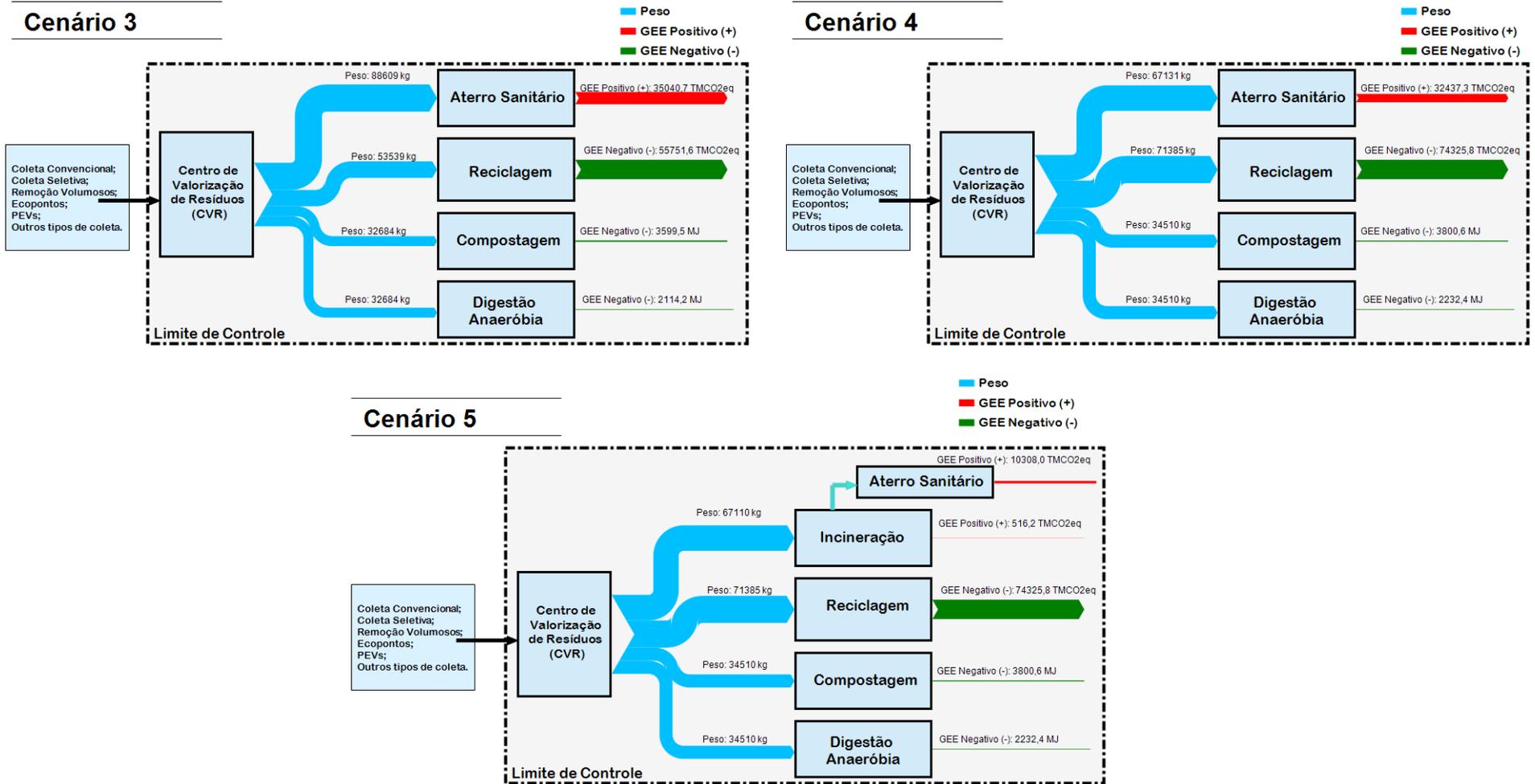
Importante ressaltar que, conforme já mencionado na Metodologia e representado nos diagramas de Sankey, o limite de controle do processo contempla as etapas posteriores à coleta dos RSU, considerando as emissões dos encaminhamentos aos destinos finais e tratamentos propostos.

Figura 22 - Diagrama de Sankey para o Cenário Base, Cenário 2021, Cenário 1 e Cenário 2



Fonte: Elaborado pelo autor.

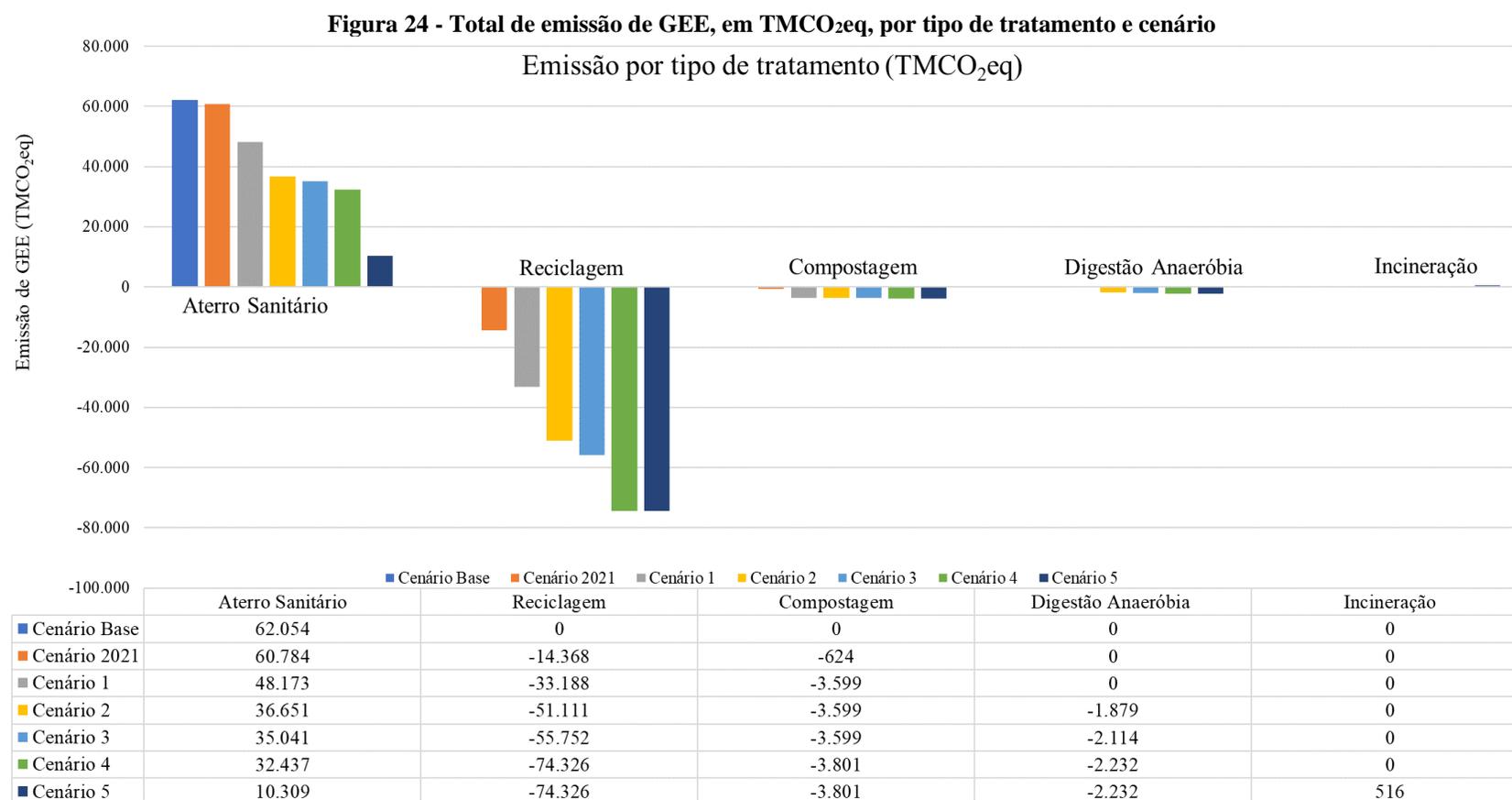
Figura 23 - Diagrama de Sankey para o Cenário 3, Cenário 4 e Cenário 5



4.2 Emissões por tipo de tratamento

Na Figura 24 é apresentado o comparativo entre as emissões resultantes para cada tipo de tratamento para os cenários propostos. Os valores de emissão de cada tipo de tratamento representam o quanto seria emitido em cada alternativa para cada cenário proposto.

Percebe-se que os valores de emissão mais significativos são referentes à reciclagem dos resíduos seguido das emissões do aterro sanitário. Embora os valores dos tratamentos de compostagem, digestão anaeróbia e de incineração não sejam tão expressivos, há de se considerar uma redução significativa em função do desvio do aterro sanitário.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 Emissões por tipo de resíduo

A Tabela 13 e a Figura 25 apresentam o total de emissão por tipo de resíduo em cada um dos cenários, ordenados a partir do resíduo com redução mais significativa, o papel misto, com redução de 90.921 TMC_{CO2}eq para o menos significativo - orgânico (podas) com emissão positiva de 2.410 TMC_{CO2}eq. Os valores em negrito representam a maior redução no comparativo entre eles, estando todos estes distribuídos nos cenários 4 e 5.

Tabela 13 - Emissão de GEE dos cenários por tipo de resíduo

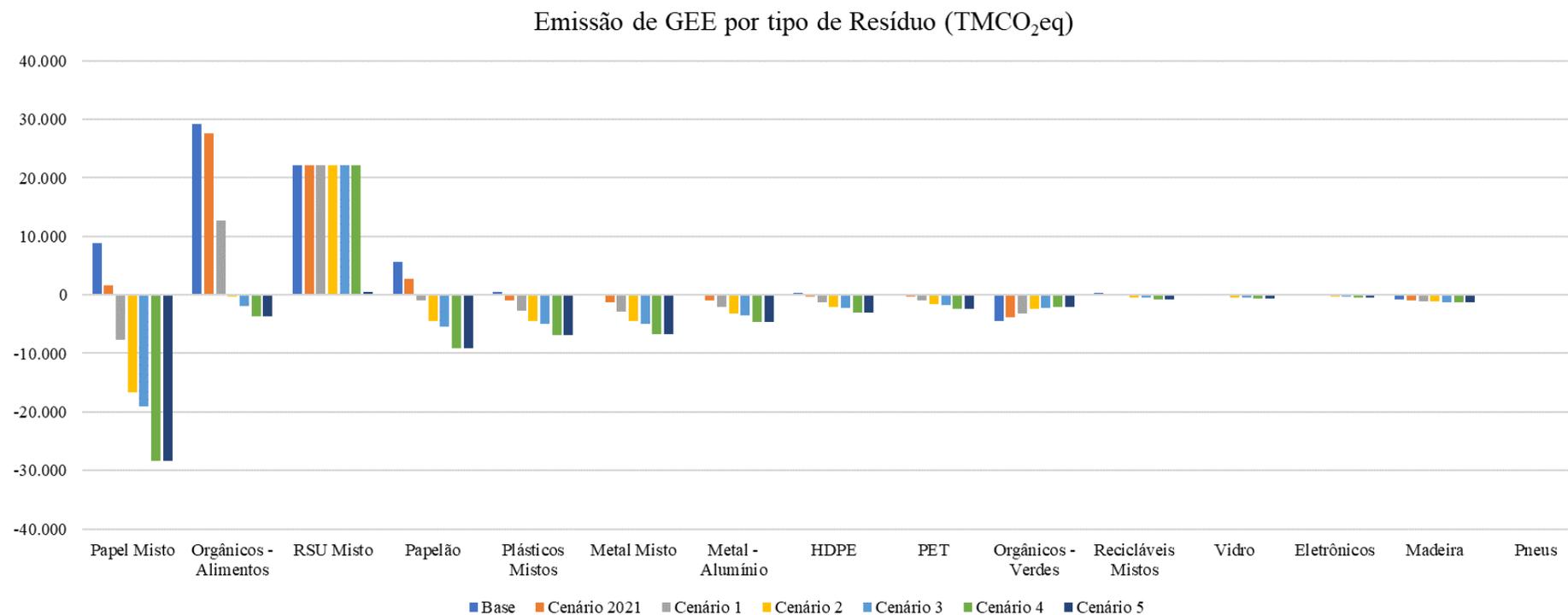
Tipo de Resíduo	Emissão de GEE por tipo de resíduo em TMC _{CO2} eq							
	Base	Cenário 2021	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Maior Variação
Papel Misto	8.841	1.681	-7.733	-16.698	-19.018	-28.305	-28.305	-37.147
Orgânicos - Alimentos	29.120	27.539	12.688	-258	-1.877	-3.609	-3.609	-32.729
RSU Misto	22.129	22.129	22.129	22.129	22.129	22.129	516	-21.612
Papelão	5.576	2.743	-981	-4.525	-5.445	-9.118	-9.118	-14.694
Plásticos Mistos	502	-906	-2.759	-4.522	-4.979	-6.807	-6.807	-7.308
Metal Misto	98	-1.204	-2.916	-4.544	-4.966	-6.656	-6.656	-6.754
Metal - Alumínio	33	-872	-2.050	-3.183	-3.476	-4.645	-4.645	-4.678
HDPE	276	-361	-1.197	-1.993	-2.200	-3.025	-3.025	-3.301
PET	155	-332	-971	-1.580	-1.738	-2.369	-2.369	-2.524
Orgânicos - Verdes	-4.468	-3.769	-3.172	-2.359	-2.258	-2.134	-2.134	2.334
Recicláveis Mistos	395	167	-135	-420	-494	-792	-792	-1.187
Vidro	204	29	-201	-419	-476	-702	-702	-906
Eletrônicos	45	-62	-204	-338	-372	-511	-511	-556
Madeira	-851	-943	-1.065	-1.180	-1.209	-1.329	-1.329	-478
Pneus	0	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47
Total por cenário	62.054	45.792	11.386	-19.939	-26.425	-47.922	-69.534	

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 25 apresenta, da esquerda para a direita, os resíduos em ordem de maior representatividade nas emissões de GEE entre os cenários propostos. Observa-se que o resíduo que possui o maior potencial na redução de emissões é o papel misto, responsável por uma redução da ordem de 37.147 TMCO₂eq para o cenário 5. Resíduos Orgânicos (fração alimentos) e RSU mistos também se apresentaram com valores expressivos, seguidos da fração papelão. Os valores de RSU se apresentam constantes nos cenários 1 a 4, pois são considerados rejeitos nestes cenários e encaminhados ao aterro sanitário. No cenário 5 os rejeitos, em função de serem encaminhados para incineração para geração de energia, resultam em pouca geração de GEE devido ao do aproveitamento energético, que resulta em geração de energia elétrica, reduzindo o balanço de emissão quando comparado ao cenário base.

Na sequência, os plásticos mistos, metais mistos, alumínio, HDPE e PET aparecem com razoável contribuição. Os que apresentaram menor representatividade são os recicláveis mistos, vidros, eletrônicos, madeira, pneus e orgânicos (podas).

Figura 25 - Total de emissão de GEE, em TMCO₂eq, por tipo de resíduo e cenário



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4 Emissões por tipo de gases e de recursos

O quantitativo referente à emissão de diferentes gases – metano, dióxido de carbono, tetrafluorometano, hexafluoroetano, monóxido de dinitrogênio e outros gases, bem como pelo uso de recursos – estoque de carbono florestal, estoque de carbono no solo e estoque de carbono no aterro sanitário são apresentados na Tabela 14 e Figura 26. Em destaque os valores que representam a maior redução potencial de GEE entre os cenários. Os gases e recursos estão ordenados pelos valores que representam a maior variação em relação ao cenário base, conforme valores apresentados na última coluna.

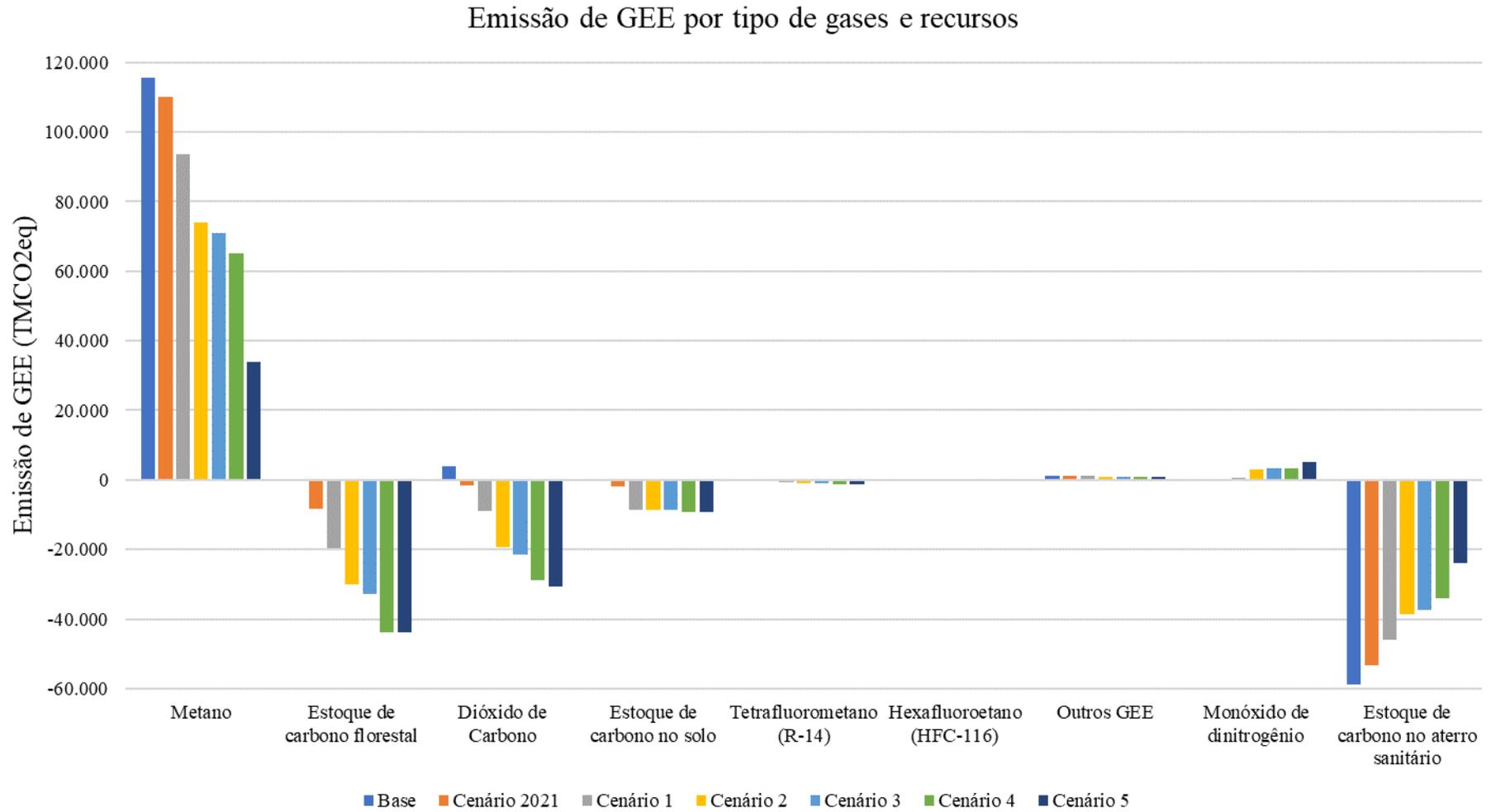
Os resultados mostram que o gás metano é o maior responsável pelas diferenças de emissão de GEE entre os cenários, seguido pelo estoque de carbono florestal e pelo dióxido de carbono, sendo os três principais tipo de gases e/ou recursos. Já o estoque de carbono no aterro sanitário representa um aumento de emissões a partir do cenário base. O cenário 5, apesar de não prever o encaminhamento de resíduos diretamente ao aterro sanitário, é previsto que após a incineração para geração de energia, as cinzas resultantes do processo serão encaminhadas, gerando estes valores apresentados na tabela 14 como estoque de carbono no aterro.

Tabela 14 - Emissão de GEE por tipo de gases e de recursos

Tipo de gás/fluxo	Emissão de GEE por tipo de gases e recursos em T _{MCO₂eq}							
	Base	Cenário 2021	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Maior Variação
Metano	115.743	110.159	93.653	74.047	71.045	65.001	33.927	-81.816
Estoque de carbono florestal	0	-8.422	-19.498	-30.040	-32.770	-43.696	-43.696	-43.696
Dióxido de Carbono	3.882	-1.519	-8.954	-19.404	-21.611	-28.840	-30.795	-34.677
Estoque de carbono no solo	0	-2.009	-8.670	-8.670	-8.670	-9.154	-9.154	-9.154
Tetrafluorometano (R-14)	0	-101	-638	-984	-1.073	-1.431	-1.431	-1.431
Hexafluoroetano (HFC-116)	0	-221	-106	-163	-178	-238	-238	-238
Outros GEE	1.164	1.109	1.040	945	942	992	836	-329
Monóxido de dinitrogênio	0	123	552	2.911	3.206	3.385	5.068	5.068
Estoque de carbono no aterro sanitário	-58.735	-53.326	-45.993	-38.581	-37.316	-33.939	-24.049	34.686
Total por cenário	62.054	45.792	11.386	-19.939	-26.425	-47.922	-69.534	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 26 - Gráfico comparativo de emissão por tipo de gases e recursos



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5 Emissões por tipo de processo

A Tabela 15 e Figura 27 apresentam, em ordem de representatividade, os processos que representam o maior potencial de redução de emissão de GEE entre os cenários.

Observa-se que os três processos que possuem maior representatividade são o sequestro de carbono florestal - na maior parte oriundos da reciclagem de papel e papelão, a redução na fonte proveniente da reciclagem dos resíduos secos e o aterramento - em decorrência da redução progressiva de encaminhamento de resíduos ao aterro sanitário.

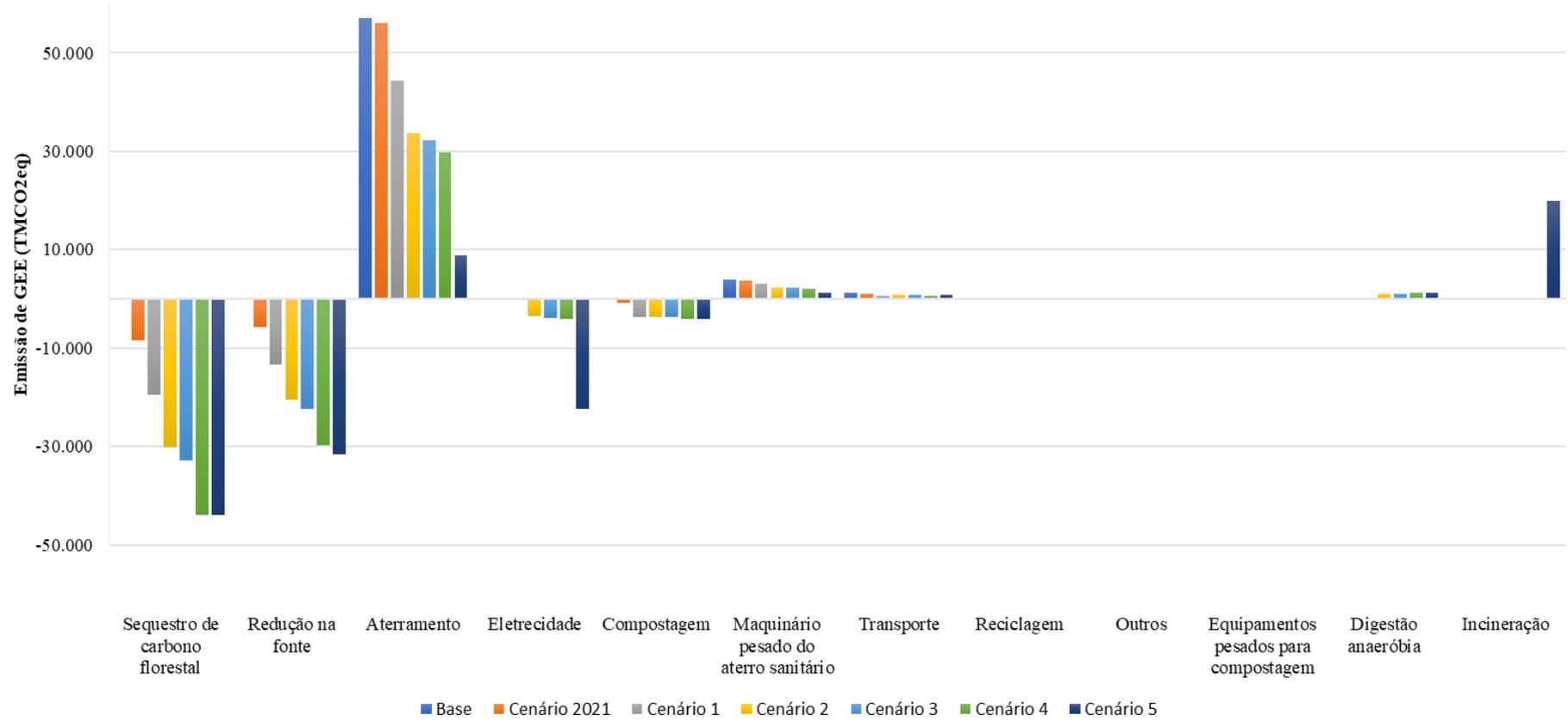
A geração de eletricidade, oriunda do tratamento via biodigestor e pelo processo de incineração, apesar de gerar emissão positiva, também representa uma notável redução da ordem de -22.270 TMCO₂eq no cenário 5, pois apesar de gerar quase a mesma quantidade pelo processo de incineração (19.930 TMCO₂eq), acaba eliminando os GEE produzidos pelo processo de aterramento – o que justifica o grande redução de GEE em comparação com o cenário base.

Tabela 15 - Emissão de GEE por tipo de processo

Tipo de Processo (impacto/saída)	Base	Cenário 2021	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Maior Variação
Sequestro de carbono florestal	0	-8.442	-19.544	-30.111	-32.847	-43.800	-43.800	-43.800
Redução na fonte	0	-5.742	-13.304	-20.491	-22.349	-29.811	-31.605	-31.605
Aterramento	57.008	55.975	44.265	33.635	32.161	29.839	8.761	-48.246
Eletricidade	0	0	0	-3.516	-3.956	-4.177	-22.270	-22.270
Compostagem	0	-721	-3.778	-3.778	-3.778	-3.990	-3.990	-3.990
Maquinário pesado do aterro sanitário	3.882	3.627	3.010	2.325	2.221	2.006	1.197	-2.685
Transporte	1.164	951	568	836	836	621	852	-543
Reciclagem	0	42	10	5	9	39	39	39
Outros	0	5	3	2	2	2	2	2
Equipamentos pesados para compostagem	0	97	156	179	179	189	189	189
Digestão anaeróbia	0	0	0	976	1.098	1.159	1.159	1.159
Incineração	0	0	0	0	0	0	19.930	19.930
Total por cenário	62.054	45.792	11.386	-19.939	-26.425	-47.922	-69.534	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 27 - Gráfico comparativo de emissão por tipo de processo
Emissão de GEE por tipo de Processo



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.6 Influência nos elementos meteorológicos

A partir dos resultados dos cenários obtidos na modelagem, foram aplicados os cálculos apresentados na Metodologia - métodos UCAR e ELIS a fim de estimar a mudança de temperaturas nos cenários propostos.

Como as equações são aplicáveis à variação global de temperatura e o objeto deste estudo é o município de Florianópolis, para que fosse possível realizar uma estimativa de quanto seria a influência das emissões, extrapolou-se os resultados proporcionalmente à população global, ou seja, para fins de cálculo foi adotada a premissa de que as progressivas reduções de GEE fossem obtidas globalmente, e não apenas no respectivo Município, definindo um fator de multiplicação a ser aplicado em cada cenário obtido, conforme mostra a Tabela 16.

Tabela 16 – Fator de multiplicação em função da população

População / Fator de Multiplicação	População	Fonte
População Florianópolis - 2020	500.973	IBGE, 2021
População mundial – 2020	7.800.000.000	ONU, 2021
Proporção / fator de multiplicação	15.569	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a aplicação do fator de multiplicação, obtiveram-se os dados constantes na Tabela 18, a qual apresenta a redução global de cada cenário em ppm, considerando a parcela efetivamente aerotransportada para a atmosfera, conforme descrito no item Metodologia.

Tabela 17 – Redução global de GEE de cada cenário

Variável	Cenário 2021	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
Redução emissão Mundo por cenário (TMC _{2eq})	-253.196.975	-788.887.030	-1.276.604.188	-1.377.589.738	-1.712.288.183	-2.209.289.243
Redução % estimativa	-0,69%	-2,16%	-3,49%	-3,77%	-4,68%	-6,04%
Redução em gigatoneladas por ano (GTCO _{2eq})	-0,2532	-0,7889	-1,2766	-1,3776	-1,7123	-2,2093
Varição da concentração em ppm por ano	-0,0325	-0,1011	-0,1637	-0,1766	-0,2195	-0,2832
Redução de Emissão efetivamente aerotransportada para atmosfera (45% do total) em ppm	-0,0146	-0,0456	-0,0738	-0,0796	-0,0990	-0,1277

Fonte: Elaborado pelo Autor.

A partir destes valores, buscou-se obter a influência das emissões dos cenários propostos na variação da temperatura global, utilizando as equações apresentadas no item Metodologia – método UCAR e método ELIS, Robert, para o período compreendido entre os anos de 2020 e 2100.

Diante dos resultados é possível verificar um decaimento na linha de tendência a partir da aplicação dos cenários propostos, resultando em menores temperaturas ao longo dos anos.

Por meio da aplicação das equações destes dois métodos, considerando ano a ano a redução de cada cenário, com as diferenças de concentrações de CO₂ de cada cenário, obtém-se os dados apresentados na Tabela 18, os quais demonstram que a alternativa que se apresentou mais vantajosa em relação à redução de GEE – cenário 5 representa uma redução estimada da temperatura global entre 0,91 e 0,94°C (método UCAR e ELIS, respectivamente) em relação ao cenário base no ano de 2100.

Ou seja, considerando que a temperatura média global em 2020 é de 14,65°C (IPCC, 2021), e aplicando a metodologia explanada no item 3.3, obtém-se a temperatura estimada para o ano de 2121 de 16,11°C no cenário base, considerando nulas as reduções de emissões de GEE através da valorização dos RSU e as demais emissões globais seguindo a linha de tendência atual. Já, considerando as reduções do cenário 5, a temperatura estimada para o ano de 2121, ou seja, a estimativa para os próximos 100 anos, é de 15,20°C e 15,17°C (método UCAR e ELIS, respectivamente).

2044	15,05	14,81	14,80	14,80	14,80	14,80	14,80	14,80	14,80	14,80	14,79	14,79	14,79
2045	15,06	14,81	14,81	14,81	14,81	14,81	14,80	14,81	14,80	14,80	14,80	14,80	14,80
2046	15,08	14,82	14,82	14,81	14,81	14,81	14,81	14,81	14,81	14,81	14,81	14,80	14,80
2047	15,09	14,83	14,82	14,82	14,82	14,82	14,81	14,82	14,82	14,81	14,81	14,81	14,81
2048	15,11	14,83	14,83	14,83	14,82	14,82	14,82	14,82	14,82	14,82	14,82	14,82	14,81
2049	15,12	14,84	14,83	14,83	14,83	14,83	14,83	14,83	14,83	14,82	14,82	14,82	14,82
2050	15,14	14,84	14,84	14,84	14,84	14,83	14,83	14,84	14,83	14,83	14,83	14,83	14,82
2051	15,15	14,85	14,85	14,84	14,84	14,84	14,84	14,84	14,84	14,84	14,83	14,83	14,83
2052	15,17	14,86	14,85	14,85	14,85	14,85	14,84	14,85	14,84	14,84	14,84	14,84	14,83
2053	15,18	14,86	14,86	14,85	14,85	14,85	14,85	14,85	14,85	14,85	14,85	14,84	14,84
2054	15,20	14,87	14,86	14,86	14,86	14,86	14,85	14,86	14,86	14,85	14,85	14,85	14,85
2055	15,22	14,87	14,87	14,87	14,87	14,86	14,86	14,86	14,86	14,86	14,86	14,85	14,85
2056	15,23	14,88	14,88	14,87	14,87	14,87	14,87	14,87	14,87	14,86	14,86	14,86	14,86
2057	15,25	14,89	14,88	14,88	14,88	14,87	14,87	14,88	14,87	14,87	14,87	14,87	14,86
2058	15,26	14,89	14,89	14,88	14,88	14,88	14,88	14,88	14,88	14,87	14,87	14,87	14,87
2059	15,28	14,90	14,89	14,89	14,89	14,89	14,88	14,89	14,88	14,88	14,88	14,88	14,87
2060	15,29	14,90	14,90	14,90	14,89	14,89	14,89	14,89	14,89	14,89	14,88	14,88	14,88
2061	15,31	14,91	14,91	14,90	14,90	14,90	14,89	14,90	14,89	14,89	14,89	14,89	14,88
2062	15,32	14,92	14,91	14,91	14,91	14,90	14,90	14,90	14,90	14,90	14,90	14,89	14,89
2063	15,33	14,92	14,92	14,91	14,91	14,91	14,90	14,91	14,91	14,90	14,90	14,90	14,89
2064	15,35	14,93	14,92	14,92	14,92	14,91	14,91	14,92	14,91	14,91	14,91	14,90	14,90
2065	15,36	14,93	14,93	14,92	14,92	14,92	14,92	14,92	14,92	14,91	14,91	14,91	14,90
2066	15,38	14,94	14,93	14,93	14,93	14,93	14,92	14,93	14,92	14,92	14,92	14,91	14,91
2067	15,39	14,94	14,94	14,93	14,93	14,93	14,93	14,93	14,93	14,92	14,92	14,92	14,91
2068	15,41	14,95	14,95	14,94	14,94	14,94	14,93	14,94	14,93	14,93	14,93	14,92	14,92
2069	15,42	14,96	14,95	14,95	14,95	14,94	14,94	14,94	14,94	14,93	14,93	14,93	14,92
2070	15,44	14,96	14,96	14,95	14,95	14,95	14,94	14,95	14,94	14,94	14,94	14,93	14,93
2071	15,45	14,97	14,96	14,96	14,96	14,95	14,95	14,95	14,95	14,94	14,94	14,94	14,94
2072	15,47	14,97	14,97	14,96	14,96	14,96	14,95	14,96	14,95	14,95	14,95	14,95	14,94

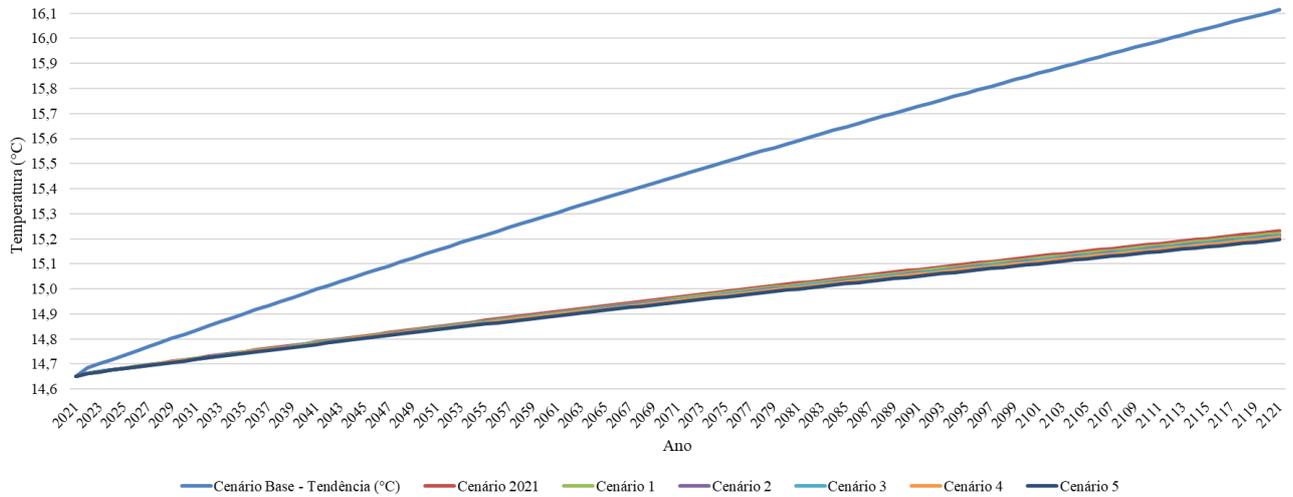
2073	15,48	14,98	14,97	14,97	14,97	14,96	14,96	14,97	14,96	14,96	14,95	14,95	14,95
2074	15,49	14,98	14,98	14,97	14,97	14,97	14,96	14,97	14,97	14,96	14,96	14,96	14,95
2075	15,51	14,99	14,98	14,98	14,98	14,97	14,97	14,98	14,97	14,97	14,96	14,96	14,96
2076	15,52	15,00	14,99	14,98	14,98	14,98	14,97	14,98	14,98	14,97	14,97	14,97	14,96
2077	15,54	15,00	15,00	14,99	14,99	14,98	14,98	14,99	14,98	14,98	14,97	14,97	14,97
2078	15,55	15,01	15,00	15,00	14,99	14,99	14,98	14,99	14,99	14,98	14,98	14,98	14,97
2079	15,56	15,01	15,01	15,00	15,00	15,00	14,99	15,00	14,99	14,99	14,99	14,98	14,98
2080	15,58	15,02	15,01	15,01	15,00	15,00	14,99	15,00	15,00	14,99	14,99	14,99	14,98
2081	15,59	15,02	15,02	15,01	15,01	15,01	15,00	15,01	15,00	15,00	15,00	14,99	14,99
2082	15,61	15,03	15,02	15,02	15,02	15,01	15,01	15,01	15,01	15,00	15,00	15,00	14,99
2083	15,62	15,03	15,03	15,02	15,02	15,02	15,01	15,02	15,01	15,01	15,01	15,00	15,00
2084	15,63	15,04	15,03	15,03	15,03	15,02	15,02	15,02	15,02	15,01	15,01	15,01	15,00
2085	15,65	15,05	15,04	15,03	15,03	15,03	15,02	15,03	15,02	15,02	15,02	15,01	15,01
2086	15,66	15,05	15,04	15,04	15,04	15,03	15,03	15,03	15,03	15,02	15,02	15,02	15,01
2087	15,67	15,06	15,05	15,04	15,04	15,04	15,03	15,04	15,03	15,03	15,03	15,02	15,02
2088	15,69	15,06	15,05	15,05	15,05	15,04	15,04	15,04	15,04	15,03	15,03	15,03	15,02
2089	15,70	15,07	15,06	15,05	15,05	15,05	15,04	15,05	15,04	15,04	15,04	15,03	15,03
2090	15,72	15,07	15,07	15,06	15,06	15,05	15,05	15,06	15,05	15,04	15,04	15,04	15,03
2091	15,73	15,08	15,07	15,06	15,06	15,06	15,05	15,06	15,05	15,05	15,05	15,04	15,03
2092	15,74	15,08	15,08	15,07	15,07	15,06	15,06	15,07	15,06	15,05	15,05	15,05	15,04
2093	15,76	15,09	15,08	15,07	15,07	15,07	15,06	15,07	15,06	15,06	15,06	15,05	15,04
2094	15,77	15,09	15,09	15,08	15,08	15,07	15,07	15,08	15,07	15,06	15,06	15,06	15,05
2095	15,78	15,10	15,09	15,08	15,08	15,08	15,07	15,08	15,07	15,07	15,07	15,06	15,05
2096	15,80	15,10	15,10	15,09	15,09	15,08	15,08	15,09	15,08	15,07	15,07	15,07	15,06
2097	15,81	15,11	15,10	15,09	15,09	15,09	15,08	15,09	15,08	15,08	15,08	15,07	15,06
2098	15,82	15,11	15,11	15,10	15,10	15,09	15,09	15,10	15,09	15,08	15,08	15,08	15,07
2099	15,83	15,12	15,11	15,11	15,10	15,10	15,09	15,10	15,09	15,09	15,08	15,08	15,07
2100	15,85	15,13	15,12	15,11	15,11	15,10	15,10	15,11	15,10	15,09	15,09	15,08	15,08
2101	15,86	15,13	15,12	15,12	15,11	15,11	15,10	15,11	15,10	15,10	15,09	15,09	15,08

2102	15,87	15,14	15,13	15,12	15,12	15,11	15,11	15,12	15,11	15,10	15,10	15,09	15,09
2103	15,89	15,14	15,13	15,13	15,12	15,12	15,11	15,12	15,11	15,11	15,10	15,10	15,09
2104	15,90	15,15	15,14	15,13	15,13	15,12	15,12	15,13	15,12	15,11	15,11	15,10	15,10
2105	15,91	15,15	15,14	15,14	15,13	15,13	15,12	15,13	15,12	15,12	15,11	15,11	15,10
2106	15,93	15,16	15,15	15,14	15,14	15,13	15,13	15,14	15,13	15,12	15,12	15,11	15,11
2107	15,94	15,16	15,15	15,15	15,14	15,14	15,13	15,14	15,13	15,12	15,12	15,12	15,11
2108	15,95	15,17	15,16	15,15	15,15	15,14	15,13	15,15	15,14	15,13	15,13	15,12	15,11
2109	15,96	15,17	15,16	15,15	15,15	15,15	15,14	15,15	15,14	15,13	15,13	15,13	15,12
2110	15,98	15,18	15,17	15,16	15,16	15,15	15,14	15,15	15,15	15,14	15,14	15,13	15,12
2111	15,99	15,18	15,17	15,16	15,16	15,16	15,15	15,16	15,15	15,14	15,14	15,14	15,13
2112	16,00	15,19	15,18	15,17	15,17	15,16	15,15	15,16	15,16	15,15	15,15	15,14	15,13
2113	16,01	15,19	15,18	15,17	15,17	15,17	15,16	15,17	15,16	15,15	15,15	15,15	15,14
2114	16,03	15,20	15,19	15,18	15,18	15,17	15,16	15,17	15,17	15,16	15,16	15,15	15,14
2115	16,04	15,20	15,19	15,18	15,18	15,18	15,17	15,18	15,17	15,16	15,16	15,16	15,15
2116	16,05	15,21	15,20	15,19	15,19	15,18	15,17	15,18	15,17	15,17	15,17	15,16	15,15
2117	16,06	15,21	15,20	15,19	15,19	15,19	15,18	15,19	15,18	15,17	15,17	15,16	15,16
2118	16,08	15,22	15,21	15,20	15,20	15,19	15,18	15,19	15,18	15,18	15,17	15,17	15,16
2119	16,09	15,22	15,21	15,20	15,20	15,20	15,19	15,20	15,19	15,18	15,18	15,17	15,16
2120	16,10	15,23	15,22	15,21	15,21	15,20	15,19	15,20	15,19	15,19	15,18	15,18	15,17
2121	16,11	15,23	15,22	15,21	15,21	15,21	15,20	15,21	15,20	15,19	15,19	15,18	15,17
Diferença em relação ao Cenário Base		-0,88	-0,89	-0,90	-0,90	-0,90	-0,91	0,90	-0,91	-0,92	-0,92	-0,93	-0,94

Fonte: Elaborado pelo Autor.

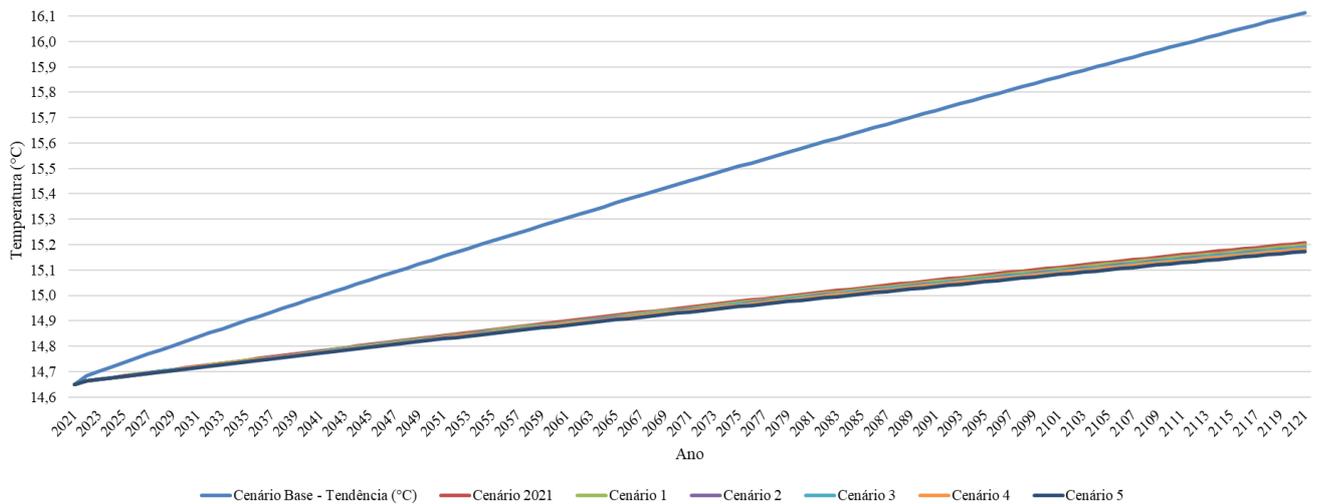
As Figuras 28 e 29 apresentam o comparativo da evolução da temperatura com a aplicação dos cenários propostos para as duas metodologias:

Figura 28 - Redução da temperatura nos diferentes cenários – Método UCAR
Tendência da temperatura média - Cenário Base e Cenário Propostos - Método UCAR



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 29 - Redução da temperatura nos diferentes cenários – Método Elis, Roberts
Tendência da temperatura média - Cenário Base e Cenário Propostos - Método ELIS, Roberts



Fonte: Elaborado pelo autor.

A redução de temperatura calculada para o ano 2121 para cada cenário em relação ao cenário base, para as duas metodologias estão apresentadas na Tabela 19.

Tabela 19 – Redução de temperatura para o ano de 2100 para cada cenário, em °C

Metodologia	Cenário					
	Cenário 2021	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
UCAR	-0,88	-0,89	-0,90	-0,90	-0,90	-0,91
ELIS, Robert	-0,90	-0,91	-0,92	-0,92	-0,93	-0,94

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Diante dos resultados, também foi realizado comparativo das concentrações atmosféricas de CO₂ dos cenários base e 5 com relação aos modelos CMIP-6 apresentados no item 2.4, com a finalidade de avaliar as tendências destes cenários em relação aos modelos apresentados, conforme Tabela 20.

Este comparativo apresenta como os modelos desenvolvidos se comportam ao longo dos anos, onde cada um deles possui uma série de premissas de aumento e reduções de emissões globais. Embora sejam mais complexos e considerem uma quantidade maior de variáveis, seguem a mesma lógica que o presente estudo, seguindo modelagens com base nas emissões de GEE.

Observa-se que, diferentemente dos cenários propostos neste trabalho, os modelos apresentados como comparação, utilizam outras variáveis além do tratamento dos RSU, a exemplo da mudança de uso de terra e florestas, processos industriais, atividades extrativistas, agropecuária, energia, transportes, degelo polar, alterações na camada de ozônio e dezenas de outras variáveis.

Tabela 20 – Concentrações de CO₂ atmosférico nos modelos CMIP6, cenário Base e Cenário 5

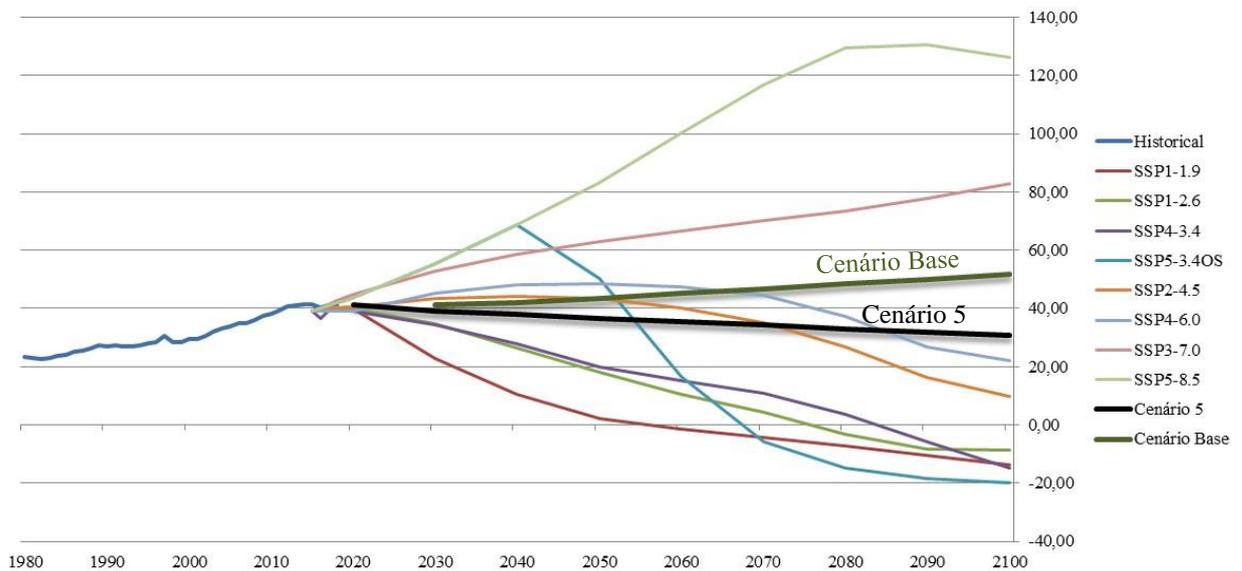
Modelo / Cenário	Concentrações de CO ₂ em ppm por ano													
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2110
Histórico	41,40	40,40	41,20	41,30										
SSP1-1.9	39,15	39,26	39,48	39,59	39,59	39,69	22,85	10,48	2,05	-1,53	-4,48	-7,31	-10,57	-13,89
SSP1-2.6	39,15	39,28	39,41	39,54	39,67	39,80	34,73	26,51	17,96	10,53	4,48	-3,29	-8,39	-8,62
SSP4-3.4	39,15	36,40	39,12	39,11	39,09	39,08	34,46	27,74	19,84	15,06	10,86	3,71	-5,96	-14,82
SSP5-3.4OS	39,15	40,06	40,96	41,89	42,80	43,71	55,30	68,77	50,32	16,58	-5,77	-14,86	-18,56	-20,00
SSP2-4.5	39,15	39,45	39,75	40,05	40,35	40,65	43,48	44,25	43,46	40,20	35,24	26,84	16,32	9,68
SSP4-6.0	39,15	39,14	39,12	39,11	39,09	39,08	45,17	48,14	48,38	47,26	44,67	37,40	26,63	21,93
SSP3-7.0	39,15	40,28	41,41	42,54	43,68	44,81	52,85	58,50	62,90	66,57	70,04	73,41	77,80	82,73
SSP5-8.5	39,15	40,06	40,98	41,89	42,80	43,71	55,30	68,78	83,30	100,34	116,81	129,65	130,58	126,29
Cenário Base							45,35	43,15	44,54	45,93	47,32	48,70	50,09	51,49
Cenário 5							44,50	39,93	39,71	39,50	39,27	39,05	38,83	38,61

Fonte: Elaborado pelo Autor, com base nos dados históricos de IPCC, 2020.

Este comparativo apresenta como os modelos desenvolvidos se comportam ao longo dos anos, onde cada um deles possui uma série de premissas de aumento e reduções de emissões globais. Embora sejam mais complexos e consideram uma quantidade maior de variáveis, seguem a mesma lógica que o presente estudo, seguindo modelagens com base nas emissões de GEE.

A Figura 30 permite a visualização gráfica das alterações de concentrações com os modelos CMIP-6. Observa-se que o cenário base e cenário 5 se apresentam como projeções lineares, pois consideram a redução de emissões constante ao longo dos anos, ao contrário dos demais modelos, que projetam uma série de mudanças de emissões no decorrer dos anos.

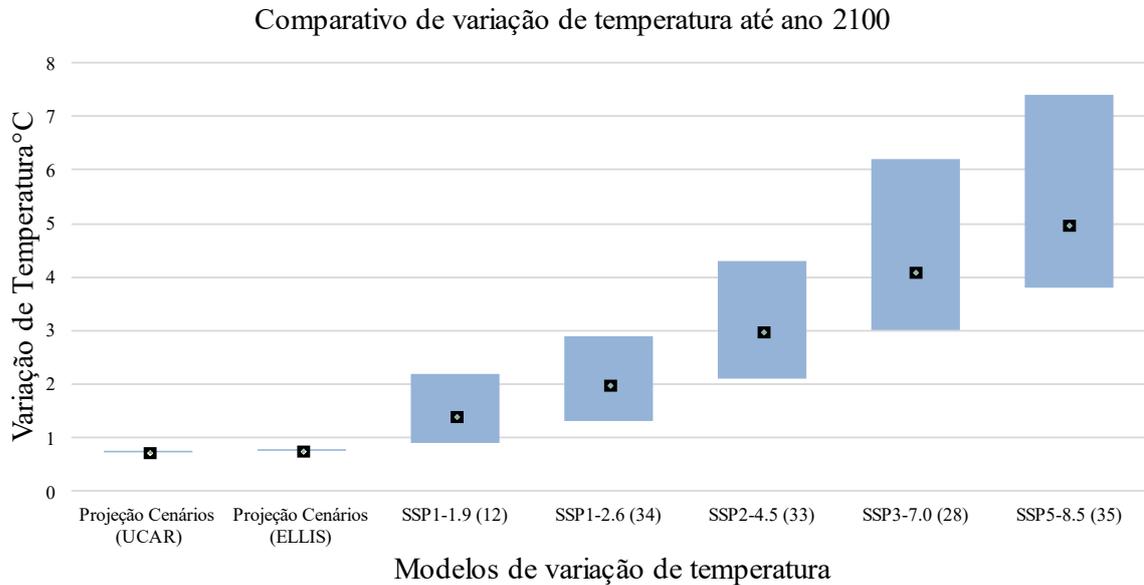
Figura 30 – Gráfico da evolução da concentração de CO₂ atmosférico nos modelos CMIP6, cenário Base e Cenário 5



Fonte: Elaborado pelo Autor, com base nos dados históricos de IPCC, 2020.

A Figura 31 apresenta o comparativo em termos de variação de temperatura entre os resultados obtidos com os modelos SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5 para o ano de 2100.

Figura 31 – Gráfico da evolução da concentração de CO₂ atmosférico nos modelos CMIP6, cenário Base e Cenário 5



Fonte: Elaborado pelo autor.

5 DISCUSSÃO

Este trabalho permitiu quantificar as emissões de GEE geradas por todos os processos envolvidos no gerenciamento dos RSU com base no ciclo de vida dos produtos utilizando, para tanto, inventários que contemplam a exploração das matérias primas, transporte, processamento, distribuição, uso e destino final.

Os resultados fornecem informações quantificadas sobre quais tratamentos e resíduos são mais representativos, podendo servir de ferramenta de decisão para os gestores avaliarem a ordem de prioridade em relação aos investimentos e logística de coleta e destinação final a ser adotada.

O trabalho permitiu também avaliar a importância e contribuição de cada tipo de tratamento, de cada tipo de resíduo, das emissões dos diferentes gases e recursos utilizados e por cada processo, os quais serão detalhados nos subitens a seguir. A partir dos resultados foi realizado o comparativo entre o balanço de geração de GEE nos diferentes cenários, identificando as vantagens de cada alternativa, quantificando os ganhos ambientais com a utilização destas.

Embora não tão comuns, estudos que realizam estimativas de redução de emissões de GEE provenientes da gestão dos RSU através da modelagem baseada em ACV, analisam cenários integrados e buscam indicar quais as alternativas

ambientalmente mais adequadas.

Os resultados obtidos neste estudo levam a conclusões similares a de outros trabalhos da mesma temática.

5.1 Comparativo entre os cenários

Com base nos resultados verificou-se que com as atuais ações de valorização de resíduos, o município de Florianópolis está deixando de emitir ao meio ambiente o quantitativo da ordem de 16.262 T_{MCO₂eq} (ano base 2021) de GEE. Ou seja, esta é a quantificação do quanto as ações de reciclagem e compostagem estão impactando nas emissões de GEE através da gestão dos RSU.

À medida em que foram aplicados os cenários propostos com o aumento do encaminhamento à reciclagem, compostagem, digestão anaeróbia e incineração com aproveitamento energético, foi verificada redução da emissão de GEE. Portanto, é possível afirmar que as alternativas propostas são mais vantajosas em relação ao tradicional encaminhamento ao aterro sanitário.

Esta diferença entre os cenários, com reduções de emissões à medida em que são aplicadas alternativas ao aterro sanitário estão alinhados com os resultados obtidos por Iqbal *et al.* (2019), os quais demonstraram que após avaliação da emissão de GEE em diferentes cenários – considerando as alternativas de aterro sanitário, incineração com geração de energia, digestão anaeróbia e compostagem, que a melhor alternativa é a integração da opção de incineração com geração de energia com os métodos de tratamento biológicos da fração orgânica. Apesar de não ter considerado a alternativa de reciclagem, este estudo, coerentemente, indica que a alternativa de aterro sanitário é a mais impactante, priorizando a incineração com geração de energia para os resíduos secos e o tratamento biológico para os resíduos orgânicos, seguindo a mesma conclusão que Liu *et al.* (2017). Ressalta-se que a incineração sem geração de energia não é uma alternativa favorável à redução de GEE (DONG *et al.*, 2017).

Liu *et al.* (2017) afirma que em função da potencial recuperação de energia, a integração de incineração dos RSU com alternativas biológicas é o melhor cenário em todas as categorias de impactos. Como os RSU da China (país onde o estudo foi realizado), apresenta alta porcentagem de resíduos orgânicos em sua composição, a digestão anaeróbia se destacou entre as alternativas, já que

reaproveita a energia oriunda do gás metano para geração de energia elétrica e utiliza o residual como fertilizante, reaproveitando nutrientes – aumentando assim a síntese (sequestro) de carbono. Por este motivo o autor estabelece que a sequência para otimizar a redução dos GEE deve seguir a ordem: coleta diferenciada na fonte; digestão anaeróbia da fração orgânica; incineração de resíduos com alto poder calorífico; e encaminhamento da fração inorgânica para o aterro sanitário. Esta ordem de prioridades que o autor propõe é exatamente a configuração do cenário 5 do presente estudo, o qual se configurou como sendo a melhor alternativa estando em conformidade com os resultados obtidos.

5.2 Por tipo de tratamento

Em todos os cenários, à medida em que as categorias de resíduos foram alocadas em tratamentos alternativos em relação ao aterro sanitário, foram observadas reduções de emissões de GEE. Foi observado que o tratamento que mais emite GEE é justamente o aterro sanitário, visto que o cenário base é o que mais emite GEE, na ordem de 62.054 TMCO_2eq , e o que menos emite é o cenário 5, o qual não prevê o encaminhamento dos RSU para o aterro sanitário, ou seja, - 79.843 TMCO_2eq . Desta forma, é possível afirmar que este cenário é cerca de 2,3 vezes mais eficiente em termos de emissão de GEE.

Dentre os motivos da alta emissão de GEE quando destinados os RSU ao aterro sanitário são: alta geração de gás metano pela decomposição da matéria orgânica; alta emissão de GEE pelos maquinários responsáveis pela movimentação de terra, de RSU e compactação no aterro e; fim do ciclo de vida dos produtos, necessitando exploração de matéria virgem para a produção de novos materiais.

A alternativa de 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. Outros benefícios são: a eficiência energética obtida pela diminuição de consumo de água; o aumento da capacidade produtiva do solo; e, o aumento da atividade microbiana, que resulta em um solo de maior qualidade (California Environmental Protection Agency, 2017). Portanto, considera-

se a redução de emissão de GEE do processo global, demonstrando a diminuição de emissão nas demais etapas de utilização do composto em solo para agricultura e na redução do uso de fertilizantes e agrotóxicos.

Os resultados também indicam que o desvio dos resíduos orgânicos de origem alimentar para tratamentos biológicos (como compostagem e digestão anaeróbia) são vantajosos em virtude da recuperação do carbono destes resíduos e consequente redução de geração de gás metano nos aterros sanitários – além de reduzir o lixiviado e, conseqüentemente, o gasto energético para tratá-lo, visto que para o tratamento dos efluentes no aterro sanitário demanda de grande quantidade de energia elétrica pelas bombas de ar utilizadas no tratamento aeróbico deste efluente (IQBAL *et al.*, 2019).

O principal motivo pela alta geração de GEE em aterro sanitário é a alta emissão de gás metano, oriundo da decomposição de matéria orgânica, fato verificado pelos valores obtidos. Neste tratamento, os resíduos são aterrados e as frações biodegradáveis se decompõem por meio de uma complexa série de reações bioquímicas, resultando na produção do biogás (SPOKAS *et al.*, 2006). O biogás é constituído basicamente de metano e dióxido de carbono. Também ocorre a geração de outros tipos de gases, como compostos orgânicos voláteis não metânicos, que podem ser tóxicos (HRAD *et al.*, 2012).

5.3 Por tipo de resíduo

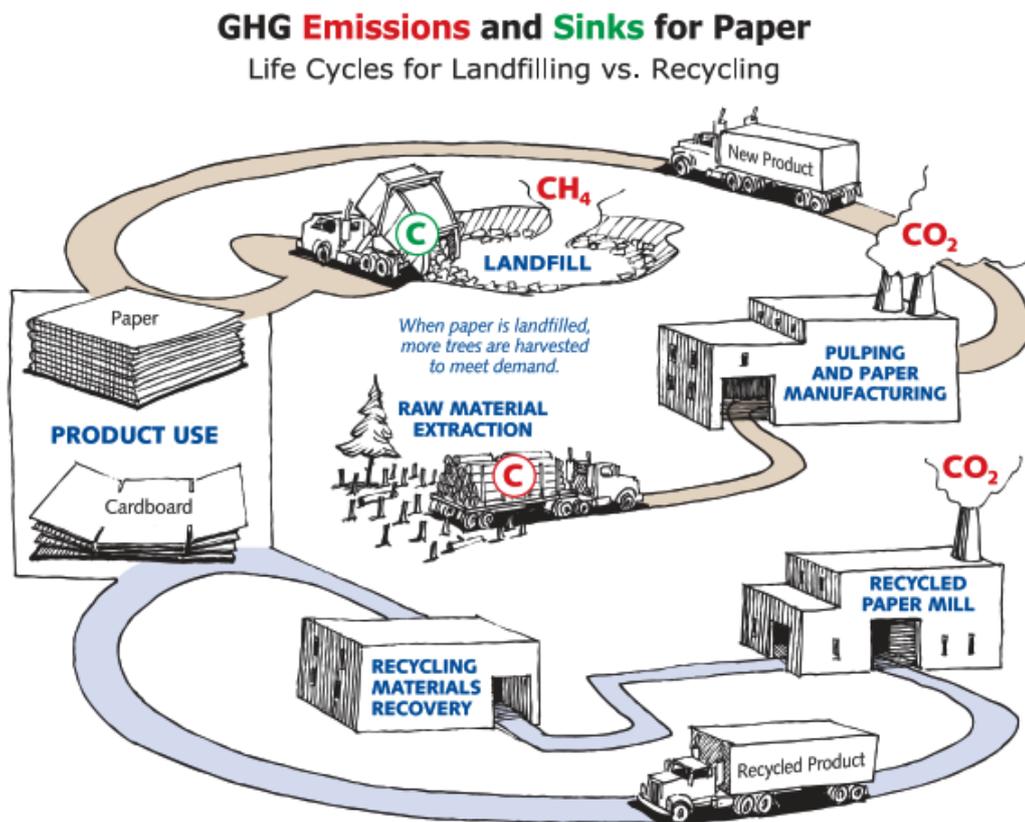
O resíduo que apresentou maior potencial de redução, conforme exposto no item 4.3 foi o papel misto, representando uma diferença de -37.147 MTCO₂eq entre o cenário 5 e o cenário base, seguido dos orgânicos (fração alimentos) o qual representa uma redução de -32.729 MTCO₂eq, RSU mistos com -21.612 MTCO₂eq e da fração de papelão com -14.694 MTCO₂eq.

A Figura 32 apresenta o comparativo entre o ciclo de vida da produção do papel a partir de matéria prima e da reciclagem. Nela é possível observar que quando encaminhado ao aterro sanitário, além da exploração de matéria virgem, a qual gera emissões no corte de árvores, no transporte e na supressão da cobertura vegetal, também acaba gerando emissão de gás metano quando da degradação no aterro. Tais emissões, com exceção do transporte, acabam sendo evitadas quando

da reciclagem deste resíduo.

Os resultados obtidos estão de acordo com o que seria esperado avaliando este ciclo de vida deste material, ou seja, os resultados demonstram o grande impacto em que a produção de papel a partir da extração de celulose virgem representa no ciclo produtivo. Longo *et al.* (2019), obteve os mesmos resultados utilizando software semelhante (Simapro), o qual indicou que o resíduo que mais contribui para a redução de GEE é a fração de papel em função da energia gasta na exploração da matéria prima e na produção, sendo cerca de 3 vezes maior do que com a utilização de material reciclado.

Figura 32 – Comparativo do ciclo de vida do papel, entre aterro sanitário e reciclagem



Fonte: EPA, 2020.

Ainda em relação ao papel e papelão, sua reciclagem reduz a quantidade de madeira colhida das florestas e consequente produção de celulose, reduzindo as emissões de GEE da combustão de combustíveis fósseis na fabricação e transporte, evitando futuras emissões de metano que teriam ocorrido se o papel tivesse sido depositado em aterro e fosse utilizada matéria prima virgem.

Quanto aos RSU mistos (resíduos diversos misturados, definidos na

caracterização como sendo a fração em que não seria possível serem segregados), foi observado considerável redução de emissão quando da utilização de incineração com geração de energia, fato que pode ser observado pelo cenário 5, na qual esta fração representa uma redução de 21.612 T_MCO₂eq entre os demais. Observa-se que esta fração também gera quantidade significativas de gás metano quando encaminhada ao aterro. Esta redução se deve ao alto poder calorífico quando utilizados na combustão, havendo ganho em redução de GEE, justamente pelo aproveitamento destes na geração de energia elétrica.

Quanto aos orgânicos (alimentos), a alta representatividade nos resultados se dá quando, gradativamente, ocorre a substituição do encaminhamento ao aterro sanitário, já que neste ambiente a degradação da matéria orgânica ocorre em ambiente anaeróbio, aumentando significativamente a produção de CH₄, o qual, conforme demonstrado neste estudo, tem potencial de aquecimento global de 25 vezes ao CO₂.

5.4 Por tipo de gases e de recursos

Em relação às emissões de gases e recursos, observa-se grande contribuição do estoque de carbono florestal, onde há uma redução de -43.800 T_MCO₂eq nos cenários 4 e 5. Este recurso apresenta redução expressiva de emissão de GEE quando considerados os aumentos nas taxas de reciclagem entre os cenários, já que a reciclagem de papéis e madeiras tem grande contribuição no estoque de carbono florestal, em virtude da substituição da exploração de matéria prima vegetal pela reutilização dos compostos a base de celulose no processo industrial, resultante da reciclagem destes resíduos.

Os resultados da modelagem das emissões por tipo de gases e recursos estão apresentados na Tabela 14 por ordem de maior variação, ou seja, por ordem de contribuição nas emissões de GEE.

Os gases presentes da modelagem são o metano, dióxido de carbono, tetrafluoreto de metano, hexafluoro etano, monóxido de dinitrogênio e outros sem especificação. Entende-se como recursos os estoques de carbono florestal, estoque de carbono no solo e estoque de carbono no aterro sanitário. A descrição de cada item está na Tabela 21:

Tabela 21 – Descrição dos tipos de gases e recursos

Tipo de gás/fluxo	Descrição
Metano	A fração orgânica dos RSU quando dispostos em aterro sanitário acabam de decompondo em ambiente anaeróbico (sem a presença de oxigênio) resultando na emissão de gás metano. A quantidade emitida de gás metano em um aterro sanitário é influenciada principalmente pelos resíduos orgânicos – restos de alimentos e matéria vegetal.
Estoque de carbono florestal	Forte influência pela reciclagem de papelão, papéis e madeiras quando encaminhados para reciclagem, pois reduzem o corte de árvores para exploração de madeira e celulose e, conseqüentemente, aumentam o acúmulo de carbono nas florestas pela redução na demanda de madeira e celulose virgem, diferentemente das opções de incineração e aterro sanitário que acabam não tendo esta vantagem.
Dióxido de Carbono	A maior parcela de dióxido de carbono produzida ocorre, principalmente, na fase aeróbia decomposição dos resíduos. Também é gerado em parcela considerável nos processos de transporte, processamento e operação de maquinários.
Estoque de carbono no solo	Quando o composto produzido a partir dos processos de compostagem e digestão anaeróbia são aplicados no solo acabam agregando carbono ao solo. Entende-se que o carbono deste processo resulta em um estoque de carbono junto ao solo pelos mecanismos de estoque direto em solos degradados (produção agrícola) e em compostos de húmus presentes como matéria orgânica.
Tetrafluoreto de Carbono (CF ₄ ou R-14)	Gás emitido pela queima de combustíveis que contribui com o efeito estufa.
Hexafluoro Etano (HFC-116)	Gás emitido pela queima de combustíveis que contribui com o efeito estufa.
Outros gases de efeito estufa não especificados	Outros gases de efeito estufa não especificados.
Dióxido de Dinitrogênio (N ₂ O ₂)	Gás emitido pela queima de combustíveis que contribui com o efeito estufa.
Estoque de carbono no aterro sanitário	Fração de carbono de matéria orgânica que não se decompõe em forma de gases acaba sendo agregado pelo em forma de estoque de carbono junto ao solo dos aterros sanitários.

Fonte: Adaptado de EPA, 2020.

Observa-se que o principal contribuinte ao efeito estufa é o gás metano, tendo a maior emissão no cenário base e a menor no cenário 5 (variação de -81.816 T_{MCO₂eq}). Este resultado já era esperado, já que a principal fonte de emissão de

metano é justamente a decomposição da matéria orgânica em aterro sanitário, conforme discorrido nos itens anteriores.

O metano tem potencial 25 vezes maior que o dióxido de carbono por exemplo. O CH₄ e o CO₂ são os principais gases indutores do aumento do efeito estufa no planeta (ARONICA *et al.*, 2009). Os resultados mostram que o dióxido de carbono é o segundo gás que apresenta a maior redução nos cenários propostos, tendo uma diferença na ordem de -34.677 T_MCO₂eq entre o cenário base e cenário 5. Observa-se também, que a emissão de CO₂ apresenta redução considerável na medida em que se aumenta o índice de reciclagem, ocasionando redução na emissão referente à exploração de matéria prima, transporte e industrialização dos materiais.

Outras duas variáveis se destacam na comparação dos cenários: estoque de carbono florestal (-43.696 T_MCO₂eq) e estoque de carbono no solo (-9.154 T_MCO₂eq), ambos no cenário 5. O primeiro está relacionado com a reciclagem da fração de celulose (papel e papelão) e a segunda relacionado com o beneficiamento da matéria orgânica através dos processos de compostagem e digestão anaeróbia.

O estoque de carbono no aterro sanitário, ainda que apresente um valor significativo no cenário base (-58.735 T_MCO₂eq) acaba não refletindo em ganhos em redução neste cenário, já que apresenta valores ainda superiores em termos de emissão de metano (115.743 T_MCO₂eq), justificando porque esta é a alternativa com maior emissão de GEE.

Os demais gases (tetrafluoreto de metano, hexafluoro etano, monóxido de dinitrogênio e outros sem especificação) não variam de forma expressiva em relação às demais variáveis e não apresentam grande importância nas variações dos cenários com a finalidade de redução de GEE.

5.5 Por tipo de Processo

Os processos que se destacaram no impacto de emissão de GEE foram o sequestro de carbono florestal – na maior parte oriundos da reciclagem de papel e papelão, a redução na fonte – proveniente da reciclagem dos resíduos secos, o aterramento - em decorrência da redução progressiva de encaminhamento de resíduos ao aterro sanitário, além da geração de eletricidade no cenário 5 – que por sua vez decorre de emissão positiva quando do processo de incineração.

O sequestro de carbono florestal se mostrou o processo mais importante em virtude de que as florestas absorvem (ou seja, sequestram) dióxido de carbono atmosférico e armazenam-no na forma de celulose e outros materiais. O carbono é liberado quando as árvores são derrubadas e processadas para a produção de novos materiais, especialmente papel e papelão – o que por sua vez comprova a ordem de importância dos tipos de resíduos apresentados no item 5.3. Quando o papel, papelão e produtos de madeira são reciclados ou a produção desses materiais é evitada por meio da redução da fonte, as árvores deixam de serem cortadas, sendo mantidas vivas nas florestas, ou seja, essa redução da exploração resulta em mais armazenamento de carbono do que ocorreria na ausência da reciclagem.

A mesma lógica justifica o segundo processo mais importante, a redução na fonte, resultante principalmente da reciclagem dos demais resíduos da fração de RSU secos. Quando a matéria prima de um material é substituída por resíduos recicláveis, esta é deixada de ser explorada, ou seja, há a redução na fonte. Neste caso as emissões de GEE associadas à produção do material e/ou a fabricação do produto são evitadas. O cálculo do balanço de emissões, além das relacionadas à exploração de matéria prima e fabricação, considera as emissões e energia necessária para transportar os materiais até os consumidores, fechando o ciclo. Como o balanço (diferença) entre estes dois ciclos – considerando ou não a reciclagem, é de grande gasto energético e de emissões de GEE, justifica como sendo um processo de grande contribuição para a redução de GEE.

O aterramento – terceiro processo mais expressivo, apresenta altos níveis de emissões pois quando alguns tipos de resíduos, especialmente os orgânicos (resto de alimentos e resíduos verdes, como podas), papel e madeira são depositados em aterro sanitário, bactérias anaeróbias degradam os materiais, produzindo metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2). Parte do carbono destes resíduos acabam sendo fixados no solo do aterro sanitário em função de não serem completamente decompostos por bactérias anaeróbias. Por outro lado, o carbono de origem fóssil, como o presente em plásticos e borrachas que permanece no aterro não é contabilizada como carbono armazenado. No presente estudo, como o aterro sanitário se situa a 49,6 quilômetros de distância do centro de transbordo municipal, há considerável emissão relacionada ao transporte dos resíduos pela queima de combustível fóssil (diesel) e, em seguida, para operar os maquinários para

movimentação de terra, compactação e demais obras civis do aterro sanitário.

Já a energia elétrica, produzida através da digestão anaeróbia e pela incineração com geração de energia, resulta em uma compensação de emissões quando comparada aos outros tipos de tratamento, pois transforma resíduos em energia, substituindo a geração de eletricidade por outros meios. Embora a combustão com geração de energia resulte em emissões de CO₂ e N₂O, o processo se demonstra vantajoso quando avaliado o ciclo de vida dos RSU, evitando, especialmente todas emissões e energia gasta no transporte e nos processos ocorridos no aterro sanitário.

A seguir, a compostagem tem a quarta maior importância nos resultados, pois durante a compostagem, a decomposição microbiana transforma aerobiamente substratos orgânicos em um material estável, semelhante a húmus (BROWN *et al.*, 2007). O modelo utilizado considera especialmente os impactos resultantes do processo de compostagem em:

- Síntese de carbono (redução de emissões) associado à aplicação do composto produzido em solos agrícolas;
- Emissões de dióxido de carbono (CO₂) do transporte e operação de revolvimento das pilhas de composto, além das emissões fugitivas de metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) produzido durante a decomposição;
- Redução na utilização/produção de fertilizantes com a substituição pela utilização do composto orgânico.

5.6 Influência dos resultados nos elementos meteorológicos

Os resultados obtidos permitem afirmar que a adoção de alternativas tecnológicas para a gestão dos RSU reduz a emissão de GEE, o que, conseqüentemente, provoca impacto na temperatura. Esta afirmação se baseia tanto nos princípios teóricos quanto nos cálculos realizados, conforme levantamento bibliográfico apresentado.

Com a aplicação das equações que simulam a influência das diferentes concentrações de CO₂ obtidos dos cenários propostos na temperatura, foi observado que a adoção das alternativas de valorização de resíduos propostas pode reduzir a temperatura até 2121 na ordem de 1,0°C.

Apesar de, em uma primeira análise, aparentemente não serem valores muito expressivos, há de se considerar que a emissão de GEE provenientes dos RSU é de aproximadamente 4% do total emitido, ou seja, considerando estes valores dado à representatividade, é um valor considerável de influência na temperatura.

Foi possível observar também a alteração da linha de tendência da concentração de CO₂ atmosférico, havendo uma diferença notável entre o cenário base (51,49 pmm) e o cenário 5 (38,61 ppm) para o horizonte do ano de 2121.

6 Produto Técnicos e Tecnológicos

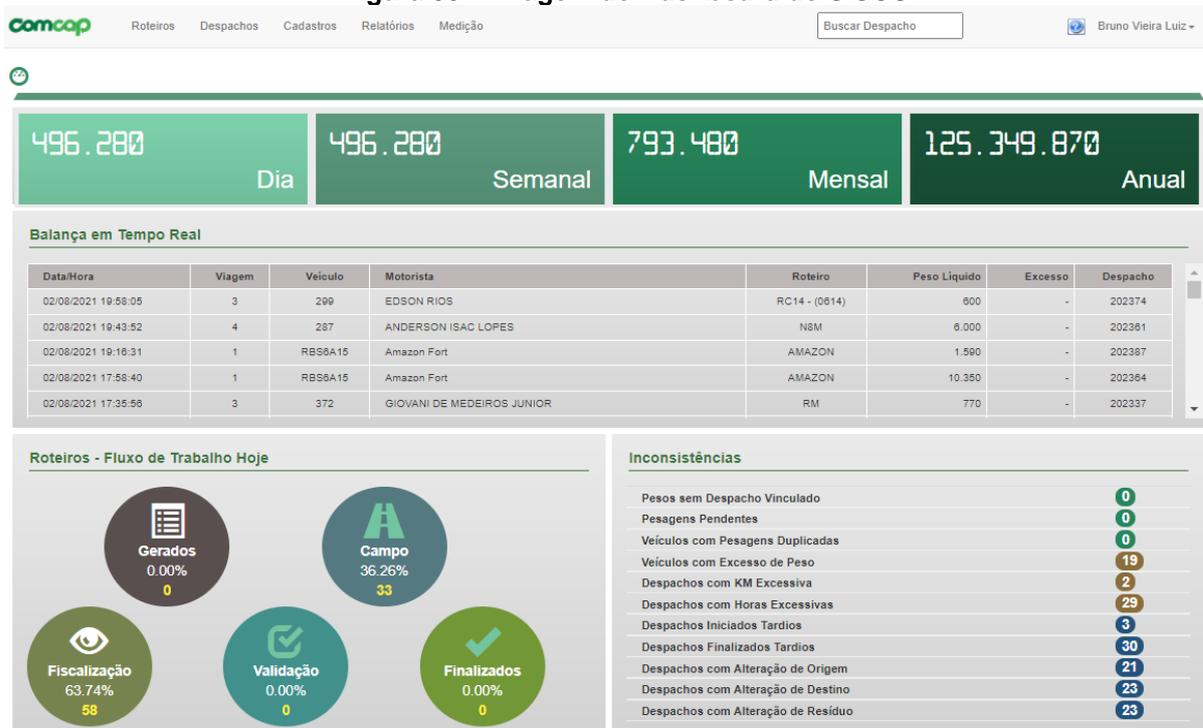
A partir das pesquisas realizadas e dos resultados obtidos com o desenvolvimento deste trabalho, foi possível a criação de um sistema intitulado “Residuômetro”, bem como a publicação de artigo científico e divulgação através de palestra técnica, descritos nos subitens a seguir.

6.1 Residuômetro

A partir da modelagem realizada no presente estudo, foi desenvolvido um produto tecnológico, intitulado como ‘Residuômetro’, com a finalidade de reportar publicamente o quanto o município de Florianópolis está reduzindo em termos de emissão de GEE, onde foi realizada a integração com os softwares que realizam a gestão das informações da movimentação dos resíduos no município de Florianópolis, em especial o Sistema de Coleta de Resíduos – SISCORE e o PowerBI:

- Sistema de Coleta de Resíduos – SISCORE: Software, desenvolvido por este autor e outros técnicos da Prefeitura Municipal de Florianópolis, que realiza a gestão das informações geradas a partir das pesagens dos resíduos em tempo real no Município, onde é gerado um banco de dados com informações diversas a respeito de cada pesagem como, tipo de resíduo, origem do resíduo, destino (tratamento) que será dado ao resíduo, tipo de coleta, data, horário, dentre outros. Na Figura 32 observa-se a tela *Dashboard* do software, onde são apresentadas informações gerais.

Figura 33 – Imagem do *Dashboard do SISCORE*

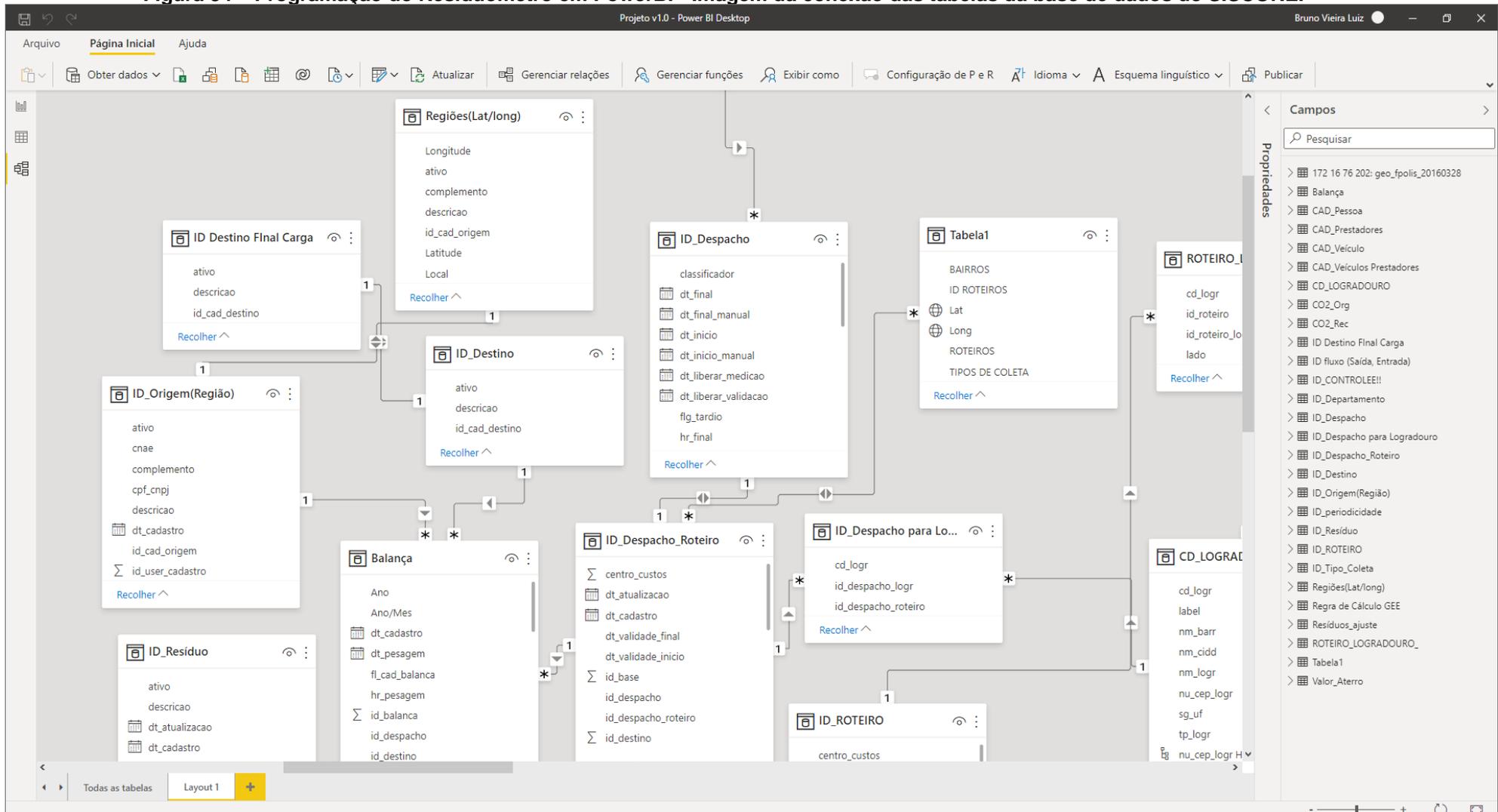


Fonte: COMCAP, 2021.

- **PowerBI:** Software de análise de banco de dados desenvolvido pela empresa Microsoft cujo objetivo principal é fornecer visualizações interativas e recursos de *business intelligence* com uma interface simples para que os usuários finais criem os seus próprios relatórios e dashboards.

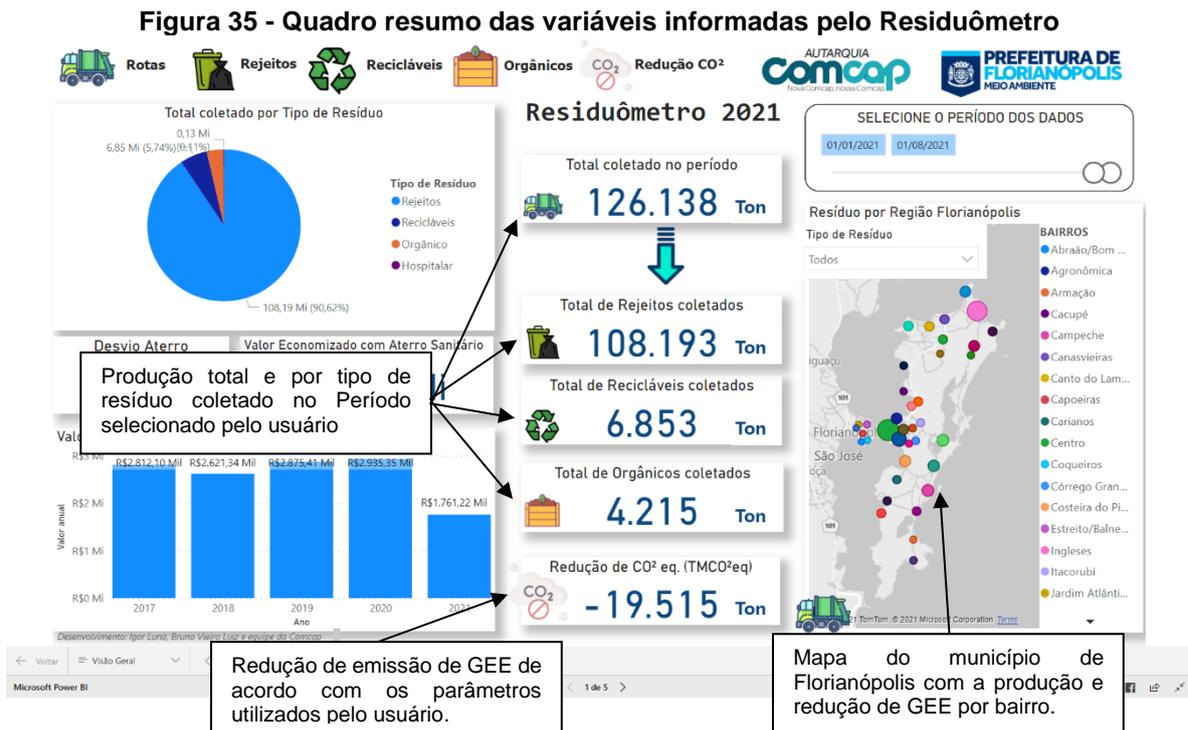
Desta forma, possibilita transparência e acesso à informação da população em geral das informações da gestão municipal de RSU. A Figura 34 apresenta imagem da programação de conexão das tabelas do banco de dados SISCORE dentro do PowerBI, onde as informações são importadas e são realizados cruzamentos das informações, permitindo gerar relatórios customizados e organização de informações para análise dos usuários.

Figura 34 – Programação do Residuômetro em PowerBI - Imagem da conexão das tabelas da base de dados do SISCORE.



Fonte: Elaborado pelo Autor, com auxílio de LUNA, 2020.

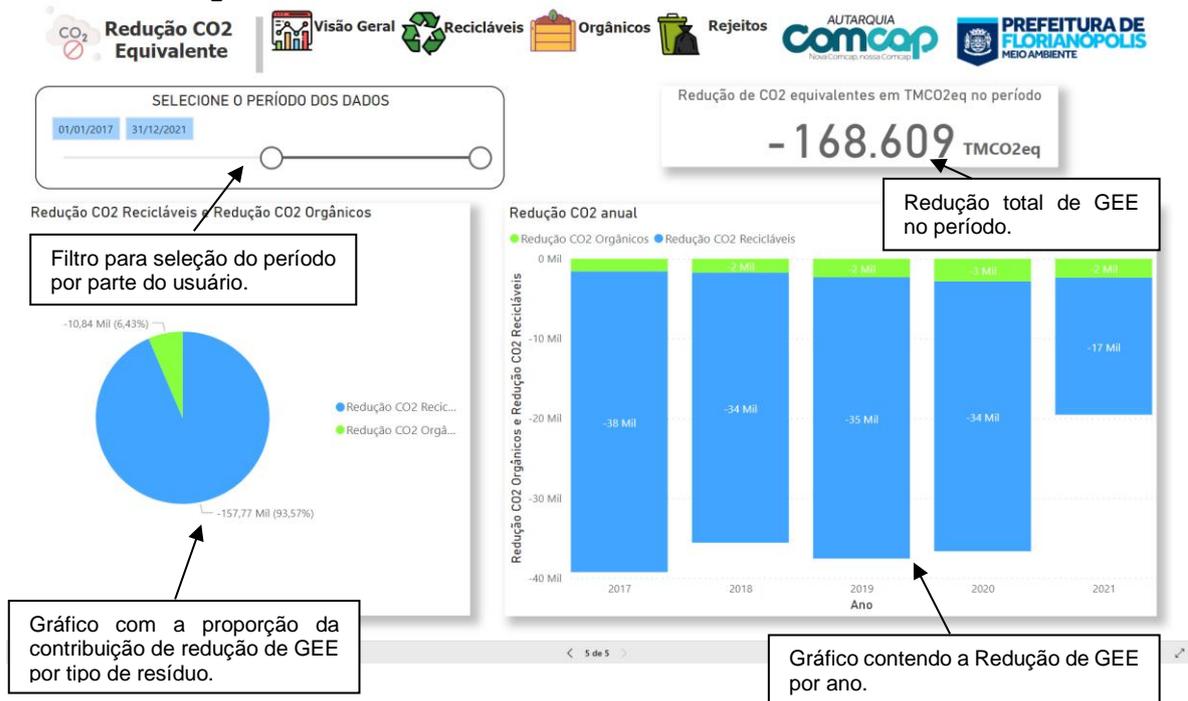
Dentre as funcionalidades disponibilizadas pelo Residuômetro, estão as informações das reduções das emissões de GEE em tempo real, bem como o histórico a partir do ano de 2017 até a data atual como filtro o cálculo em tempo real, permitindo aos usuários visualizarem informações personalizadas, com opções de filtro por período, por tipo de resíduo e por bairro, conforme mostra a Figura 35.



Fonte: COMCAP, 2021

A aplicação possui o detalhamento da redução dos GEE, onde o usuário pode acessar clicando sobre o ícone correspondente para ter acesso à tela da Figura 36, com maiores informações e detalhamentos. Dentre as informações disponíveis estão, o histórico anual a partir do ano de 2017, com as informações das contribuições dos recicláveis secos e dos recicláveis orgânicos, bem como o total de redução de CO₂ equivalente no período selecionado.

Figura 36 - Quadro resumo das variáveis informadas no software



Fonte: COMCAP, 2021

O software está disponibilizado na página oficial da Prefeitura Municipal de Florianópolis⁶ de modo a permitir acesso amplo a profissionais da área e público em geral.

6.2 Publicação de Artigo Científico

O presente trabalho foi publicado em:

- LUIZ, B. V.; SUSKI, C. A. ANÁLISE DE CICLO DE VIDA DOS PROCESSOS DE VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES EM FLORIANÓPOLIS-SC PARA REDUÇÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA. Metodologias e Aprendizado, v. 2, p. 35-39, 2019.
- LUIZ, B.V.; SUSKI, C. A. Avaliação da geração de gases de efeito estufa em diferentes tratamentos de resíduos domiciliares. Metodologias e Aprendizado, v.4, p.89 - 98, 2021.

⁶ <https://www.pmf.sc.gov.br/entidades/comcap/index.php> (acesso em 09/02/2022).

6.3 Participação em Eventos Científicos

- Participação no Congresso Internacional de Engenharia Ambiental & 10ª Reunião de Estudos Ambientais que foi realizado em Porto Alegre/RS nos dias 26, 27 e 28 de outubro de 2020, com publicação do trabalho “ANÁLISE DE CICLO DE VIDA DOS PROCESSOS DE VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES EM FLORIANÓPOLIS-SC PARA REDUÇÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA” (com código de controle e registro REACIEA2020WD145X) em 01 (um) dos 08 (oito) Volumes dos ANAIS do evento.
- Participação na Semana Nacional de Ciência e Tecnologia de 2021, realizada de forma online de 25 à 27 de novembro de 2021 pelo Instituto Federal de Santa Catarina – IFSC Câmpus Itajaí, com divulgação do presente trabalho e do produto tecnológico “Residuômetro” em palestra na atividade de Ensino, Pesquisa e Extensão: Palestra – “Análise de gases de efeito estufa dos resíduos sólidos urbanos de Florianópolis”, com carga horária total de 1 hora(s).

7 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Espera-se que este trabalho inspire a elaboração de análises da gestão dos RSU em outros municípios e as respectivas emissões de GEE, permitindo o comparativo com este trabalho, onde será possível verificar o quanto as diferentes características locais, como distâncias de pontos logísticos e caracterização dos resíduos podem influenciar na priorização de diferentes alternativas tecnológicas em contraponto com os resultados e conclusões ora apresentados.

Também se recomenda a utilização de metodologias, inventários de ciclo de vida dos produtos e software de modelagem diferentes das utilizadas, para que seja possível avaliar eventuais diferenças nos resultados.

8 CONCLUSÃO

A utilização de modelo de emissões de GEE baseado na ACV dos RSU em diferentes cenários propostos permitiu uma comparação geral dos impactos da aplicação de diferentes alternativas tecnológicas para tratamento dos RSU em relação às emissões de GEE, permitindo avaliar a ordem de prioridade das alternativas tecnológicas.

O estudo também forneceu informações de quais resíduos, tratamentos, gases, recursos e processos têm contribuições mais expressivas em relação às reduções de emissões.

Os impactos ambientais de diferentes tecnologias e fluxos de resíduos, foram quantificados tomando como base as características e variáveis do município de Florianópolis-SC avaliados por meio da modelagem computacional baseada em ACV. O trabalho desenvolvido gerou dados e informações para apoiar e contribuir para a tomada de decisão dos sistemas de gestão de RSU no município. A partir da análise dos resultados, ficou claro que a disposição de RSU em aterro sanitário ocasiona em maiores emissões de GEE quando comparado com qualquer outra alternativa tecnológica. Observou-se que a principal causa se deve pela degradação dos resíduos nas condições do aterro, com alta geração de gás metano, de chorume e de emissões resultantes do consumo de combustível do transporte e operação de maquinários pesados. Até mesmo a incineração dos RSU, com aproveitamento energético através da geração de energia elétrica, se demonstrou menos impactante quando se observa o balanço de emissões. Embora apresente emissões significativas devido ao processo de combustão, apresenta menor quantidade total de emissões, observando a geração de energia elétrica e a não geração de gás metano no aterro sanitário.

Os resultados deste estudo estão alinhados com estudos similares, indicando que a reciclagem da fração seca demonstra ser a alternativa que, quantitativamente, representa a maior redução de emissão de GEE. Analisando o ciclo de vida dos produtos, a reinserção destes materiais na cadeia produtiva em substituição da exploração de novas matérias primas justifica esta significativa contribuição. Há de se ressaltar também que a reciclagem tem, além da importância ambiental, um papel social muito importante, gerando oportunidade à parcela da população que se encontra em situação vulnerável, gerando emprego e renda a centenas de

famílias no Município. Cita-se também a redução de custo ao poder público, já que o transporte e aterramento dos RSU tem o custo atual (ano de 2021) de R\$ 156,81 por tonelada. Portanto, a reciclagem dos resíduos secos promove ganhos em três esferas: ambiental, social e econômica.

A compostagem, seguida da digestão anaeróbia, se apresentaram de maneira positiva quanto à redução de emissão de GEE, principalmente quando comparado ao aterro sanitário, muito embora esteja limitado apenas ao tratamento da matéria orgânica presente nos RSU. Ambas alternativas se aplicam apenas ao beneficiamento da fração orgânica, devendo ser priorizadas para a finalidade de redução de GEE, já que quando esta fração é encaminhada ao aterro sanitário, ocorre a decomposição anaeróbia emitindo altos índices de gás metano, um dos principais GEE.

A incineração com geração de energia, ao contrário do que comumente se imagina, também se mostrou mais eficiente do que o aterro, emitindo uma quantidade menor de GEE. Isto se justificou em função do balanço energético considerado na ACV no qual, apesar de haver emissão de gases para a atmosfera durante a incineração, há produção de energia elétrica e/ou térmica, o que substituirá outras fontes de geração de energia e aproveitará o potencial energético dos resíduos ao invés de findar sua vida útil em aterro, havendo neste caso síntese de carbono, gerando após balanço emissão de GEE pouco significativa.

A alternativa de redução na fonte não foi abordada pelo presente estudo, pois é um tema complexo e depende, dentre outros fatores, de políticas públicas que determinem mudanças desde a exploração de matérias primas e manufatura industrial, limitando ou alterando as características, sobretudo, de produtos e embalagens.

Já a opção de destinação final dos RSU ao aterro sanitário se demonstrou a pior alternativa quanto ao balanço de emissão de GEE, visto que nesta alternativa se finda a vida útil dos resíduos, restando a estes apenas sua disposição final resultando em emissões e sem qualquer reaproveitamento energético.

Portanto, analisando a gestão dos RSU sob a ótica da ACV, observa-se que prioritariamente deve ser buscada alternativa que reinsira os resíduos no ciclo produtivo, evitando todos os gastos energéticos e consequente emissões resultantes dos processos, desde a exploração das matérias primas até seu uso e descarte como resíduo.

Os resultados estão em consonância com a hierarquia prioritária instituída pela PNRS: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final ambientalmente adequada. Embora os três primeiros não tenham sido abordados pelo estudo, seguindo a lógica de ACV, é possível afirmar que a não geração ou redução na geração seriam opções ainda menos impactantes. Neste caso, depende, dentre outros fatores, de políticas públicas que determinem mudanças desde a exploração de matérias primas e manufatura industrial, limitando ou alterando as características, sobretudo, de produtos e embalagens.

Embora as alternativas tecnológicas e consequentes benefícios ambientais voltados às reduções de GEE propostos neste trabalho indicam a mesma ordem de prioridade quando comparado com outros estudos realizados em diferentes regiões, há de se observar que os resultados podem ser diferentes observando as particularidades de cada município especialmente a caracterização dos RSU e distâncias dos centros logísticos e de destinação final, variáveis que podem levar a conclusões distintas, limitando a reprodução dos resultados em municípios com características diferentes, sendo necessária a avaliação e modelagem de cada município separadamente.

Foi possível observar também que as emissões, resultantes das diferentes alternativas de destinação final dos RSU, interferem na concentração de GEE da atmosfera e, conseqüentemente, resultam em alteração de temperatura. Avaliando no horizonte de longo prazo foi observado que uma gestão eficiente, em que se busca a valorização das diferentes frações dos RSU, impacta na mitigação do fenômeno de aquecimento global de maneira positiva e relevante, sendo possível a redução de até 1°C em um horizonte de 100 anos.

Espera-se que este trabalho incentive novos estudos e sirva de base para tomadores de decisão responsáveis pela gestão dos RSU para que relacionem a visão de gestão de RSU com seus impactos relacionados à emissão de GEE e consequentes impactos ambientais.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil – ano base 2016**. São Paulo-SP: ABRELPE, 2017.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10.004: Resíduos Sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro-RJ, 2001.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14.040: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura**. p. 1–10, 2001.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14724: Informação e documentação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

COMCAP - AUTARQUIA DE MELHORAMENTOS DA CAPITAL. **Relatório de Movimentação de Resíduos - ano base 2021**. Disponível em: <https://www.pmf.sc.gov.br/entidades/comcap/index.php?cms=valorizacao+de+residuos+solidos&menu=0>. Acessado em: 03/02/2022.

BRASIL. **Decreto nº 7.390/2010. Regulamentação da Política Nacional sobre Mudança de Clima**. Brasília-DF, 2010

BRASIL. **Decreto nº 7.404/2010. Regulamentação da Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília-DF, 2010

BRASIL. **Estimativas Anuais de Emissões Totais de Gases de Efeito Estufa no Brasil**. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/estimativas-anuais-de-emissoes-gee>. Acessado em 03/02/2022. Brasília-DF, 2017.

BRASIL. **Lei Federal nº 12.187/2009. Política Nacional sobre Mudança de Clima**. Brasília-DF, 2019.

BRASIL. **Lei Federal nº 12.305/2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília-DF, 2010.

BROWN, S. *et al.* **Greenhouse Gas Balance for Composting Operations**. Journal of Environmental Quality 37(4):1396-410, 2007.

CALIFORNIA ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Method For Estimating Greenhouse Gas Emission Reductions From Diversion of Organic Waste From Landfills to Compost Facilities**. Disponível em: <https://www.arb.ca.gov/cc/waste/cerffinal.pdf>. Acessado em: 11.10.2018.

CASTILHOS JUNIOR, A. B. *et al.* **Resíduos sólidos urbanos: aterro sustentável para municípios de pequeno porte**. Rio de Janeiro: ABES, RiMa, 2003.

CNM - Confederação Nacional de Municípios. **Catálogo de Ações Aplicáveis aos Municípios Brasileiros para o Combate às Emissões de Gases de Efeito Estufa**. Brasília-DF, 2021.

CRUTZEN, P. J. **Methane's sinks and sources**. Nature 350, p. 380–381, 1991.

ELLIS, T.D. *et al.* **Controls of global-mean precipitation increases in global warming GCM experiments**. J Clim 21, p. 6141–6155, 2013.

EPA - ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Forest Carbon Storage in EPA's Waste Reduction Model**. p. 1–2, 2010.

EPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Inventory of U.S. greenhouse gas emissions and sinks: 1990-2011**. Disponível em: <https://www.epa.gov/ghgemissions/inventory-us-greenhouse-gas-emissions-and-sinks1990-2011>. Acessado em: 11.10.2018.

EPAGRI - EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA E EXTENSÃO. **Banco de dados de Variáveis Ambientais de Santa Catarina**. Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina (CIRAM), 2020.

FLORIANÓPOLIS. **Decreto Municipal nº 17.910/2017. Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS)**. Florianópolis-SC, 2017

FLORIANÓPOLIS. **Decreto Municipal nº 18.646/2018. Programa Florianópolis Capital Lixo Zero 2030**. Florianópolis-SC, 2018

GOODY, R. *et al.* **Reversible and irreversible sources of radiation entropy**. Quarterly Journal of The Royal Meteorological Society, 1996.

HRAD, M. *et al.* **Design of top covers supporting aerobic in situ stabilization of old landfills – an experimental simulation in lysimeters**. Waste Management, v. 32, n. 12, p. 2324-2335, 2012.

HU, B.L. *et al.* **Microbiology, ecology, and application of the nitrite-dependent anaerobic methane oxidation process**. Water Research. Estados Unidos da América, 2012.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **AR4 Climate Change 2007: Synthesis Report**. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar4/syr/>. Acessado em 03/02/2022.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Special Report on Climate Change and Land**. Disponível em: http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.htm. Acesso em: 03/02/2022.

IPT/CEMPRE – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS / COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. **Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado**. São Paulo, IPT, 2000.

IQBAL, A. *et al.* **Integrated municipal solid waste management scheme of Hong Kong: A comprehensive analysis in terms of global warming potential and energy use**. Journal of Cleaner Production, v. 225, n. 2019, p. 1079–1088, 2019.

IUCN - INTERNATIONAL UNION FOR CONSERVATION OF NATURE. **Explaining Ocean Warming: Causes, scale, effects and consequences**. Disponível em: https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2016-046_0.pdf. Acesso em 10/02/2022.

LIU, Y. *et al.* **Green house gas emissions from municipal solid waste with a high organic fraction under different management scenarios**. Journal of Cleaner Production, v. 147, p. 451–457, 2017.

LIU, Y. *et al.* **Greenhouse gas emissions from municipal solid waste with a high organic fraction under different management scenarios**. Journal of Cleaner Production, v. 147, p. 451–457, 2017.

LIU, Y. *et al.* **Greenhouse gas emissions from different municipal solidwaste management scenarios in China: Based on carbono and energy flow analysis.** *Waste Management*, v. 68, p. 653–661. China, 2017.

LONGO, G. L. *et al.* **Comparison of greenhouse gas emissions in a cooperative of recycling of materials.** *Revista Virtual de Química*, v. 11, n. 1, p. 190–209. Brasil, 2019.

MACHIDA, T. *et al.* **Development of an Atmospheric Carbon Dioxide Standard Gas Saving System and Its Application to a Measurement at a Site in the West Siberian Forest.** American Meteorological Society, 2003.

MCTIC - MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES. **A ciência e a tecnologia no olhar dos brasileiros. Percepção pública da C&T no Brasil.** Brasília-DF, 2017.

MOULT, J. A. *et al.* **Greenhouse gas emissions of food waste disposal options for UK retailers.** *Food Policy*, v. 77, n. November 2017, p. 50–58, 2018.

NASA - NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **Global Climate Changes. Vital Signs os the Planet.** Disponível em: <https://climate.nasa.gov>. Acessado em 03/02/2022.

PIELKE, R.A. *et al.* **The climatic impacts of land surface change and carbonmanagement, and the implicationsfor climate-change mitigation policy.** *Climate Policy* 3. p. 149–157, 2002.

PMF - PREFEITURA MUNICIPAL DE FLORIANÓPOLIS. **Plano Municipal de Coleta seletiva, Caderno 02 - Diagnóstico do PMGIRS.** 2015.

PROTEGEER - COOPERAÇÃO PARA PROTEÇÃO DO CLIMA NA GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS. **Relatório. Gestão Sustentável de Resíduos Sólidos Urbanos - Desafios e oportunidades para o desenvolvimento do setor no Brasil.** Disponível em <http://protegeer.gov.br/biblioteca>. Acesso em 03/02/2022.

SNIS - SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico do manejo de Resíduos Sólidos Urbanos - 2019.** Brasil, 2019

SPOKAS *et al.* **Methane mass balance at three landfill sites: What is the efficiency of capture by gas collection systems?**, *Waste management*. New York, 2006.

UCAR - UNIVERSITY CORPORATION FOR ATMOSPHERIC RESEARCH. **Very Simple Climate Model.** Disponível em <https://scied.ucar.edu/interactive/simple-climate-model>. Acessado em 03/02/2022.

UOM - University of Michigan. **Greenhouse Gases Factsheet. University of Michigan.** Center for Sustainable Systems. Pub. n° CSS05-21, 2020.

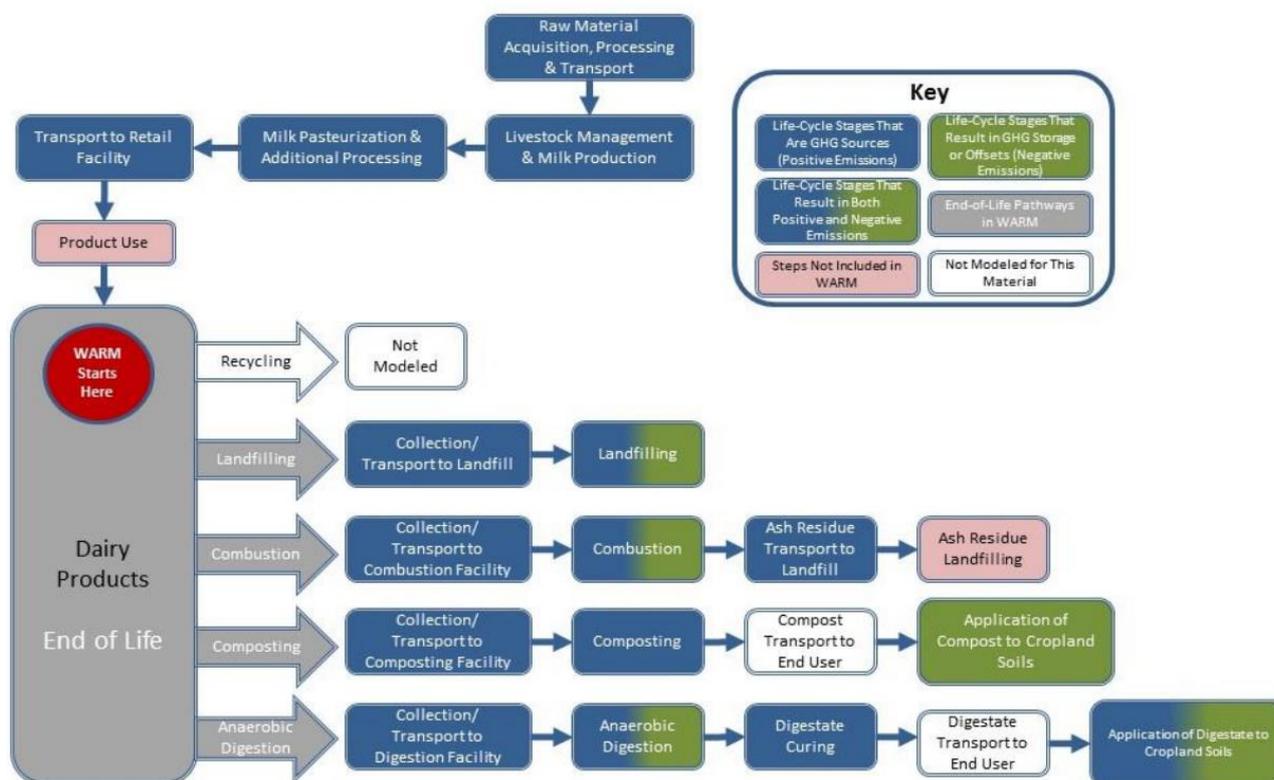
VILHENA, A. **Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado.** São Paulo, 2010.

WANG, G. *et al.* **Observation analysis ofland-atmosphere interactions over the Loess Plateau ofnorthwest China.** China, 2010.

ANEXO I – FLUXOGRAMAS DE ACV DO INVENTÁRIO DO SOFTWARE WARM UTILIZADOS NESTE TRABALHO

- **Orgânicos - resto de alimentos** - média ponderada dos cinco principais fatores de emissão do tipo de alimento desenvolvido para WARM: carne, frango, grãos, frutas e vegetais e laticínios. A ponderação é baseada na gravimetria dessas cinco categorias no fluxo de resíduos alimentares dos EUA.

Figura AI.1 – Fluxo dos resíduos orgânicos – fração resto de alimentos



- **Orgânicos – fração verdes**

Figura AI.2 – Fluxo dos resíduos orgânicos – fração verdes

Exhibit 2-1: Life Cycle of Yard Trimmings in WARM

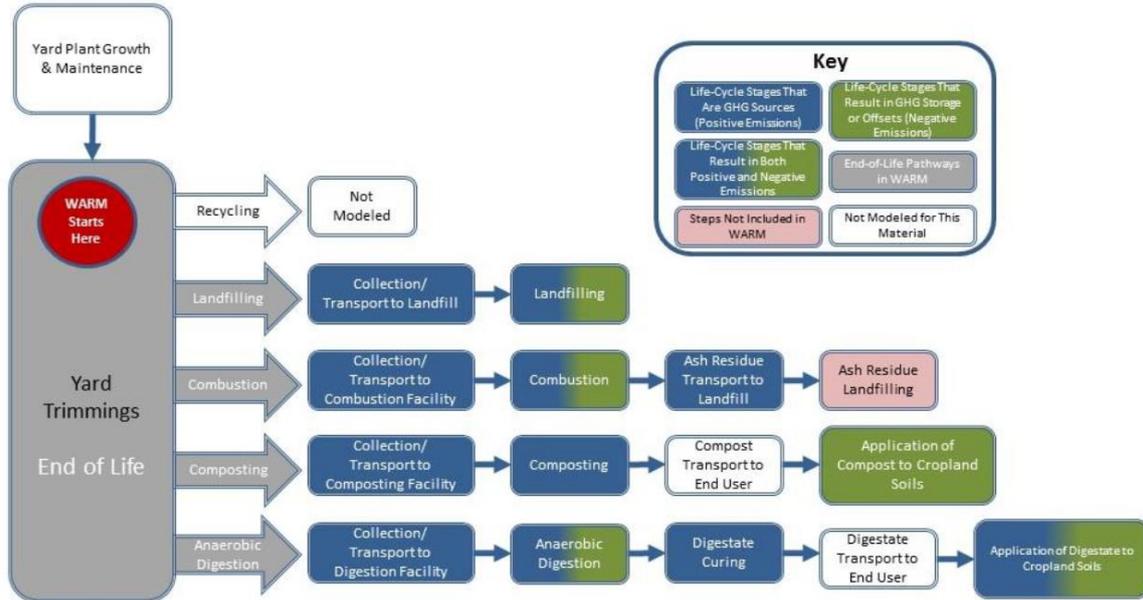


Tabela AI.1 – Emissões unitárias dos resíduos orgânicos – fração resto de alimentos e resíduos orgânicos – fração verdes

Exhibit 2-4: Net Emissions for Yard Trimmings and Mixed Organics under Each Materials Management Option (MTCO₂E/Short Ton)

Material	Net Source Reduction (Reuse) Emissions for Current Mix of Inputs	Net Recycling Emissions	Net Composting Emissions	Net Combustion Emissions	Net Landfilling Emissions	Net Anaerobic Digestion Emissions ^a
Yard Trimmings	NA	NA	(0.05)	(0.17)	(0.20)	(0.09)
Grass	NA	NA	(0.05)	(0.17)	0.12	0.00
Leaves	NA	NA	(0.05)	(0.17)	(0.53)	(0.14)
Branches	NA	NA	(0.05)	(0.17)	(0.54)	(0.22)
Mixed Organics	NA	NA	(0.09)	(0.15)	0.18	(0.06)

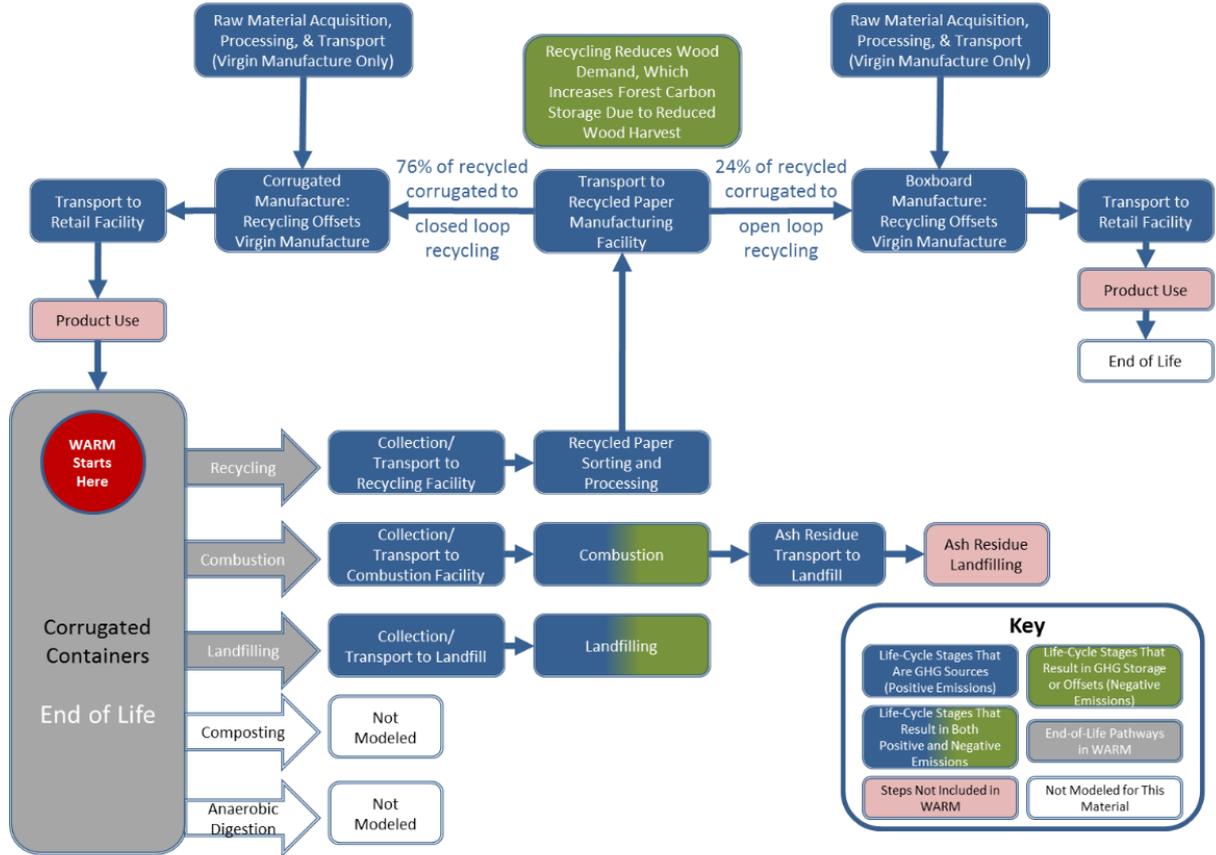
Note: Negative values denote net GHG emission reductions or carbon storage from a materials management practice.

NA = Not applicable.

^a Emission factors for dry digestion with curing of digestate before land application.

- Papelão

Figura A1.3 – Fluxo do resíduo papelão



- Papéis mistos

Figura AI.4 – Fluxo do resíduo papéis mistos

Exhibit 3-5: Life-Cycle of Mixed Paper in WARM

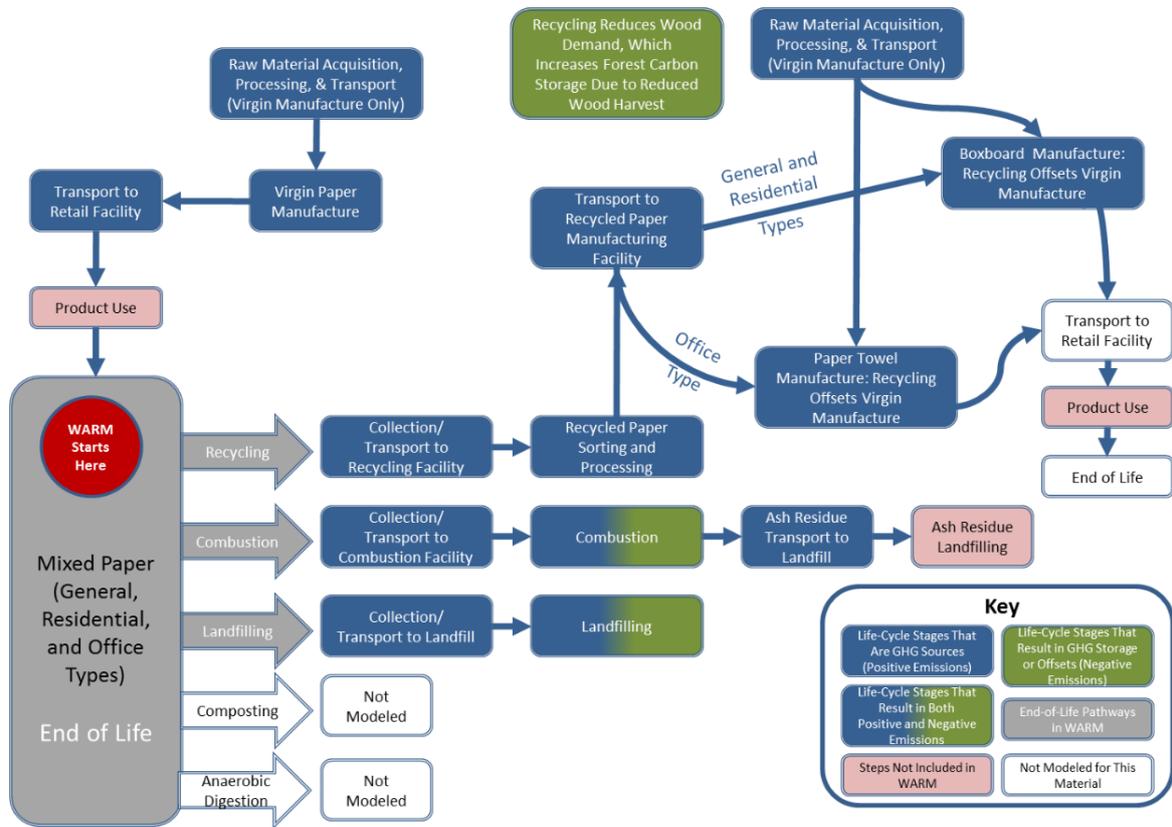


Tabela AI.2 – Emissões unitárias dos resíduos papelão e papéis mistos

Exhibit 3-7: Net Emissions for Paper Products under Each Materials Management Option (MTCO₂E/Short Ton)

Material	Net Source Reduction Emissions For Current Mix of Inputs	Net Recycling Emissions	Net Composting Emissions	Net Combustion Emissions	Net Landfilling Emissions	Net Anaerobic Digestion Emissions
Corrugated Containers	(5.58)	(3.14)	NA	(0.49)	0.18	NA
Magazines/Third-Class Mail	(8.57)	(3.07)	NA	(0.35)	(0.43)	NA
Newspaper	(4.68)	(2.71)	NA	(0.56)	(0.85)	NA
Office Paper	(7.95)	(2.86)	NA	(0.47)	1.13	NA
Phone Books	(6.17)	(2.62)	NA	(0.56)	(0.85)	NA
Textbooks	(9.02)	(3.10)	NA	(0.47)	1.13	NA
Mixed Paper (general)	(6.07)	(3.55)	NA	(0.49)	0.07	NA
Mixed Paper (primarily residential)	(6.00)	(3.55)	NA	(0.49)	0.02	NA
Mixed Paper (primarily from offices)	(7.37)	(3.58)	NA	(0.45)	0.11	NA

Note: Negative values denote net GHG emission reductions or carbon storage from a materials management practice.
 NA = Not applicable.

- Plásticos – PEAD, PEBD, PET, PP, EPS, PVC e plásticos mistos

Figura AI.5 – Fluxo dos resíduos plásticos

Exhibit 5-1: Life Cycle of Plastics in WARM³⁷

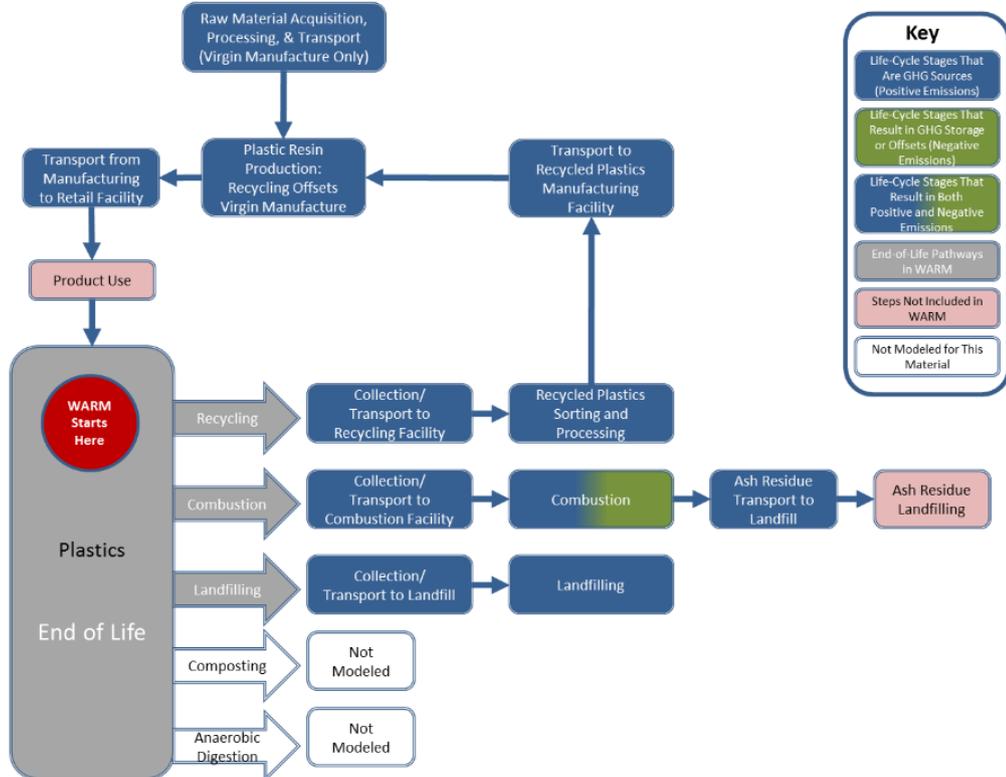


Tabela AI.3 – Emissões unitárias dos resíduos plásticos – PEAD, PEBD, PET, PP, EPS, PVC e plásticos mistos

Exhibit 5-3: Net Emissions for Plastics under Each Materials Management Option (MTCO₂E/Short Ton)

Material	Net Source Reduction (Reuse) Emissions for Current Mix of Inputs	Net Recycling Emissions	Net Composting Emissions	Net Combustion Emissions	Net Landfilling Emissions	Net Anaerobic Digestion Emissions
HDPE	(1.42)	(0.76)	NA	1.29	0.02	NA
LDPE	(1.80)	NA	NA	1.29	0.02	NA
PET	(2.17)	(1.04)	NA	1.24	0.02	NA
LLDPE	(1.58)	NA	NA	1.29	0.02	NA
PP	(1.52)	(0.79)	NA	1.29	0.02	NA
PS	(2.50)	NA	NA	1.65	0.02	NA
PVC	(1.93)	NA	NA	0.66	0.02	NA
Mixed Plastics	(1.87)	(0.93)	NA	1.26	0.02	NA

Note: Negative values denote net GHG emission reductions or carbon storage from a materials management practice.
NA = Not applicable.

- Eletrônicos

Figura AI.6 – Fluxo dos resíduos eletrônicos

Exhibit 1-2: Life Cycle of Electronics in WARM

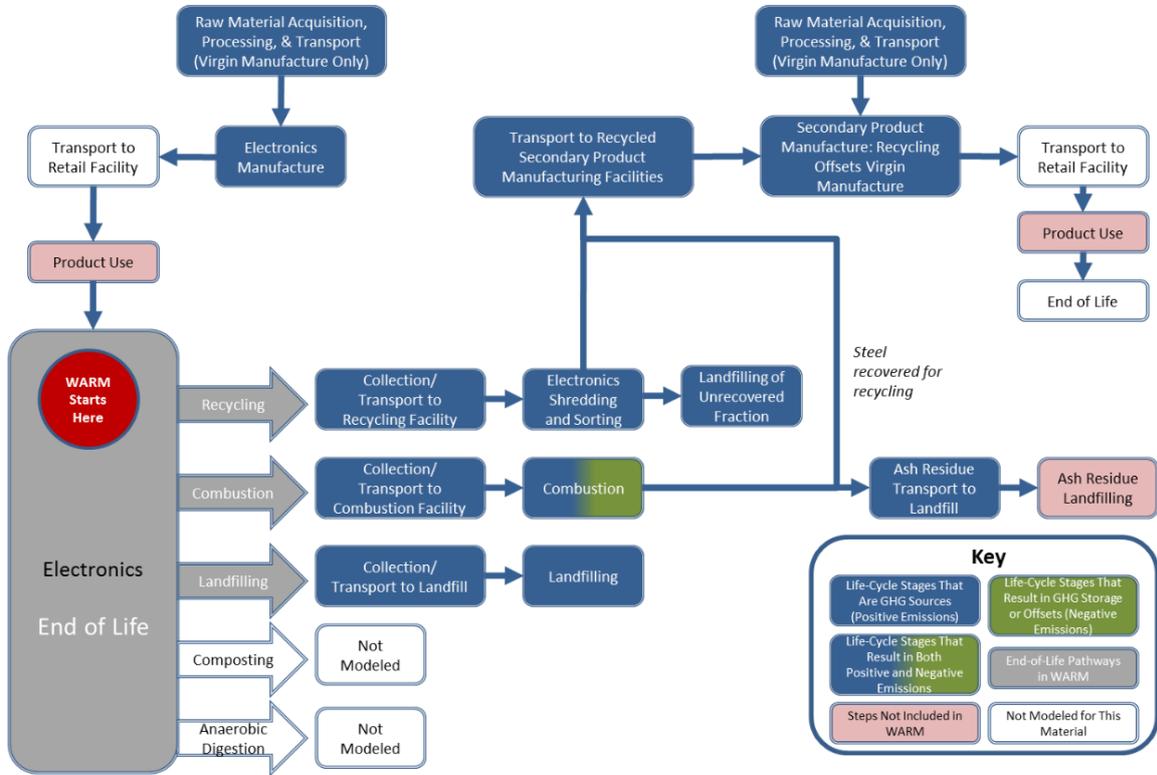


Tabela AI.4 – Emissões unitárias dos resíduos eletrônicos

Exhibit 1-5: Net Emissions for Electronics under Each Materials Management Option (MTCO₂E/Short Ton)

Material	Net Source Reduction Emissions for Current Mix of Inputs ^a	Net Recycling Emissions	Net Composting Emissions	Net Combustion Emissions	Net Landfilling Emissions	Net Anaerobic Digestion Emissions
Desktop CPUs	(20.86)	(1.49)	NA	(0.66)	0.02	NA
Portable Electronic Devices	(29.83)	(1.06)	NA	0.65	0.02	NA
Flat-Panel Displays	(24.19)	(0.99)	NA	0.03	0.02	NA
CRT Displays	NA	(0.57)	NA	0.45	0.02	NA
Electronic Peripherals	(10.32)	(0.36)	NA	2.08	0.02	NA
Hard-Copy Devices	(7.65)	(0.56)	NA	1.20	0.02	NA
Mixed Electronics	NA	(0.79)	NA	0.39	0.02	NA

^a The current mix of inputs for electronics is considered to be 100% virgin material. Source reduction is not available as a management option for CRT displays and mixed electronics because CRT displays are no longer manufactured and therefore their production cannot be avoided.

- Metais

Figura A1.7 – Fluxo dos resíduos metais

Exhibit 2-2: Life Cycle of Steel Cans in WARM

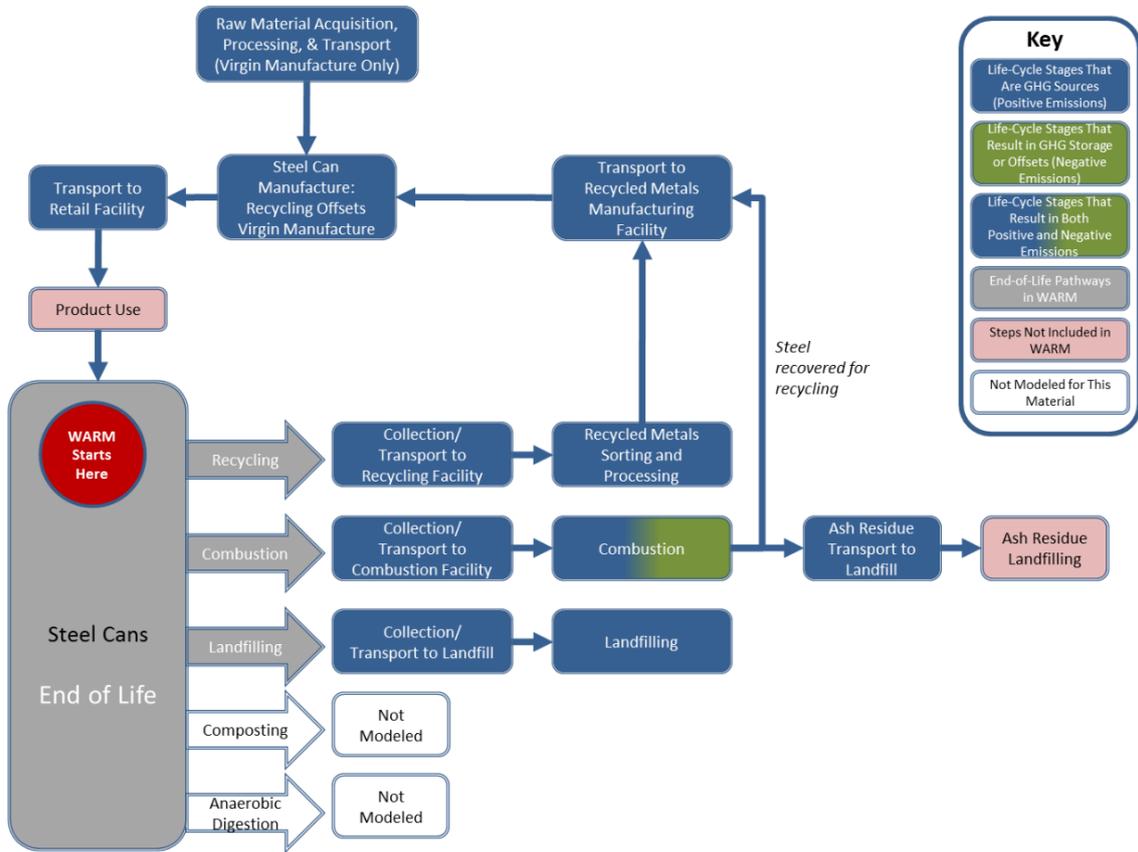


Tabela A1.5 – Emissões unitárias dos resíduos metais

Exhibit 2-7: Net Emissions for Metals under Each Materials Management Option (MTCO₂E/Short Ton)

Material	Net Source Reduction (Reuse) Emissions For Current Mix of Inputs ^a	Net Recycling Emissions	Net Composting Emissions	Net Combustion Emissions	Net Landfilling Emissions	Net Anaerobic Digestion Emissions
Aluminum Cans	(4.80)	(9.13)	NA	0.03	0.02	NA
Aluminum Ingot	(7.48)	(7.20)	NA	0.03	0.02	NA
Steel Cans	(3.03)	(1.83)	NA	(1.59)	0.02	NA
Copper Wire	(6.72)	(4.49)	NA	0.03	0.02	NA
Mixed Metals	(3.65)	(4.39)	NA	(1.02)	0.02	NA

Note: Negative values denote net GHG emission reductions or carbon storage from a materials management practice. NA = Not applicable.

- Vidros

Figura AI.7 – Fluxo dos resíduos vidros

Exhibit 1-1: Life Cycle of Glass in WARM

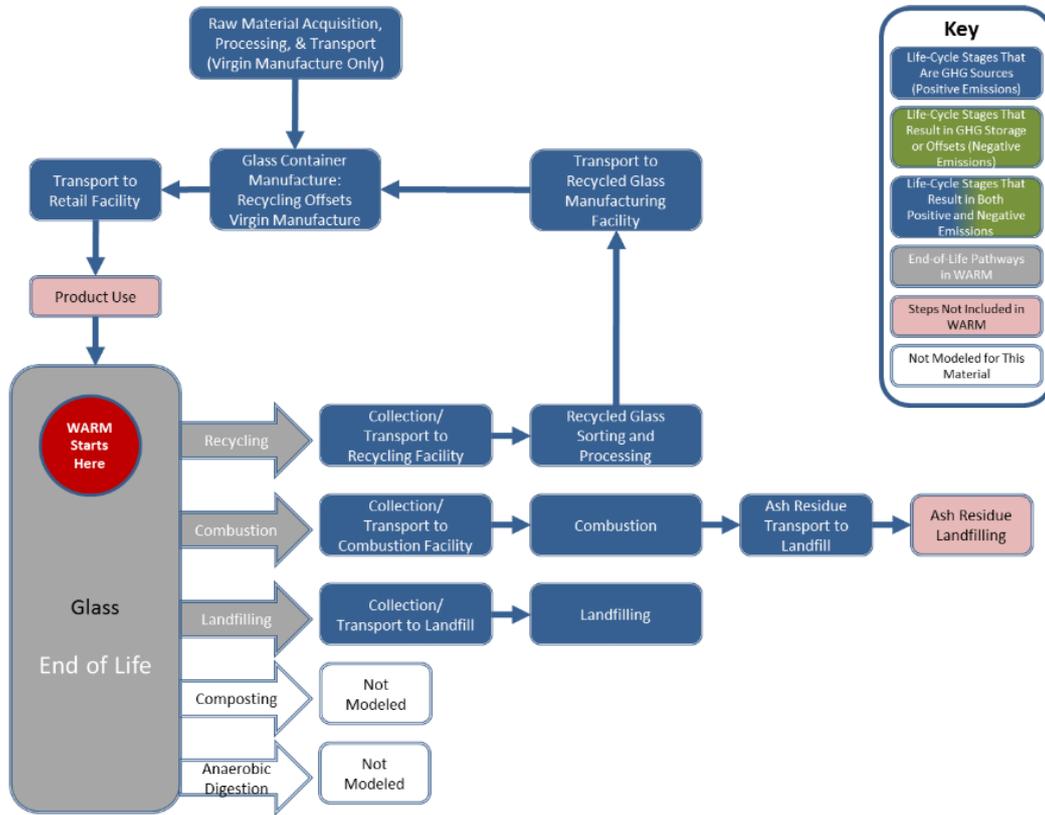


Tabela AI.6 – Emissões unitárias dos resíduos vidros

Exhibit 1-4: Net Emissions for Glass under Each Materials Management Option (MTCO₂E/Short Ton)

Material	Net Source Reduction (Reuse) GHG Emissions For Current Mix of Inputs	Net Recycling GHG Emissions	Net Composting GHG Emissions	Net Combustion GHG Emissions	Net Landfilling GHG Emissions	Net Anaerobic Digestion Emissions
Glass	(0.53)	(0.28)	NA	0.03	0.02	NA

Note: Negative values denote net GHG emission reductions or carbon storage from a materials management practice. NA = This materials management option is not applicable to this material.