



AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE GESTÃO DE RSU DE MEDIANEIRA (PR): FLUXOS DE MATERIAIS, EFICIÊNCIA E PEGADA DE CARBONO

YASMIN ANIARA PEDRO

*Dissertação apresentada à Escola Superior Agrária de Bragança para a obtenção do
Grau de Mestre em Tecnologia Ambiental no âmbito da dupla diplomação com a
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Brasil*

Orientado por:

Prof. Dr. Manuel Feliciano

Prof. Dr. Thiago Edwiges

**Bragança
2026**

Dedico este trabalho aos meus pais,
Cristiane e Otávio, e ao meu irmão,
Guilherme, como apreço por todo
amor, apoio e incentivo ao longo
desta caminhada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, meu Paizinho amado, por Sua presença constante nesta caminhada, sustentando meus passos, fortalecendo minha fé e concedendo-me a certeza de que jamais estive sozinha. A Nossa Senhora, minha Mãe Santíssima e fiel intercessora, pelo seu cuidado materno e amparo ao longo de toda essa trajetória, trazendo serenidade ao meu coração e renovando minhas forças.

À minha mãe, Cristiane, ao meu pai, Otávio, e ao meu irmão, Guilherme, dedico esta conquista com todo o meu amor, respeito e gratidão. Em vocês encontrei os maiores exemplos da vida, caráter, força e dedicação. Minha mãe e melhor amiga, sempre me sustentou com sua dedicação, orações e amor incondicional. Meu pai, com seu constante incentivo à educação, foi fundamental na construção dos meus valores e na formação da pessoa que me tornei. Meu irmão, mesmo quando as palavras foram poucas, sua presença sempre transmitiu cuidado e a certeza de que eu não estava sozinha. Essa realização carrega a marca de amor, dedicação e do apoio que sempre recebi de vocês.

Aos meus professores orientadores, Doutor Manuel Feliciano e Doutor Thiago Edwiges, por toda a dedicação, confiança e pela oportunidade de aprender com o vosso conhecimento. Agradeço também, ao Instituto Politécnico de Bragança e à Universidade Tecnológica Federal do Paraná por me proporcionarem, por meio do acordo de dupla-diplomação, a realização deste trabalho.

Às pessoas que se tornaram minha família durante o mestrado, em especial, Carlos Degtoni, Nicolas Justus, Livia Firmani e Isabella Gomes, pelo apoio e pelos momentos de alegria que tornaram meu tempo em Bragança mais leve e feliz.

Às minhas amigas de Medianeira, Thaynara, Ana Paula, Herica, Kamily e Laysa, por estarem sempre presentes, mesmo à distância, oferecendo apoio, incentivo e demonstrando o verdadeiro valor de amizades sinceras.

Ao meu namorado, João Paulo, agradeço por estar sempre presente, pelo carinho, pela paciência e por sempre me ajudar a lembrar do lado bom das coisas, especialmente nos momentos mais difíceis.

Por fim, agradeço a todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para a minha trajetória acadêmica e pessoal, seja com palavras de incentivo, apoio, amizade ou gestos de cuidado.

A todos, a minha sincera gratidão.

RESUMO

A gestão inadequada dos resíduos sólidos urbanos (RSU) representa um dos principais desafios ambientais e institucionais enfrentados pelos municípios brasileiros, independentemente do seu porte. Nos municípios de pequeno e médio porte, essa problemática pode ser agravada por limitações técnicas, financeiras e operacionais, além de sua frequente sub-representação na literatura científica. Neste contexto, este estudo avalia de forma integrada o desempenho multidimensional e o impacto climático do sistema de gestão de RSU do município de Medianeira (PR), com base em dados do ano de 2024.

A metodologia combina quatro abordagens complementares: análise dos fluxos de materiais e indicadores operacionais; modelação do potencial de geração de biogás pelo modelo cinético LandGEM (U.S. EPA); quantificação da pegada de carbono integrada do sistema pela ferramenta SWEET v5.0 (U.S. EPA), contemplando as etapas de recolha, transporte, triagem e disposição final; e avaliação de indicadores de sustentabilidade nas dimensões ambiental-operacional, social, político-institucional e económica. Adicionalmente, foram simulados quatro cenários alternativos de intervenção técnica e política, de forma a avaliar o potencial de mitigação de emissões de gases de efeito estufa (GEE).

Os resultados revelaram que, das 18.026 toneladas de RSU geradas em 2024 (geração per capita de 0,8646 kg/hab.dia), 88,29% foram encaminhadas para o aterro sanitário e apenas 11,71% desviadas via coleta seletiva operada pela ASSAMA, com uma taxa de reciclagem efetiva de 8,32% - valor superior à média brasileira, mas muito aquém dos padrões europeus. O aterro sanitário constitui a fonte dominante de emissões de GEE do sistema, respondendo por 90,8% das emissões totais, com o metano como poluente largamente predominante. A modelação com o LandGEM projetou um pico de geração de metano de 1.126.866,1 m³/ano em 2034, com potencial energético máximo de 1.755,55 MWh/ano, suficiente para abastecer aproximadamente 735 habitantes.

A simulação dos cenários alternativos demonstrou reduções de emissões variáveis: o desvio de 30% da fração orgânica para compostagem (Cenário 1) reduziria as emissões em 17,7% em 2034; a captação e aproveitamento energético do biogás (Cenário 2) reduziria 58,2%; a expansão da reciclagem para 20% (Cenário 3) produziria o menor impacto isolado (-2,4%); e o cenário combinado de todas as intervenções (Cenário 4) alcançaria uma redução de 66,3% em 2034 face ao cenário base.

A avaliação multidimensional dos indicadores de sustentabilidade resultou numa média global de 54,5% de indicadores favoráveis, configurando um desempenho intermediário. A dimensão económica obteve o melhor desempenho (75%), seguida pelas dimensões social (60%) e político-institucional (50%). A dimensão ambiental-operacional concentrou as principais fragilidades, com apenas 33% de indicadores favoráveis, destacando-se a ausência de um Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos consolidado, o baixo índice de recuperação de recicláveis e a ausência de rotas de valorização para a fração orgânica.

Conclui-se que o sistema de Medianeira configura um sistema em transição, no qual práticas consolidadas, como a universalização da coleta e a inclusão formal dos catadores via ASSAMA, coexistem com limitações estruturais que comprometem a sustentabilidade de longo prazo. A captação de biogás é identificada como a medida de mitigação mais imediata e eficaz disponível, e a valorização da fração orgânica como o principal vetor de melhoria do sistema. Os resultados apresentados oferecem uma referência metodológica replicável para municípios brasileiros de porte semelhante na transição para modelos de gestão mais sustentáveis e alinhados às metas climáticas nacionais.

Palavras-chave: resíduos sólidos urbanos; pegada de carbono; LandGEM; SWEET; indicadores de sustentabilidade; biogás.

ABSTRACT

The inadequate municipal solid waste (MSW) management represents one of the main environmental and institutional challenges faced by Brazilian municipalities, regardless of their size. In small and medium-sized municipalities, this issue may be exacerbated by technical, financial, and operational limitations, as well as by their frequent underrepresentation in the scientific literature. In this context, this study provides an integrated assessment of the multidimensional performance and climate impact of the MSW management system in the municipality of Medianeira (PR), based on data from 2024.

The methodology combines four complementary approaches: analysis of material flows and operational indicators; modelling of biogas generation potential using the LandGEM kinetic model (U.S. EPA); quantification of the system's integrated carbon footprint using the SWEET v5.0 tool (U.S. EPA), covering the stages of collection, transport, sorting, and final disposal; and evaluation of sustainability indicators across the environmental-operational, social, political-institutional, and economic dimensions. Additionally, four alternative technical and policy intervention scenarios were simulated to assess the greenhouse gas (GHG) emissions mitigation potential.

The results revealed that, of the 18,026 tonnes of MSW generated in 2024 (per capita generation of 0.8646 kg/inhabitant/day), 88.29% were sent to landfill and only 11.71% diverted through selective collection operated by ASSAMA, with an effective recycling rate of 8.32% - a value above the Brazilian average, but well below European standards. The landfill constitutes the dominant source of GHG emissions in the system, accounting for 90.8% of total emissions, with methane as the largely predominant pollutant. LandGEM modelling projected a methane generation peak of 1,126,866.1 m³/year in 2034, with a maximum energy potential of 1,755.55 MWh/year, sufficient to supply approximately 735 inhabitants.

The simulation of alternative scenarios demonstrated variable emission reductions: diverting 30% of the organic fraction to composting (Scenario 1) would reduce emissions by 17.7% in 2034; biogas capture and energy recovery (Scenario 2) would reduce them by 58.2%; expanding recycling to 20% (Scenario 3) would produce the smallest isolated impact (-2.4%); and the combined scenario of all interventions (Scenario 4) would achieve a reduction of 66.3% in 2034 relative to the baseline.

The multidimensional assessment of sustainability indicators yielded a global average of 54.5% favourable indicators, reflecting an intermediate level of performance. The economic dimension achieved the best result (75%), followed by the social (60%) and political-institutional dimensions (50%). The environmental-operational dimension concentrated the main weaknesses of the system, with only 33% favourable indicators, notably the absence of a consolidated Municipal Integrated Waste Management Plan, a low material recovery rate, and the lack of valorisation routes for the organic fraction.

It is concluded that Medianeira's system constitutes a system in transition, in which consolidated practices, such as universal collection coverage and the formal inclusion of waste pickers through ASSAMA, coexist with structural limitations that compromise long-term sustainability. Biogas capture is identified as the most immediate and effective mitigation measure available, and organic fraction valorisation as the main driver for system improvement. The findings offer a replicable methodological framework for similarly sized Brazilian municipalities in their transition towards more sustainable management models aligned with national climate targets.

Keywords: municipal solid waste; carbon footprint; LandGEM; SWEET; sustainability indicators; biogas.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	II
RESUMO.....	IV
ABSTRACT	VI
ÍNDICE DE SIGLAS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS	XII
ÍNDICE DE FIGURAS	XIII
ÍNDICE DE TABELAS	XV
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Enquadramento e relevância do tema.....	1
1.2 Objetivos	4
1.2.1 Objetivo geral	4
1.2.2 Objetivos específicos	4
1.3 Estrutura da dissertação	5
2 GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO BRASIL: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1 Conceitos e tipologias de RSU.....	7
2.2 Políticas Públicas e regulamentações da gestão de resíduos.....	11
2.2.1 Quadro normativo no Brasil e Estado do Paraná	11
2.2.2 Princípios e objetivos de monitorização da PNRS	13
2.2.3 Instrumentos e indicadores de monitorização	15
2.2.3.1 Principais Instrumentos.....	15
2.2.3.2 Indicadores de Monitorização.....	16
2.3 Tecnologias de recuperação e tratamento de resíduos sólidos urbanos	17
2.3.1 Recuperação de materiais: Reciclagem.....	18
2.3.2 Valorização da fração orgânica dos resíduos.....	19
2.3.2.1 Compostagem	20
2.3.2.2 Digestão anaeróbia	21
2.3.3 Tecnologia Termoquímica - Incineração	23

2.3.4 Disposição Final em Aterros Sanitários	24
2.4 Avaliação de sistemas de gestão de resíduos sólidos urbanos.....	26
2.4.1 Dimensão operacional: fluxo materiais e eficiência técnica	27
2.4.2 Dimensão ambiental: impactos, ACV e Pegada de Carbono	28
2.4.3 Dimensão económica: custos, benefícios e sustentabilidade financeira.....	30
2.4.4 Dimensão social: inclusão, equidade e participação.....	30
2.4.5 Dimensão institucional: governança, regulação e contexto territorial	31
2.4.6 Integração multicritério e benchmarking de cenários.....	32
2.5 Estudos relevantes em gestão de RSU: desafios e estratégias em diferentes contextos	33
2.5.1 Panorama Europeu	33
2.5.2 Panorama Asiático	34
2.5.3 Panorama Norte Americano	34
3 METODOLOGIA	36
3.1 Abordagem geral e desenho metodológico.....	36
3.2 Caracterização da área de estudo	37
3.2.1 Município de Medianeira (Brasil).....	37
3.3 Fontes de Dados e Procedimentos de Recolha	38
3.4 Inventário de informação necessária para o cálculo dos indicadores e métricas de avaliação	39
3.5 Estimativa do potencial energético dos resíduos com valorização do biogás.....	39
3.5.1 Estimativa do volume de resíduos sólidos gerados.....	40
3.5.2 Modelagem da produção de biogás via LandGEM.....	41
3.5.3 Estimativa de potência e energia disponíveis no aterro	43
3.6 Quantificação da pegada de carbono associada ao sistema de gestão de RSU	43
3.6.1 Delimitação das fronteiras do sistema	44
3.6.2 Identificação das fontes de emissão	45
3.6.3 Quantificação das emissões de gases de efeito estufa com SWEET	46
3.6.4 Definição dos cenários de mitigação	46

3.7 Construção e aplicação dos indicadores de sustentabilidade	47
3.7.1 Estruturação do sistema de indicadores e composição por dimensões.....	48
3.7.2 Método de avaliação e agregação dos resultados	51
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4.1 Caracterização institucional e arranjos operacionais de Medianeira	52
4.1.1 Modelos de governança e eficiência da coleta convencional (fração indiferenciada). 53	
4.1.2 O arranjo sociotécnico da coleta seletiva e desempenho da ASSAMA.....	54
4.1.3 Diagnóstico da infraestrutura de disposição final e passivos ambientais.....	55
4.1.4 Discussão integrada das limitações do sistema	56
4.2 Análise dos fluxos de materiais e desempenho operacional.....	58
4.2.1 Geração de resíduos	58
4.2.2 Distribuição dos fluxos de resíduos.....	61
4.2.3 Discussão integrada do fluxo de materiais e desempenho operacional	62
4.3 Potencial de geração de biogás e recuperação energética.....	64
4.3.1 Projeção populacional e estimativa da geração de RSU	64
4.3.2 Estimativa da geração de biogás no aterro	65
4.3.3 Potencial de recuperação energética do biogás	66
4.3.4 Geração de metano e potencial energético: LandGEM e SWEET	67
4.3.5 Discussão integrada do potencial de geração do biogás e recuperação energética	69
4.4 Quantificação da pegada de carbono do sistema de gestão de RSU	73
4.4.1 Emissões totais do sistema	73
4.4.2 Emissões por setor	75
4.4.3 Emissões por poluente.....	77
4.4.4 Análise integrada das emissões do sistema.....	80
4.5 Análise dos cenários alternativos de emissões de GEE	82
4.5.1 Dinâmica temporal das emissões por cenário	82
4.5.2 Comparação crítica e implicações dos cenários.....	85
4.6 Avaliação dos indicadores de sustentabilidade do sistema de gestão de RSU	86

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	91
5.1 Principais conclusões.....	91
5.2 Propostas de melhoria para o sistema de gestão de RSU de Medianeira.....	93
5.3 Sugestões para investigações futuras.....	94
5.4 Considerações finais.....	94
REFERÊNCIAS	96
APÊNDICES	111

ÍNDICE DE SIGLAS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

RSU: Resíduos Sólidos Urbanos

PNRS: Política Nacional de Resíduos Sólidos

PERSU: Plano Estratégico para os Resíduos Urbanos

BR: Brasil

IPCC: Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (Intergovernmental Panel on Climate Change)

SINIR: Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos

MMA: Ministério do Meio Ambiente

APA: Agência Portuguesa do Ambiente

ACV: Análise do Ciclo de Vida

UNEP: Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (United Nations Environment Programme)

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

NBR: Norma Brasileira Regulamentadora

SISNAMA: Sistema Nacional do Meio Ambiente

SINISA: Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico

SINIMA: Sistema Nacional de Informação sobre Meio Ambiente

PLANARES: Plano Nacional de Resíduos Sólidos

DA: Digestão Anaeróbia

GEE: Gases de Efeito Estufa

GRSU: Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

PMSB: Plano Municipal de Saneamento Básico

ASSAMA: Associação dos Agentes do Meio Ambiente de Medianeira

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Fluxograma do processo de compostagem	21
Figura 2. Sequências metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia.....	22
Figura 3. Mecanismo geral da combustão de resíduos sólidos municipais.....	23
Figura 4. Fatores técnicos, ambientais, económicos, políticos e sociais que influenciam a transição de formas inadequadas de disposição final de resíduos para sistemas tecnicamente controlados	25
Figura 5. Síntese esquemática das etapas metodológicas do estudo	37
Figura 6. Localização do município de Medianeira - PR.....	38
Figura 7. Evolução temporal da geração total de RSU e indicador específico per capita em Medianeira (2022-2024)	59
Figura 8. Composição gravimétrica dos RSU de Medianeira (2024)	59
Figura 9. Análise de pareto da composição gravimétrica dos RSU de Medianeira (2024).	60
Figura 10. Eficiência operacional da triagem ASSAMA	61
Figura 11. Fluxo de materiais do sistema de gestão de RSU em Medianeira	61
Figura 12. Evolução temporal da geração de metano (CH ₄) e gás total, em volume, no aterro sanitário de Medianeira	66
Figura 13. Evolução da potência e energia disponível a partir do biogás do aterro sanitário de Medianeira (2006-2100)	67
Figura 14. Comparação da geração do metano no aterro estimada pelos modelos LandGEM e SWEET	68
Figura 15. Comparação da energia disponível no aterro estimada pelos modelos LandGEM e SWEET	69
Figura 16. Evolução temporal das emissões totais do sistema de gestão de RSU (2006-2120)	75
Figura 17. Evolução temporal das emissões setoriais no sistema de gestão de RSU de Medianeira no período 2006-2120	77
Figura 18. Emissões por poluente do aterro sanitário	78
Figura 19. Emissões por poluente da coleta e transporte de resíduos	78
Figura 20. Emissões por poluente do manuseio de equipamentos	79
Figura 21. Emissões totais por poluente.....	80

Figura 22. Evolução temporal das emissões totais por cenário no período de intervenção (2024-2050)	83
Figura 23. Evolução temporal das emissões totais por cenário do sistema de gestão de RSU de Medianeira (2006-2120)	84
Figura 24. Reduções anuais de emissões face ao cenário base por cenário	84

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Classificação e características dos resíduos.....	9
Tabela 2. Princípios da Política Nacional de Resíduos Sólidos	13
Tabela 3. Objetivos da Política Nacional de Resíduos Sólidos	14
Tabela 4. Principais indicadores de monitorização da PNRS/SNIS	16
Tabela 5. Principais tecnologias de tratamento, valorização e disposição final de RSU	18
Tabela 6. Tipos de reciclagem e suas características.....	19
Tabela 7. Etapas da digestão Anaeróbia	22
Tabela 8. Tipos de aterros sanitários	26
Tabela 9. Indicadores operacionais principais.....	27
Tabela 10. Indicadores operacionais elaborados com base em SNIS/ABRELPE.....	28
Tabela 11. Indicadores ambientais típicos em avaliação de RSU	29
Tabela 12. Inventário de dados por indicador/métrica	39
Tabela 13. Parâmetros adotados no software LandGEM	43
Tabela 14. Matriz de fontes e poluentes monitorados do sistema de gestão de RSU	45
Tabela 15. Parâmetros de conversão GWP100.....	45
Tabela 16. Cenários de mitigação simulados no SWEET v5.0.	47
Tabela 17. Indicadores de sustentabilidade para a dimensão social	48
Tabela 18. Indicadores de sustentabilidade para a dimensão ambiental-operacional	49
Tabela 19. Indicadores de sustentabilidade para a dimensão político-institucional	50
Tabela 20. Indicadores de sustentabilidade para a dimensão económica.....	50
Tabela 21. Cronograma da coleta de resíduos orgânicos e rejeitos.....	54
Tabela 22. Cronograma operacional da coleta de resíduos recicláveis	55
Tabela 23. Matriz de avaliação de conformidade de Medianeira face à Lei nº 12.305/2010	56
Tabela 24. Indicadores operacionais do sistema de gestão de RSU de Medianeira	62
Tabela 25. Projeção populacional, GPC e geração total de RSU	64
Tabela 26. Comparação entre LandGEM e SWEET para anos representativos.....	69
Tabela 27. Emissões totais anuais do sistema de gestão de RSU de Medianeira.....	74
Tabela 28. Emissões anuais por setor no cenário base em tCO ₂ eq.	75
Tabela 29. Emissões totais de GEE (tCO ₂ eq) por cenário e respectiva variação percentual em relação ao cenário base	85

Tabela 30. Resultados para os indicadores de sustentabilidade para dimensão social no município de Medianeira	86
Tabela 31. Resultados para os indicadores de sustentabilidade para dimensão ambiental-operacional no município de Medianeira	87
Tabela 32. Resultados para os indicadores de sustentabilidade para dimensão político-institucional no município de Medianeira	88
Tabela 33. Resultados para os indicadores de sustentabilidade para dimensão económica no município de Medianeira	89
Tabela 34. Desempenho agregado por dimensão de sustentabilidade para o município de Medianeira	89
Tabela A.1. – Emissões totais anuais de gases de efeito estufa nos cenários avaliados entre 2006 e 2050	111

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento e relevância do tema

A gestão dos resíduos sólidos urbanos (RSU) constitui um domínio central das políticas ambientais e urbanas contemporâneas, envolvendo decisões técnicas (infraestrutura de tratamento e disposição final), institucionais (governança e regulação), económicas (custos operacionais e investimentos) e ambientais (emissões de gases de efeito estufa, risco de contaminação de solo e águas). À medida que a população cresce, a quantidade de resíduos gerados também aumenta, tornando ainda mais urgente o cuidado com os impactos ambientais e a adoção de práticas sustentáveis que minimizem ou reduzam esses efeitos (Carvalho et al., 2015). Nesse contexto, a crescente produção de resíduos e a pressão por modelos circulares levam à adoção de estratégias integradas que priorizam a prevenção, a separação na origem, a recuperação de materiais e a valorização energética, bem como a disposição final adequada dos rejeitos que permanecerão (IPCC, 2019; União Europeia, 2008).

A partir de meados da década de 1980, o agravamento dos problemas socioambientais causados pela destinação final dos resíduos impulsionou a inclusão dessa questão nos debates sobre saneamento, especialmente no Brasil, como resposta à vigilância de “lixões” nas décadas de 1970 e 1980 (Nagashima et al., 2011). Essa situação evidenciou a necessidade de políticas estruturadas e permanentes que orientem a gestão adequada dos resíduos sólidos.

No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS; Brasil, 2010) institui princípios e instrumentos de responsabilidade compartilhada entre produtores, distribuidores, poder público e consumidores, contemplando metas, planos e mecanismos como a logística reversa e o encerramento dos lixões. Apesar dos avanços normativos, a implementação municipal é heterogênea: relatórios e inventários nacionais mostram que uma parcela significativa dos resíduos ainda é destinada de forma inadequada e que a cobertura por aterros sanitários, sistemas de triagem e unidades de tratamento varia consideravelmente entre regiões e municípios (Brasil, 2010; MMA, 2024; SINIR, 2021). Essa divergência operacional revela limitações estruturais, financeiras e institucionais que dificultam a transição para modelos de economia circular e de valorização energética efetiva.

Em contraste, em Portugal e noutros países europeus, a política de resíduos urbanos tem evoluído sob uma orientação comunitária mais integrada, estruturada por instrumentos como o Plano Estratégico para os Resíduos Urbanos (PERSU 2020 e PERSU 2030) e pela transposição das diretivas europeias relativas à hierarquia dos resíduos (Diretiva (UE) 2018/851). Estes planos enfatizam a prevenção, a reutilização e a valorização material e energética, procurando reduzir o envio de materiais para aterro e atingir as metas de neutralidade climática até 2050 (Associação Portuguesa do Ambiente [APA], 2014, 2021; *European Commission*, 2020). A eficácia destas estratégias, no entanto, depende da capacidade institucional, da cooperação intermunicipal e do investimento tecnológico, dimensões que também representam desafios no contexto brasileiro.

Sob uma perspectiva ambiental, os sistemas de gestão de RSU exercem um papel determinante na mitigação dos impactos sobre os ecossistemas e a saúde pública. A decomposição anaeróbia em aterros sem controle adequado gera emissões significativas de metano (CH_4), gás com potencial de aquecimento global de 28 a 34 vezes superior ao do dióxido de carbono (CO_2) (IPCC, 2019). Além disso, a contaminação de águas subterrâneas por lixiviados e as emissões difusas de compostos orgânicos voláteis representam riscos ambientais diretos (Bogner et al., 2022). Metodologias de inventário de carbono e modelos como o First-Order Decay (FOD) têm sido amplamente utilizados para estimar emissões e avaliar cenários de mitigação baseados em captura e valorização energética do biogás (Amini et al., 2013; IPCC, 2019). No contexto global, a redução da pegada de carbono dos sistemas de RSU constitui, portanto, um indicador estratégico de sustentabilidade ambiental (EPA, 2023).

Do ponto de vista económico, a gestão de resíduos envolve custos elevados de recolha, transporte e disposição final, representando entre 20 e 50% dos orçamentos municipais destinados ao saneamento (Kaza et al., 2018). A ausência de infraestrutura adequada implica o aumento dos custos externos, ambientais e sanitários, enquanto a adoção de tecnologias de valorização como a compostagem, digestão anaeróbia e recuperação energética pode gerar benefícios sistémicos, diversificando as fontes de receita pública e reduzindo a dependência de aterros (UNEP, 2021). A implantação de modelos de economia circular estimula cadeias locais de reciclagem e inovação tecnológica, com impactos positivos na geração de emprego e na dinamização das economias locais (OECD, 2022).

Numa dimensão operacional, as dificuldades concentram-se na baixa eficiência dos sistemas de coleta seletiva, na obsolescência de frotas e infraestruturas e na fragmentação institucional entre os níveis de governo e prestadores de serviço (MMA, 2024). O planejamento integrado e o uso de ferramentas de modelação territorial, monitorização digital e rastreabilidade dos fluxos tornaram-se essenciais para aperfeiçoar as rotas logísticas e reduzir custos operacionais e emissões associadas (World Bank, 2023; Pheakdey et al., 2023). A viabilidade técnica das soluções de tratamento e valorização depende, assim, da coerência entre o enquadramento legal, as condições locais e a capacidade de gestão dos sistemas municipais.

Dessa forma, a análise integrada dos instrumentos legais, das práticas operacionais e dos impactos ambientais, económicos e institucionais permite identificar discontinuidades e oportunidades de melhoria. É nesse contexto que o presente estudo aborda o sistema de gestão de resíduos sólidos urbanos de Medianeira, buscando compreender os determinantes técnico-legislativos e socioeconómicos que influenciam as suas rotas de tratamento e disposição final, bem como avaliar o seu potencial de valorização energética e mitigação climática no quadro das políticas nacionais e internacionais de sustentabilidade (*European Commission*, 2020; IPCC, 2019; Pheakdey et al., 2023).

A escolha do município de Medianeira (PR) justifica-se por critérios técnicos e científicos complementares. Em termos de representatividade regional, o município configura um exemplo típico dos concelhos de médio porte em expansão na região Sul do Brasil, cuja dinâmica de gestão de RSU ainda é subrepresentada na literatura face aos grandes centros metropolitanos. Do ponto de vista operacional, a disponibilidade de dados sobre fluxo de resíduos, infraestrutura de tratamento e indicadores ambientais viabiliza uma análise integrada e com potencial preditivo. Por fim, identifica-se uma lacuna relevante na investigação aplicada a municípios desta escala, frequentemente menos explorados na literatura científica em comparação com grandes centros metropolitanos, configurando assim um caso potencialmente replicável para avaliações semelhantes em outros municípios brasileiros.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Para responder a este desafio, esta dissertação propõe uma abordagem metodológica integrada, tendo-se estabelecido como objetivo geral avaliar o desempenho multidimensional e o impacto climático do sistema de gestão de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) do município de Medianeira (PR), através da integração de fluxos de materiais, modelação de emissões de gases de efeito de estufa e indicadores de sustentabilidade, visando a proposição de cenários de melhoria alinhados com as metas nacionais.

1.2.2 Objetivos específicos

Para a consecução do objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar o enquadramento institucional e operacional do sistema de RSU de Medianeira, identificando os atores envolvidos, os arranjos vigentes e a sua conformidade com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010).
- Quantificar os fluxos e a composição gravimétrica dos RSU gerados (orgânicos, recicláveis secos e rejeitos), mapeando as suas rotas atuais de recolha, triagem, tratamento e disposição final.
- Calcular os indicadores operacionais de referência (geração per capita, taxa de reciclagem e taxa de desvio de aterro), avaliando o desempenho atual de Medianeira face às metas do Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES).
- Projetar a curva temporal de geração de biogás e o potencial de recuperação de energia elétrica no aterro sanitário de Medianeira, aplicando o modelo cinético de primeira ordem LandGEM (U.S. EPA).
- Quantificar a pegada de carbono integrada do sistema de RSU (incluindo as emissões de gases com efeito estufa - GEE, carbono negro e carbono orgânico)

nas etapas de recolha, transporte, triagem e disposição final, utilizando a ferramenta SWEET (U.S. EPA).

- Desenvolver e aplicar uma matriz multidimensional de Indicadores de Sustentabilidade (abrangendo as dimensões ambiental-operacional, económica, social e político-institucional), de modo a diagnosticar os pontos críticos do município.
- Simular cenários alternativos de intervenção técnica e política (ex: aumento da compostagem, ampliação da reciclagem operada pela ASSAMA e valorização energética), avaliando o seu impacto na redução de emissões e na aproximação às metas climáticas brasileiras.

1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação está organizada em cinco capítulos, estruturados de modo a conduzir o leitor desde a contextualização teórica e a definição dos processos metodológicos até à apresentação e discussão dos resultados e das conclusões do estudo.

Inicialmente, o capítulo 1 apresenta a introdução geral da investigação, contemplando o enquadramento do problema, os objetivos geral e específicos, bem como a relevância científica e prática da análise da gestão de resíduos sólidos urbanos no contexto brasileiro. Integra também este capítulo a descrição da estrutura da dissertação e do encadeamento lógico das diferentes etapas da pesquisa.

Na sequência, o capítulo 2 reúne a revisão da literatura e o enquadramento teórico e conceptual relacionado com a gestão de RSU, as políticas ambientais e os instrumentos de avaliação ambiental, com destaque para a pegada de carbono. São igualmente abordados os principais instrumentos legislativos e normativos que orientam a gestão de RSU no Brasil, além das tendências contemporâneas relacionadas com a valorização dos resíduos, a economia circular e a descarbonização do setor.

Quanto aos procedimentos da investigação, o capítulo 3 descreve a abordagem metodológica adotada para a realização da pesquisa, detalhando as etapas de coleta de dados e as técnicas de análise utilizadas. A pesquisa segue uma abordagem do modelo de gestão de RSU na cidade de Medianeira, Paraná, Brasil.

Os resultados obtidos são apresentados e discutidos no capítulo 4, considerando as quatro vertentes metodológicas que compõem o estudo. Inicia-se pela caracterização institucional e operacional do sistema de gestão de RSU de Medianeira, seguida da análise dos fluxos materiais e do desempenho operacional. Sequencialmente, são apresentados os resultados da modelação do potencial de geração do biogás e recuperação energética pelo LandGEM, da quantificação da pegada de carbono pelo SWEET v5.0 e da simulação dos cenários alternativos de mitigação de GEE. O capítulo encerra com a avaliação multidimensional dos indicadores de sustentabilidade, sintetizando o desempenho global do sistema nas dimensões ambiental-operacional, social, político-institucional e económica.

Por sua vez, o capítulo 5 sintetiza as principais conclusões do estudo, destacando os resultados obtidos para o sistema de gestão de resíduos sólidos urbanos em Medianeira. Este capítulo inclui ainda propostas de melhoria para o sistema de gestão de RSU em Medianeira, com base nas boas práticas identificadas, bem como sugestões para futuras investigações relacionadas com a redução da pegada de carbono e a transição para modelos de gestão mais sustentáveis.

Após os cinco capítulos, são apresentadas as referências bibliográficas que fundamentaram o desenvolvimento teórico, metodológico e analítico da investigação. Ao final da dissertação, encontram-se os anexos, nos quais são disponibilizados materiais complementares considerados relevantes para a compreensão.

2 GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO BRASIL: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica e conceptual sobre a gestão de resíduos sólidos urbanos, com enfoque no contexto brasileiro. A revisão bibliográfica estrutura-se em cinco eixos temáticos: a caracterização conceptual e tipológica dos RSU; o quadro normativo e as políticas públicas vigentes; as principais tecnologias de recuperação e tratamento; os critérios e dimensões de avaliação dos sistemas de gestão; e, por fim, um panorama comparativo de estudos internacionais relevantes.

2.1 Conceitos e tipologias de RSU

A palavra “resíduo” tem origem no latim *residuum*, que significa “aquilo que resta”. O seu uso remonta ao século XIV, inicialmente associado à perda de valor de uma substância ou objeto até que se torne impróprio para uso em determinado local e período (de Jesus, 2012). Com o passar dos séculos, o conceito foi ampliado para designar materiais descartados após processos de consumo, uso ou transformação, especialmente no contexto ambiental, urbano e industrial (Houaiss et al., 2009).

No âmbito da gestão ambiental contemporânea, a expressão “Resíduos Sólidos Urbanos” (RSU) refere-se aos resíduos gerados por atividades domésticas, comerciais, de serviços e pequenos setores urbanos. Esses resíduos incluem diferentes frações orgânicas (biodegradáveis), recicláveis (papel, papelão, plásticos, metais e vidro), rejeitos e resíduos perigosos de origem urbana (UNEP, 2021; World Bank, 2024).

Este conceito de RSU tem evoluído significativamente ao longo das últimas décadas, acompanhando as transformações socioeconómicas, os padrões de consumo e os avanços normativos. No Brasil, a legislação vigente define resíduos sólidos como:

“qualquer material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, cuja destinação final se procede, se propõe a proceder ou está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, nem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível” (Brasil, 2010).

No contexto europeu, a Diretiva-Quadro de Resíduos (Diretiva 2008/98/CE) define o resíduo como "qualquer substância ou objeto de que o seu detentor se desfaz ou

tem a intenção ou a obrigação de se desfazer", enfatizando o critério jurídico da intenção ou obrigação de descarte (União Europeia, 2018).

Os RSU correspondem, em termos gerais, aos resíduos gerados em zonas residenciais, comerciais, institucionais e de serviços, com características predominantemente não perigosas (Kaza et al., 2018). Entre suas principais frações encontram-se resíduos orgânicos (restos de alimentos e poda), recicláveis secos (plásticos, papéis, metais e vidro) e rejeitos não recuperáveis, conforme caracterizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2023) e pela Agência Portuguesa do Ambiente (APA, 2021). Esta divisão funcional constitui a base para a implementação de sistemas de coleta seletiva e das estratégias de valorização, contribuindo para políticas públicas orientadas pelos princípios da economia circular.

Para fins analíticos e operacionais, os resíduos sólidos podem ser classificados segundo diferentes critérios normativos, que auxiliam no planejamento e na gestão integrada dos sistemas de resíduos. Entre os principais critérios, destacam-se:

- Origem: domiciliar, comercial, institucional, de varrição ou de serviços públicos (Brasil, 2010);
- Constituição física e composição química: orgânicos, inorgânicos, recicláveis, rejeitos ou resíduos mistos (Associação Brasileira de Normas Técnicas [ABNT], 2004);
- Periculosidade: perigosos (Classe I) e não perigosos (Classe II), conforme risco potencial à saúde humana e ao ambiente (ABNT, 2024; European Commission, 2014);
- Tratabilidade: passíveis de reaproveitamento, compostagem, digestão anaeróbia ou destinados à disposição final.

No Brasil, a classificação dos resíduos sólidos quanto à periculosidade é orientada pelas normas ABNT NBR 10.004-1:2024 e ABNT NBR 10.004-2:2024, que substituíram a ABNT NBR 10.004:2004. A primeira parte estabelece os requisitos e procedimentos para a classificação dos resíduos, enquanto a segunda apresenta o Sistema Geral de Classificação de Resíduos (SGCR), que reúne dados, critérios e informações complementares para a realização desse processo. De acordo com a edição atualizada, os resíduos são classificados em Classe 1 – perigosos e Classe 2 – não perigosos. A classificação considera a origem, a composição e as características dos resíduos, incluindo a análise da Lista Geral de Resíduos, da presença de poluentes orgânicos

persistentes, das propriedades físico-químicas e infectocontagiosas e da toxicidade. A Tabela 1 sintetiza as classes, suas principais características e alguns exemplos.

Tabela 1. Classificação e características dos resíduos.

Classe de resíduo	Características	Exemplos
Classe I Resíduo perigoso	Resíduo que apresenta uma ou mais características de periculosidade, podendo envolver inflamabilidade, corrosividade, reatividade, patogenicidade, toxicidade ou presença de poluentes orgânicos persistentes, conforme os critérios estabelecidos no processo de classificação.	Resíduos contendo solventes inflamáveis, óleos usados, materiais contaminados por substâncias perigosas, resíduos com metais pesados, determinadas pilhas e baterias e resíduos infectantes de serviços de saúde.
Classe II Resíduo não perigoso	Resíduo que, após avaliação de sua origem, composição e propriedades, não apresenta características que justifiquem sua classificação como perigoso.	Restos de alimentos, resíduos de poda, papel, papelão, vidro, plásticos, metais, madeira e outros materiais, desde que não estejam contaminados por substâncias perigosas.

Fonte: Adaptado de ABNT (2024a, 2024b).

No contraponto internacional, a classificação europeia segue a Lista Europeia de Resíduos (Decisão 2014/955/UE) (European Commission, 2014), que estabelece um sistema de codificação baseado na origem e no processo gerador dos resíduos, distinguindo também fluxos perigosos e não perigosos através de códigos espelhados. Esse sistema harmoniza a gestão de resíduos entre os Estados-Membros da União Europeia, facilitando o monitoramento estatístico e a definição de políticas ambientais comuns.

Além destas classificações puramente normativas, diversos autores de referência propõem tipologias baseadas na funcionalidade urbana das origens. Tchobanoglous et al. (1993), por exemplo, sugerem a utilização de 8 categorias principais: domésticos ou residenciais, comerciais, institucionais, construção e demolição, serviços municipais, estações de tratamento municipais, industriais e agrícolas. Já Sarsby (2000) apresenta uma classificação semelhante, porém reduzida a seis categorias, aglutinando fluxos e excluindo os resíduos institucionais e de serviços municipais. Essas abordagens clássicas evidenciam a diversidade de tipologias coexistentes na literatura para atender diferentes contextos de planejamento e necessidades analíticas de engenharia (Gomes, 2008).

Independentemente do critério adotado, a composição física dos RSU varia significativamente devido a fatores intrínsecos como densidade populacional, nível educacional, poder aquisitivo, hábitos culturais, condições climáticas e grau de industrialização regional (Mattei & Escosteguy, 2007). Estudos indicam que a fração orgânica (degradável) representa mais de 50% da massa de RSU em países em desenvolvimento como o Brasil, contrastando com cerca de 30–35% nos países europeus, onde prevalecem os recicláveis secos de embalagens (World Bank, 2023; Kaza et al., 2018). Essa assimetria reflete padrões de consumo distintos e diferentes níveis de maturidade institucional nos sistemas de gestão e triagem na fonte.

A nível metodológico e operacional, aspeto fulcral desta dissertação, o conhecimento exato da composição gravimétrica e a correta classificação legal dos resíduos transcendem a mera formalidade administrativa. A caracterização quantitativa da fração biodegradável (Classe IIA) constitui o dado de entrada (input) mais crítico para ferramentas de modelação climática, tais como o LandGEM (*Landfill Gas Emissions Model*) e o SWEET (*Solid Waste Emissions Estimation Tool*).

Modelos cinéticos de primeira ordem, como o LandGEM, dependem estritamente do teor de matéria orgânica degradável contida nos resíduos não inertes para projetar o potencial de geração de metano (L0) e a taxa de decaimento (k) ao longo do tempo de operação do aterro. Paralelamente, o modelo SWEET utiliza estes fluxos gravimétricos para inventariar as emissões integradas de Gases de Efeito Estufa (GEE) e poluentes climáticos de vida curta (como o carbono negro) associados à recolha, transporte e disposição final.

Portanto, enquanto o panorama internacional oferece ferramentas preditivas maduras, a aplicação prática destas metodologias em municípios de médio porte do Sul do Brasil, como Medianeira (PR), esbarra frequentemente na escassez de dados locais estruturados. É precisamente neste cenário analítico que este enquadramento de conceitos e tipologias se consolida, fornecendo a sustentação teórica necessária para as análises subsequentes de fluxos de materiais, eficiência operacional e pegada de carbono do sistema municipal de gestão de resíduos.

2.2 Políticas Públicas e regulamentações da gestão de resíduos

2.2.1 Quadro normativo no Brasil e Estado Paraná

A trajetória de regulamentação da coleta e destino final de resíduos sólidos no Brasil é marcada por avanços graduais, permeada por desafios institucionais, desigualdades regionais e um longo processo de amadurecimento legislativo. Durante o período colonial e até o século XIX, a ausência de infraestrutura e políticas públicas fez com que o gerenciamento dos resíduos fosse praticamente inexistente, cabendo à própria população, em especial aos mais vulneráveis, improvisar soluções para o descarte. Esse panorama precário agravou a manipulação ambiental e fomentou surtos de doenças nas cidades em crescimento (Thode Filho et al., 2015).

A partir do início do século XX, a urbanização e o desenvolvimento industrial propiciaram o surgimento dos primeiros serviços de limpeza urbana, mas estes permaneceram limitados, enxergando o resíduo apenas como um transtorno e não como um problema sanitário ou ambiental relevante. Foi somente nas décadas de 1970 e 1980 que o debate sobre a gestão adequada de resíduos ganhou força institucional, com a criação do Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA) e a Política Nacional do Meio Ambiente (Lei 6.938/1981), mas, ainda assim, a prática predominante era a disposição de resíduos em lixões a céu aberto, sem tratamento adequado (Jacobi & Besen, 2011).

Na década de 1990, movimentos sociais e pesquisadores começaram a destacar a importância da sustentabilidade e da inclusão, trazendo os catadores de materiais recicláveis para o centro das discussões, reconhecendo-os como agentes indispensáveis nesse processo. Esse movimento culminou na aprovação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) em 2010 (Lei 12.305/2010), que trouxe avanços significativos, como a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, a logística reversa, a priorização de ações como a não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento de resíduos, em vez da simples disposição final. A nova lei também reconheceu o papel fundamental das cooperativas de catadores e estabeleceu como meta a eliminação dos lixões, um desafio ainda persistente no país (Jacobi & Besen, 2011).

Apesar das inovações, a implementação plena da PNRS tem sido dificultada pela falta de infraestrutura técnica e operacional nas municipalidades brasileiras, o que compromete a efetividade da responsabilidade compartilhada entre Estado, setor produtivo e sociedade civil (Maiello et al., 2018). A elaboração dos Planos Municipais de

Gestão Integrada de Resíduos Sólidos exige diagnósticos técnicos detalhados, participação social e uma articulação institucional robusta, requisitos difíceis de serem atendidos em contextos de baixa capacidade administrativa e desenvolvimento regional.

Além disso, a falta de eficiência na colaboração entre os entes federativos tem gerado ações fragmentadas e lacunas na implementação das políticas setoriais, resultando em perda de coesão e limitando a eficácia das iniciativas de gestão de resíduos sólidos (Tribunal de Contas da União [TCU], 2022). A descentralização e os interesses subnacionais dificultam a coordenação entre os entes, prolongando os prazos e adiando metas cruciais, como o encerramento dos lixões (Souza, 1997).

A PNRS estabelece diretrizes para a gestão integrada e o manejo adequado dos resíduos sólidos, incluindo aqueles classificados como perigosos. Além disso, define as responsabilidades tanto dos geradores de resíduos quanto do poder público, além de abordar os instrumentos econômicos que podem ser aplicados para viabilizar essa gestão (Brasil, 2010). Entre as metas centrais da PNRS, está a adoção de uma hierarquia de ações prioritárias: “Não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos” (Brasil, 2010).

No âmbito estadual, o Paraná possui um arcabouço normativo maduro e alinhado à PNRS, pioneiro na regulamentação da gestão de resíduos desde a Lei Estadual nº 12.493/1999, que estabelece princípios, procedimentos e critérios para geração, acondicionamento, coleta, transporte, tratamento e destinação final dos resíduos sólidos, com ênfase no controle da poluição e minimização de impactos ambientais. Esta lei lançou as bases para o Programa Desperdício Zero, que visa eliminar 100% dos lixões no estado e reduzir em 30% a geração de resíduos (Paraná, 1999).

Mais recentemente, a Lei Estadual nº 20.607/2021 institui o Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Paraná (PERS/PR), instrumento de planejamento que organiza a gestão estadual, abrangendo todo o território paranaense e atendendo aos princípios da PNRS. O PERS/PR define diretrizes como reestruturação do sistema de gestão, prevenção e minimização da geração de resíduos, segregação em três fluxos (recicláveis, orgânicos e rejeitos), erradicação de lixões, fortalecimento da logística reversa e economia circular, além de monitoramento contínuo com controle social. Estratégias incluem apoio a consórcios intermunicipais, Parcerias Público-Privadas (PPPs), planos metropolitanos alinhados aos PDUI (Planos de Desenvolvimento Urbano Integrado) e priorização de licenciamento ambiental para empreendimentos da cadeia de resíduos (Paraná, 2021).

Complementando este quadro, a Lei Estadual nº 21.388/2023 (alteração da Lei nº 20.862/2021) reforça o Programa Estadual de Resíduos Sólidos – Paraná Resíduos, coordenado pela Secretaria de Estado do Desenvolvimento Sustentável (SEDEST), que apoia municípios na gestão integrada via parcerias público-privadas, articulação para eliminação de lixões, elaboração de inventários estaduais e licenciamento ambiental padronizado. Resoluções complementares, como a Resolução Conjunta SEDEST/IAT nº 20/2021, dispõem sobre a plataforma digital Contabilizando Resíduos, que integra o Sistema Estadual de Informações sobre Resíduos Sólidos e é utilizada para o monitoramento e prestação de contas da gestão de resíduos no Paraná (Paraná, 2023).

Esta estrutura normativa federal e estadual cria um ambiente favorável à transição para a economia circular no Paraná, com ênfase na valorização energética e orgânica dos RSU. No entanto, a sua plena efetividade depende de maior articulação interfederativa e de investimentos de infraestrutura, sobretudo em municípios de menor porte, como Medianeira.

2.2.2 Princípios, objetivos de monitorização da PNRS

Apresentam-se a seguir os princípios e objetivos da PNRS, em que evidenciam seu caráter integrador, regulador e sustentável.

Tabela 2. Princípios da Política Nacional de Resíduos Sólidos.

Princípios da PNRS	Descrição
I	A prevenção e precaução;
II	O poluidor-pagador e o protetor-recebedor;
III	A visão sistêmica, na gestão dos resíduos sólidos, que considere as variáveis ambiental, social, cultural, econômica, tecnológica e de saúde pública;
IV	O desenvolvimento sustentável;
V	A ecoeficiência, mediante a compatibilização entre o fornecimento, a preços competitivos, de bens e serviços qualificados que satisfaçam as necessidades humanas e tragam qualidade de vida e a redução do impacto ambiental e do consumo de recursos naturais a um nível, no mínimo, equivalente à capacidade de sustentação estimada do planeta;
VI	A cooperação entre as diferentes esferas do poder público, o setor empresarial e demais segmentos da sociedade;
VII	A responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos;

Fonte: Adaptado de Lei nº 12.305, (Brasil, 2010).

Tabela 2 (cont.). Princípios da Política Nacional de Resíduos Sólidos.

VIII	O reconhecimento do resíduo sólido reutilizável e reciclável como um bem econômico e de valor social, gerador de trabalho e renda e promotor de cidadania;
IX	O respeito às diversidades locais e regionais;
X	O direito da sociedade à informação e ao controle social;
XI	Razoabilidade e a proporcionalidade.

Fonte: Adaptado de Lei nº 12.305, (Brasil, 2010).

Enquanto os princípios apresentados na tabela 2 definem a base ética da política, os objetivos listados a seguir, tabela 3, traduzem esses fundamentos em metas práticas para a gestão de resíduos no país (Massuga et al., 2023).

Tabela 3. Objetivos da Política Nacional de Resíduos Sólidos.

Objetivos da PNRS	Descrição
I	Proteção da saúde pública e da qualidade ambiental;
II	Não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos;
III	Estímulo à adoção de padrões sustentáveis de produção e consumo de bens e serviços;
IV	Adoção, desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias limpas como forma de minimizar impactos ambientais;
V	Redução do volume e da periculosidade dos resíduos perigosos;
VI	Incentivo à indústria da reciclagem, tendo em vista fomentar o uso de matérias-primas e insumos derivados de materiais recicláveis e reciclados;
VII	Gestão integrada de resíduos sólidos;
VIII	Articulação entre as diferentes esferas do poder público, e destas com o setor empresarial, com vistas à cooperação técnica e financeira para a gestão integrada de resíduos sólidos;
IX	Capacitação técnica continuada na área de resíduos sólidos;
X	Regularidade, continuidade, funcionalidade e universalização da prestação dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos, com adoção de mecanismos gerenciais e econômicos que assegurem a recuperação dos custos dos serviços prestados, como forma de garantir sua sustentabilidade operacional e financeira, observada a Lei nº 11.445, de 2007 ;
XI	Prioridade, nas aquisições e contratações governamentais, para: a) produtos reciclados e recicláveis; b) bens, serviços e obras que considerem critérios compatíveis com padrões de consumo social e ambientalmente sustentáveis;
XII	Integração dos catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis nas ações que envolvam a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos;

Fonte: Adaptado de Lei nº 12.305 (Brasil, 2010).

Tabela 3 (cont.). Objetivos da Política Nacional de Resíduos Sólidos.

XIII	Estímulo à implementação da avaliação do ciclo de vida do produto;
XIV	Incentivo ao desenvolvimento de sistemas de gestão ambiental e empresarial voltados para a melhoria dos processos produtivos e ao reaproveitamento dos resíduos sólidos, incluídos a recuperação e o aproveitamento energético;
XV	Estímulo à rotulagem ambiental e ao consumo sustentável.

Fonte: Adaptado de Lei nº 12.305 (Brasil, 2010).

2.2.3 Instrumentos e indicadores de monitorização

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (Brasil, 2010) define 18 instrumentos principais destinados a operacionalizar os princípios de gestão integrada, da prevenção e da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos resíduos. Estes instrumentos, explicitamente não exaustivos, conforme uso da expressão "entre outros" pelo legislador, abrangem desde planeamento estratégico até fiscalização e educação ambiental, complementados por mecanismos da Política Nacional de Meio Ambiente (Lei nº 6.938/1981) (Brasil, 1981). O seu monitoramento sistemático ocorre através de indicadores quantificáveis, reportados anualmente através dos Sistemas Nacionais de Informação: SINIR (Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos), SNIS (Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico) e plataformas da ABRELPE (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais), permitindo avaliação de desempenho municipal, benchmarking regional e ajuste de políticas públicas (ABRELPE, 2024; Brasil, 2010).

2.2.3.1 Principais Instrumentos

Os Principais instrumentos da PNRS organizam-se em quatro dimensões complementares:

- Planeamento e informação: Planos de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS/PGRs/PNRS); inventários de resíduos e Sistema Declaratório Anual de Resíduos Sólidos (SINIR);
- Implementação operacional: Coleta seletiva; logística reversa para 21 setores prioritários; incentivo a cooperativas de catadores;
- Monitorização e fiscalização: Monitoramento ambiental, sanitário e agropecuário; padrões de qualidade ambiental; licenciamento ambiental e avaliação de impactos (complementares à PNMA);

- Fomento e capacitação: Educação ambiental; incentivos fiscais, financeiros e creditícios; Cadastro Técnico Federal (CTF/APP) e SINIMA.

A regulamentação detalhada da PNRS ocorreu por meio de três decretos federais complementares:

- Decreto nº 7.404/2010: Diretrizes para logística reversa e segmentação de resíduos perigosos/não perigosos;
- Decreto nº 10.936/2022: Consolidação normativa com ênfase em fiscalização e economia circular (Brasil, 2022a);
- Decreto nº 11.043/2022: Aprovação do Planares 2022-2031, com metas vinculantes nacionais (Brasil, 2022b).

2.2.3.2 Indicadores de monitorização

Os indicadores de desempenho da PNRS são consolidados principalmente pelo SNIS e complementados por relatório da ABRELPE e SINIR. Distribuem-se em quatro categorias principais, permitindo avaliação integrada e *benchmarking* (ex.: Medianeira vs. média do Paraná/Brasil). Esses indicadores encontram-se plasmados na tabela que se segue.

Tabela 4. Principais indicadores de monitorização da PNRS/SNIS (Decreto nº 11.043/2022; SNIS 2023; ABRELPE 2024).

Categoria	Indicadores principais	Metas Planares 2022-2031
Operacionais	Geração per capita (kg/hab/dia); Cobertura de coleta (%); Taxa de reciclagem (% RSU)	Redução 30% geração per capita; Reciclagem 20%
Ambientais	Lixões eliminados (unid.); Resíduos em aterros sanitários (% <i>baseline</i>); Recuperação energética (kWh/t)	Zero lixões até 2024
Econômicos	Custo operacional (R\$/t); Ecoeficiência (PIB/t RSU)	-
Sociais	Catadores formalizados (unid.); Cooperativas apoiadas (unid.)	Integração plena catadores

No Paraná, o PERS/PR (Lei Estadual nº 20.607/2021) alinha-se ao Planares, adotando indicadores similares monitorizados pela plataforma “Contabilizando Resíduos” (SEDEST/IAT, 2021). Esta estrutura de indicadores possibilita análise de

fluxos materiais (*input-output*), avaliação de pegada de carbono e identificação de *gaps* locais, como baixa reciclagem municipal (média nacional 2-5% vs. meta 30% até 2031).

Em síntese, os instrumentos e indicadores da PNRS formam um sistema robusto de governança, mas a sua efetividade depende da articulação federativa e investimento contínuo. Para Medianeira, o *benchmarking* com indicadores estaduais/nacionais revela oportunidades prioritárias em coleta seletiva e valorização orgânica, alinhando-se à metodologia de fluxos materiais e economia circular (ABRELPE, 2024; Gomes, 2023).

2.3 Tecnologias de recuperação e tratamento de resíduos sólidos urbanos

A gestão de RSU baseia-se na hierarquia de gestão de resíduos, que prioriza estratégias de prevenção, reutilização e recuperação de recursos antes da disposição final (Brasil, 2010). O tratamento dos RSU compreende processos físicos, químicos e biológicos destinados a reduzir o potencial poluidor dos resíduos, minimizar riscos à saúde pública e ampliar o aproveitamento das frações valorizáveis, dependendo da composição dos resíduos, das condições locais e dos objetivos do sistema de gestão (Jucá et al., 2014).

Entre as principais tecnologias empregadas destacam-se a reciclagem, a compostagem, a digestão anaeróbia, a incineração e os aterros sanitários. Tais tecnologias não devem ser entendidas como soluções isoladas, mas como componentes complementares de sistemas integrados de gestão, nos quais diferentes técnicas atuam de forma articulada para maximizar a recuperação de recursos e minimizar os impactos ambientais (Schramm, 2015).

A Tabela 5 apresenta uma síntese das principais tecnologias de tratamento e disposição final de RSU, bem como os processos envolvidos, os produtos gerados e observações operacionais relevantes.

Tabela 5. Principais tecnologias de tratamento, valorização e disposição final de RSU.

Processo	Transformação	Subprodutos/ Produtos	Observações
Reciclagem	Processos físicos, mecânicos e químicos	Materiais reciclados	Exige triagem eficiente e fluxo de materiais separados; Produtos voltam ao ciclo produtivo.
Incineração	Processo termoquímico	Calor, energia elétrica, cinzas	Reduz volume e massa dos resíduos; energia aproveitada; controle rigoroso de emissões.
Biodigestão	Processo biológico anaeróbio	Biogás, composto orgânico	Conversão eficiente da fração orgânica em energia e adubo.
Compostagem	Processo biológico aeróbio	Composto/Adubo	Processo de estabilização da matéria orgânica, resulta em fertilizantes naturais.
Aterro sanitário sem recuperação de energia	Processos Físico-Químicos e biológicos passivos	Resíduos compactados e cobertos	Decomposição ocorre sem aproveitamento energético; exige monitoramento de chorume e gases.
Aterro sanitário com recuperação de energia	Processos biológicos e físico-químicos	Biogás, energia elétrica	Biogás é captado para geração de energia; Operação ambientalmente controlada.

Fonte: Adaptado de Jucá et al., 2014.

2.3.1 Recuperação de materiais: Reciclagem

A reciclagem consiste no reaproveitamento e na transformação de resíduos como papéis, plásticos, vidros e metais, permitindo sua reinserção no ciclo produtivo como matéria-prima secundária (Jucá et al., 2014). Conforme a PNRS, a reciclagem corresponde à transformação de resíduos sólidos por processos físicos, físico-químicos ou biológicos, com o objetivo de convertê-los em insumos ou novos produtos para uso industrial ou comercial (Brasil, 2010). Além de reduzir a extração de recursos naturais e o volume de resíduos destinados à disposição final, a reciclagem apresenta relevância econômica e social, favorecendo a geração de empregos, o fortalecimento de cadeias produtivas e a redução de emissões de GEE associadas ao processamento de matérias-primas virgens (Jucá et al., 2014; dos Santos et al., 2025).

Entretanto, sua viabilidade está diretamente relacionada a fatores como a existência de mercado para os materiais recicláveis, a infraestrutura disponível para coleta e processamento dos resíduos e os custos envolvidos nas etapas de triagem e

reprocessamento. Em muitos casos, o custo do processamento dos materiais recicláveis ainda pode ser superior ao das matérias-primas virgens, o que evidencia a necessidade de políticas públicas e incentivos econômicos que favoreçam a expansão dessa atividade (Jucá et al., 2014).

Entre as principais rotas tecnológicas utilizadas na reciclagem destacam-se a reciclagem mecânica e química, diferenciadas pelos processos empregados na recuperação dos materiais.

Tabela 6. Tipos de reciclagem e suas características.

Tipo de Reciclagem	Descrição	Exemplo de Aplicação
Reciclagem Mecânica	Trituração e reprocessamento dos resíduos para gerar matéria-prima secundária.	Transformação de embalagens plásticas em novos produtos.
Reciclagem Química	Quebra das moléculas dos resíduos plásticos por reações químicas, gerando matérias-primas básicas.	Reciclagem de PET para obtenção de monômeros.

Fonte: Adaptado de Delmont, 2007.

A eficiência dos sistemas de reciclagem está diretamente relacionada à existência de programas eficazes de coleta seletiva, uma vez que a separação dos resíduos na fonte preserva a qualidade dos materiais recicláveis e facilita as etapas posteriores de triagem e processamento (Hisatugo & Marçal Júnior, 2007; Neiva, 2001). Apesar de seus benefícios ambientais e socioeconômicos, a reciclagem também apresenta limitações relacionadas principalmente aos custos de coleta seletiva, triagem e processamento de materiais. Além disso, a eficiência dos sistemas de reciclagem pode ser afetada por fatores como a qualidade dos resíduos coletados, a disponibilidade de infraestrutura adequada e a estabilidade dos mercados para materiais reciclados. Ainda assim, quando integrada a políticas públicas e a sistemas eficientes de gestão de resíduos, a reciclagem constitui uma estratégia fundamental para reduzir a quantidade de resíduos destinados à disposição final e promover o uso mais eficiente dos recursos naturais (Jucá et al., 2014; Rencelj & Negreiros, 2025).

2.3.2 Valorização da fração orgânica dos resíduos

A fração orgânica constitui uma parcela significativa dos RSU e apresenta elevada relevância ambiental no contexto da gestão de resíduos. Quando destinada inadequadamente à disposição final, essa fração sofre processos de decomposição

anaeróbia que resultam na emissão de GEE, especialmente metano (CH_4), cujo potencial de aquecimento global é aproximadamente 28 vezes superior ao do dióxido de carbono (CO_2) em um horizonte de 100 anos (IPCC, 2019). Estratégias voltadas ao tratamento e valorização da matéria orgânica permitem reduzir esses impactos e promover o aproveitamento dos recursos presentes nesses materiais (Alvarenga, 2025). Nesse contexto, destacam-se a compostagem e a digestão anaeróbia, tecnologias de tratamento biológico que permitem a estabilização da matéria orgânica e a obtenção de produtos valorizáveis, como composto orgânico e biogás.

2.3.2.1 Compostagem

A compostagem é um processo biológico controlado de decomposição de resíduos orgânicos em condições aeróbias, no qual microrganismos degradam a matéria orgânica, transformando-a em composto orgânico com características semelhantes ao húmus do solo, utilizável como fertilizante ou condicionador (Abreu, 2017; Granado, 2019). Trata-se de um dos métodos mais antigos de tratamento de resíduos orgânicos e permanece relevante no contexto da gestão sustentável de resíduos, pois contribui para a redução da quantidade de resíduos destinados aos aterros sanitários, para o controle da poluição e para a mitigação dos impactos associados ao descarte inadequado da fração orgânica (Pereira Neto, 1989; Jucá et al., 2014).

A eficiência do processo depende de variáveis como temperatura, humidade, aeração, pH, relação carbono-nitrogênio (C:N), atividade microbiológica e granulometria dos materiais, que influenciam tanto o tempo de decomposição quanto a qualidade do produto final (Fecchio & Câmara, 2020; Kiehl, 1998; Santos, 2022; Valente et al., 2008). O processo divide-se em três fases principais: a fase inicial de decomposição ativa, marcada por intensa atividade microbiana e elevação da temperatura; a fase de bioestabilização ou semi-cura; e a fase final de maturação ou humificação, em que ocorre a estabilização da matéria orgânica e a formação do composto final (Lins et al., 2025). Durante a fase termofílica, as temperaturas podem variar entre 40 °C e 65 °C, favorecendo a degradação acelerada da matéria orgânica e a eliminação de microrganismos patogênicos. Posteriormente, ocorre a fase de maturação, em que a temperatura diminui gradualmente e o material passa por processos de estabilização e humificação (Lins et al., 2025).

A figura 1 apresenta um fluxograma simplificado do processo de compostagem.

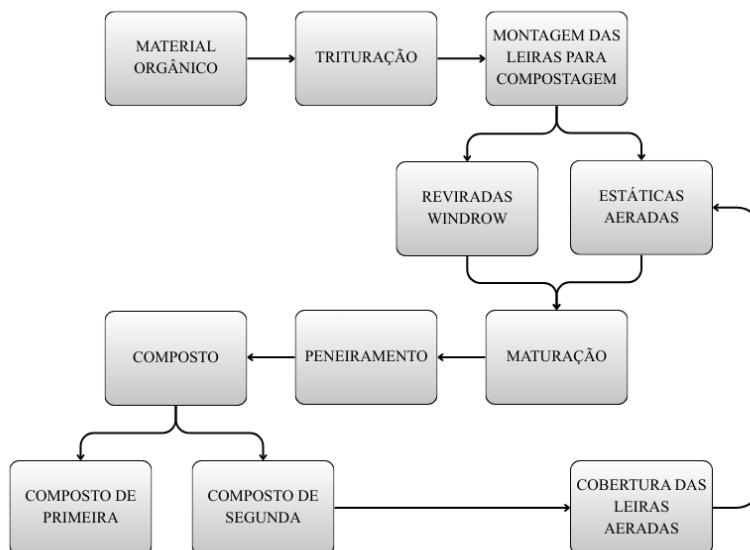


Figura 1. Fluxograma do processo de compostagem.

Fonte: Adaptado de Teixeira da Silva, 2007.

Em termos operacionais, a compostagem pode ser realizada por métodos naturais, com revolvimento periódico de pilhas e tempo de decomposição de três a quatro meses, ou por métodos acelerados, com aeração forçada ou reatores rotatórios, reduzindo o processo para aproximadamente dois a três meses (Jucá et al., 2014). As unidades recebem tipicamente resíduos de mercados, feiras livres e podas de árvores, e o composto resultante pode ser aplicado em áreas públicas, recuperação de áreas degradadas e atividades agrícolas (Silva et al., 2024; Lins et al., 2025).

2.3.2.2 Digestão Anaeróbia

A digestão anaeróbia constitui um processo biológico no qual microrganismos degradam matéria orgânica na ausência de oxigênio, convertendo compostos orgânicos complexos em biogás - composto principalmente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2) - e em um material estabilizado denominado digestato (Bouallagui et al., 2003).

Durante esse processo, diferentes grupos de microrganismos realizam transformações metabólicas sucessivas, convertendo compostos orgânicos, como carboidratos, proteínas e lipídeos, em metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), amônia (NH_3) e outros gases e ácidos orgânicos (Alves et al., 2010). A digestão anaeróbia ocorre em quatro etapas principais, conforme apresentado na tabela 7.

Tabela 7. Etapas da digestão anaeróbia.

Etapas da digestão anaeróbia	
Hidrólise	Iniciada por bactérias fermentativas hidrolíticas, transforma o material orgânico em compostos dissolvidos de menor peso molecular, com a solubilização da matéria orgânica em presença de água.
Acidogénese	Compostos orgânicos simples são convertidos pelas bactérias acidogénicas em ácidos graxos voláteis (acético, butírico, propiônico), ácido lático e compostos minerais.
Acetogénese	Bactérias acetogénicas oxidam os produtos gerados na fase acidogénica, transformando-os em substratos apropriados para as bactérias metanogénicas.
Metanogénese	O ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono são convertidos em metano e dióxido de carbono pelas bactérias metanogénicas.

Fonte: Gueri et al., 2017.

Em um processo de digestão anaeróbia bem equilibrado, os produtos gerados em cada etapa metabólica são convertidos integralmente nas etapas subsequentes, permitindo a transformação quase completa da matéria orgânica biodegradável em metano e dióxido de carbono (Rech, 2008). A figura 2 apresenta as principais sequências metabólicas e os grupos microbianos envolvidos no processo de digestão anaeróbia.

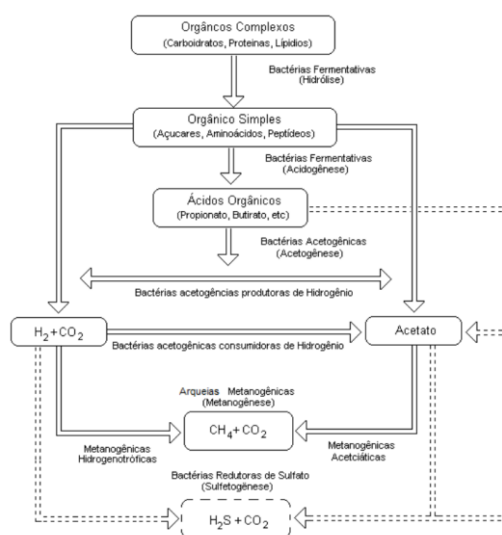


Figura 2. Sequências metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia.

Fonte: Alves et al., 2010.

Diversos fatores operacionais influenciam a eficiência do processo, incluindo relação carbono-nitrogênio (C/N), pH, temperatura, humidade, taxa de carregamento

orgânico e condições de mistura do material no reator. O controle adequado desses parâmetros é essencial para garantir a estabilidade do processo e maximizar a produção de biogás (Rech, 2008).

Entre as tecnologias de tratamento biológico de resíduos orgânicos, a digestão anaeróbia destaca-se pela possibilidade de recuperação energética via biogás e pela redução da fração orgânica dos RSU. Contudo, a D.A. ainda encontra limitações no Brasil, especialmente em razão da baixa segregação da fração orgânica, da insuficiência de infraestrutura tecnológica e dos custos iniciais de implantação (Alvarenga, 2025; Jucá et al., 2014; Magalhães, 2018).

2.3.3 Tecnologia termoquímica - Incineração

As tecnologias termoquímicas correspondem a processos de tratamento de resíduos baseados na aplicação de altas temperaturas para promover a decomposição térmica dos materiais, possibilitando a redução significativa do volume e da massa dos resíduos, e em determinados casos, a recuperação de energia (Schramm, 2015). Entre essas tecnologias, destaca-se a incineração, amplamente utilizada para o tratamento de resíduos não recicláveis em diversos países.

A incineração ocorre a temperaturas elevadas, geralmente superiores a 800 °C em ambiente oxidante, decompondo os resíduos em três frações: sólida inerte composta por cinzas e escórias, uma fração gasosa e uma quantidade mínima de resíduos líquidos (Jucá et al., 2014). A figura 3 apresenta uma visão esquemática do processo.

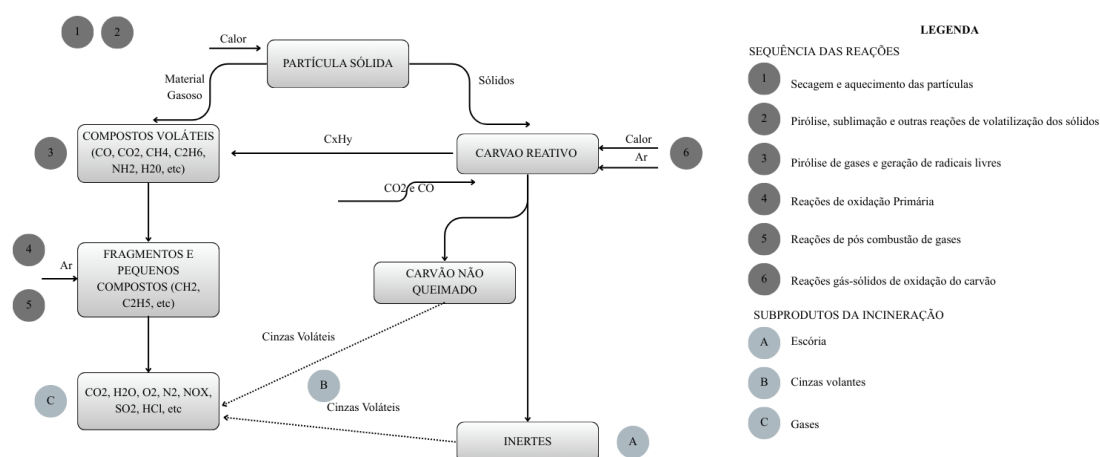


Figura 3. Mecanismo geral da combustão de resíduos sólidos municipais.

Fonte: Adaptado de Gripp, 1998.

Amplamente utilizada na Europa, EUA e Japão, a incineração com recuperação energética permite a geração de calor e eletricidade. Em Portugal, por exemplo, a Central de Valorização Energética da LIPOR trata cerca de 390 mil toneladas de RSU por ano e gera aproximadamente 162 GWh de eletricidade, dos quais cerca de 90% são injetados na rede pública (Veolia Portugal, s.d.). No Brasil, sua adoção ainda é limitada pelos elevados custos de implantação, rigorosos requisitos de controle de emissões e resistência social (Ayoub et al., 2025).

No ponto de vista ambiental, o processo gera gases poluentes, como dióxido de carbono (CO_2), oxigênio residual (O_2), óxidos de nitrogênio (NO_x), dióxido de enxofre (SO_2) e material particulado. Por essa razão, os gases resultantes da combustão precisam passar por sistemas de controle de emissões antes de serem liberados na atmosfera. Além disso, as cinzas e escórias geradas no processo, uma vez confirmada sua inertização, podem ser dispostas de maneira segura em aterros sanitários. Os efluentes líquidos provenientes da operação devem ser tratados adequadamente antes de sua disposição final (Jucá et al., 2014).

Os processos térmicos podem alcançar reduções entre 80% e 90% dos RSU (Lombardi et al., 2015), atuando como processo complementar à reciclagem e aterros sanitários para resíduos sem possibilidade de reaproveitamento (Calderoni, 1997; Schramm, 2015). Em termos de emissões de GEE associadas, destaca-se o dióxido de carbono (CO_2) como o principal gás emitido pelos incineradores, sendo liberados em média 0,415 mg de CO_2 para cada 1 mg de resíduo processado. A emissão de metano (CH_4), por outro lado, é praticamente inexistente durante a operação regular desses sistemas (Johnke, 2002). Contudo, sua viabilidade econômica tende a ser restrita a plantas com capacidade superior a 200 mil toneladas por ano (Themelis et al., 2013 apud Muller et al., 2021), e sua eficiência pode ser comprometida por resíduos com alta umidade, baixo poder calorífico ou composição inadequada, desafios frequentes em países de média e baixa renda (Yap & Nixon, 2015; Jucá et al., 2014).

2.3.4 Disposição final em aterros sanitários

A disposição final corresponde ao encaminhamento dos rejeitos que não puderam ser evitados, reutilizados, reciclados ou tratados por outras tecnologias, ocupando o último nível da hierarquia estabelecida pela PNRS (Brasil, 2010). No contexto brasileiro, os aterros sanitários constituem a principal solução técnica para essa etapa, regulamentados pela NBR 8419/1992, que define o confinamento seguro dos

resíduos por meio de cobertura periódica, impermeabilização de base, drenagem e tratamento de lixiviados e controlo de gases. Embora representem o padrão técnico mínimo para disposição final ambientalmente adequada, demandam extensas áreas e permanecem associados à emissão de GEE, especialmente CH₄ (Jucá et al., 2014).

A Figura 4 apresenta uma síntese dos fatores técnicos, ambientais, económicos, políticos e sociais que influenciam a transição de formas inadequadas de disposição final, como lixões, para sistemas tecnicamente controlados.

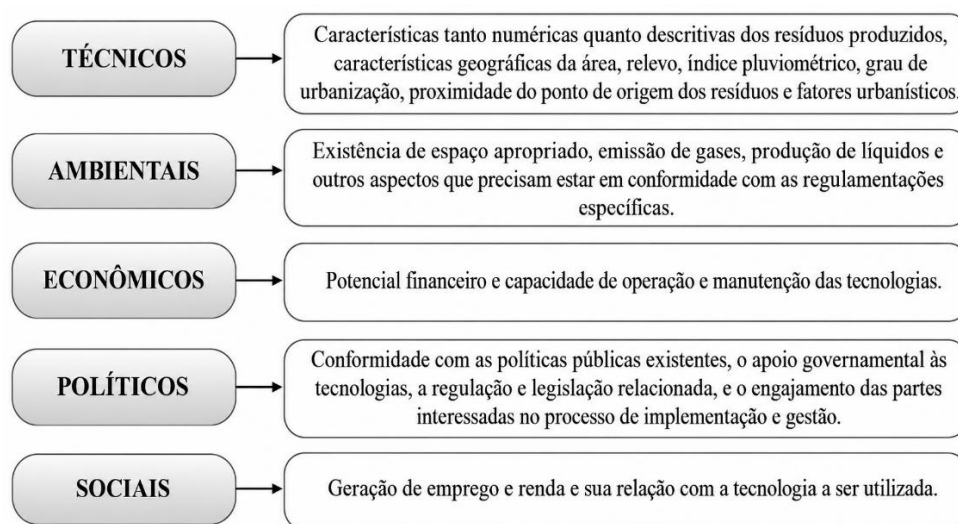


Figura 4. Fatores técnicos, ambientais, económicos, políticos e sociais que influenciam a transição de formas inadequadas de disposição de resíduos para sistemas tecnicamente controlados.

Fonte: Adaptado de Lima et al., 2014.

Apesar do predomínio dos aterros sanitários como solução formal de disposição final, o Brasil ainda convive com formas precárias de destinação, como lixões e aterros controlados, cuja presença varia conforme a região e o porte populacional dos municípios (Jucá et al., 2014). A disposição em aterros também depende da classificação pela NBR 10.004/2004, que categoriza os RSU nas classes IIA e IIB, compatíveis com essa modalidade de disposição. Diferentes configurações de engenharia podem ser adotadas conforme as condições topográficas e geológicas da área, conforme a tabela 8.

Tabela 8. Tipos de aterros sanitários.

	Tipos de aterros sanitários
Aterro em trincheiras	Instalação para disposição de RSU no solo em escavações sem limites para profundidade ou largura, com confinamento em três lados e operação mecanizada.
Aterro em Vala	Disposição de RSU no solo em escavações de profundidade limitada e largura variável, confinada por todos os lados. Frequentemente não mecanizada.
Aterro em encosta	Disposição de RSU no solo com aproveitamento de taludes naturais já existentes (encostas de morros, pedreiras ou zonas de mineração desativadas).
Aterro em área	Disposição de RSU em áreas planas, elevadas em relação ao terreno natural, sem a necessidade de escavação ou modificação significativa do terreno original.

Fonte: Jucá et al., 2014.

A evolução tecnológica na área de disposição final também permitiu o desenvolvimento de sistemas de aproveitamento energético do biogás gerado nos aterros sanitários. Durante o processo de decomposição anaeróbia da matéria orgânica, ocorre a produção de gases, principalmente metano (CH_4), que podem ser captados por meio de sistemas de drenagem e utilizados para geração de energia elétrica, térmica ou produção de biometano (Jucá et al., 2014). No Brasil, experiências como as dos aterros de Salvador e São Paulo demonstram a viabilidade dessa rota, impulsionada por mecanismos regulatórios e mercados de créditos de carbono (Ayoub et al., 2025).

Do ponto de vista climático, a captura e o aproveitamento energético do biogás em aterros sanitários desempenham papel relevante na mitigação das emissões de GEE associadas ao setor de resíduos. A queima controlada do metano converte o CH_4 em dióxido de carbono (CO_2), reduzindo significativamente seu impacto climático, uma vez que o metano apresenta potencial de aquecimento global aproximadamente 28 vezes superior ao do CO_2 em um horizonte de 100 anos (IPCC, 2019).

2.4 Avaliação de sistemas de gestão de resíduos sólidos urbanos

A avaliação criteriosa dos sistemas de gestão de RSU requer a integração de indicadores quantitativos e qualitativos que permitem avaliar tanto o desempenho operacional quanto os impactos ambientais resultantes das diferentes etapas de tratamento e disposição. Estudos comparativos evidenciam que métodos avaliativos consistentes são fundamentais para identificar gargalos, estabelecer parâmetros de desempenho e orientar

políticas públicas que promovam maior eficiência no uso de recursos e redução dos impactos ambientais (Campitelli & Schebek, 2020; Cifrian et al., 2012).

A avaliação multidimensional dos sistemas de RSU considera cinco dimensões interdependentes - operacional, ambiental, económica, social e institucional - utilizando indicadores SMART (específicos, mensuráveis, acessíveis, relevantes, temporalmente definidos), validados por *frameworks* internacionais e alinhados à PNRS e ao PLANARES. A metodologia multicritério PROMETHEE II, combinada com Análise de Fluxos de Materiais (MFA – *Material Flow Analysis*) e Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), permite comparações par-a-par entre Medianeira, Paraná e *benchmarks* Brasil/União Europeia (Mujtaba et al., 2024; Pires et al., 2011).

2.4.1 Dimensão operacional: fluxos materiais e eficiência técnica

A avaliação operacional mensura o desempenho dos serviços de coleta, tratamento e disposição final dos RSU, considerando tanto a infraestrutura disponível quanto a capacidade de atendimento da população. Entre os indicadores mais utilizados destacam-se: a cobertura da coleta regular, a taxa de recuperação de materiais recicláveis, a capacidade instalada das unidades de tratamento e a vida útil dos aterros sanitários. A eficiência logística, que engloba a organização das rotas, frequência da coleta e custos operacionais por tonelada, é amplamente discutida na literatura, sobretudo em estudos que comparam o desempenho de diferentes municípios e regiões.

Os indicadores de fluxos materiais monitoram geração, tratamento e recuperação de RSU, podendo ser adaptados do estudo realizado na Cantábria (2005-2010) ao contexto brasileiro por meio dos dados do SNIS/ABRELPE.

Tabela 9. Indicadores operacionais principais.

Indicador	Fórmula	Meta PNRS Medianeira
Geração RSU	t/ano ou kg/hab/dia	<1 kg/hab/dia
Cobertura coleta	% população atendida	100% urbana
Taxa reciclagem	% RSU reciclado	>20%
Tratamento (%): Reciclagem/Compostagem /Incineração/Aterro	% fluxos por rota	Aterro <50%
Ecoeficiência	PIB ou R\$/t RSU	<i>Benchmark</i> Paraná
Vida útil aterro	anos restantes	>10 anos

Fonte: Adaptado de Cifrian et al., 2012.

Na Cantábria, estes indicadores revelaram uma redução da deposição em aterro de 80% para 40% dos RSU via combinação de incineração e reciclagem, a estabilização da geração em 363 kt/ano (1,69 kg/hab/dia) e o cumprimento das metas para vidro e papel, ilustrando o potencial da monitorização sistemática de fluxos materiais para orientar decisões de planeamento municipal. No contexto brasileiro, indicadores análogos permitem acompanhar a execução do PMGIRS de Medianeira face às metas do Planares, como a reciclagem de 48% dos resíduos recicláveis até 2031.

O desempenho operacional avalia a capacidade logística e a infraestrutura instalada através de indicadores reportados ao SNIS/ABRELPE, conforme Tabela 10.

Tabela 10. Indicadores operacionais elaborados com base em SNIS/ABRELPE.

Indicador	Fórmula/Métrica	Benchmark BR/PR	Meta Planares
Geração per capita	kg/hab/dia	BR: 0,98; PR: 0,85	Redução de 30% até 2031
Cobertura coleta	% domicílios	BR: 89%; PR: 92%	100%
Taxa reciclagem	% RSU	BR: 3%; PR: 5%	20%
Vida útil aterro	anos restantes	<10 anos em ~70% dos municípios	>20 anos

Modelos quantitativos como o *Vehicle Routing Problem* (VRP) e a *Data Envelopment Analysis* (DEA) têm sido utilizados para avaliar e otimizar a eficiência logística e global dos sistemas de coleta e transporte, permitindo comparações entre municípios e identificação de oportunidades de racionalização de custos. Ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) complementam essas análises ao possibilitar a visualização espacial de rotas, pontos de geração e infraestrutura existente, favorecendo o planeamento operacional de longo prazo.

2.4.2 Dimensão ambiental: impactos, ACV e pegada de carbono

A avaliação ambiental, complementar à operacional, permite compreender os impactos associados às diversas rotas de tratamento e disposição dos RSU, considerando emissões atmosféricas, geração de chorume, riscos ao solo e à água, além do potencial de aquecimento global decorrente das emissões de GEE. Tecnologias como aterros sanitários sem captura de biogás tendem a apresentar maiores emissões de metano, enquanto alternativas como reciclagem, compostagem, digestão anaeróbia e incineração com recuperação energética podem apresentar impactos ambientais menores, dependendo

das condições operacionais e tecnológicas de cada localidade (Christensen et al., 2007; Manfredi & Christensen, 2009).

A ACV (ISO 14040/2006) possibilita comparar diferentes tecnologias de gestão ao considerar todo o ciclo, desde a geração até a disposição final ou valorização. A pegada de carbono quantifica especificamente as emissões de GEE, com base nas diretrizes do IPCC (2006, 2019). Diversos estudos demonstram que cenários que incluem a compostagem, digestão anaeróbia ou valorização energética apresentam menor potencial de aquecimento global quando comparados à disposição em aterro sem captura de metano (Bernstad & la Cour Jansen, 2012; Manfredi & Christensen, 2009; Bogner et al., 2008).

A quantificação de impactos ambientais pode ser realizada por meio da ACV (ISO 14040/2006) e inventários de GEE baseados nas diretrizes metodológicas do IPCC (2006, 2019), utilizando indicadores como os listados na Tabela 11.

Tabela 11. Indicadores ambientais típicos em avaliações de RSU.

Categoria	Indicador	Métrica	Tendência vs. aterro
Aquecimento Global	Pegada carbono	kg CO _{2eq} /t RSU	Reciclagem: -800; Biogás: -500
Acidificação	Emissões SO _x /NO _x	g eq/t	Incineração: +20%
Eutrofização	N/P em lixiviado	g PO _{4eq} /t	Compostagem: -70%
Consumo de solo	Área ocupada	m ² /t	Rotas de valorização: -90%

Metodologias específicas incluem o uso do modelo FOD-IPCC (*First Order Decay*) para estimar emissões de CH₄ em aterros e plataformas como *SimaPro* ou *GaBi* para ACV multicritério. Estudos recentes aplicados a contextos urbanos em países em desenvolvimento demonstram que o aterro sanitário tende a concentrar a maior carga de impactos em múltiplos indicadores, enquanto compostagem e reciclagem frequentemente apresentam os menores impactos agregados, sobretudo em termos de aquecimento global, toxicidade humana e eutrofização (Christensen et al., 2007).

Modelos agregados de pegada de carbono, como os propostos por Christensen et al. (2009), Smith et al. (2001) e pela US EPA (2006), proporcionam estimativas simplificadas particularmente úteis para municípios com limitações de dados. Na região da Cantábria, por exemplo, sua aplicação evidenciou evolução da pegada de carbono de -179 kt CO_{2eq}/ano (2005) para -310 kt CO_{2eq}/ano (2010) em cenários que combinaram incineração, reciclagem e secagem de lodos, demonstrando o potencial de estratégias

integradas de valorização para reduzir impactos climáticos quando comparadas ao aterro sem captura de metano (Cifrian et al., 2012).

2.4.3 Dimensão económica: custos, benefícios e sustentabilidade financeira

A dimensão económica analisa a viabilidade financeira e a sustentabilidade de longo prazo dos sistemas de gestão de RSU, considerando custos diretos de operação e investimento, bem como benefícios e externalidades evitadas (Medina-Mijangos et al., 2021). Indicadores como custo total por tonelada coletada, ecoeficiência (relação entre atividade económica e volume de resíduos), *payback* de tecnologias de valorização e o custo por tonelada de CO₂eq evitada são amplamente utilizados para comparar cenários e apoiar decisões de investimento (Oliveira et al., 2024; Zhao et al., 2011).

A Análise Custo-Benefício Social (ACBS) e metodologias de Valor Presente Líquido (VPL) permitem integrar fluxos de caixa futuros, subsídios, receitas com venda de materiais/energia e custos ambientais evitados. Modelos como o *Levelized Cost of Waste Management* (LCWM) estendem o conceito de custo nivelado, típico do setor energético, à gestão de resíduos, distribuindo o custo total de um sistema ao longo da sua vida útil em termos de custo médio por tonelada tratada. Em muitos casos, demonstrou-se que projetos de valorização energética do biogás apresentam períodos de retorno de 7 a 10 anos, enquanto unidades de incineração de grande porte requerem horizontes temporais superiores a 15 anos para atingir viabilidade económica em países com rendimentos médios (Marefat et al., 2026; Oliveira et al., 2024; Soesanto et al., 2021).

2.4.4 Dimensão social: inclusão, equidade e participação

A dimensão social da avaliação de sistemas de RSU centra-se na inclusão de catadores e trabalhadores informais, na equidade no acesso ao serviço e na participação da comunidade em programas como a coleta seletiva. Indicadores de sustentabilidade social, como a percentagem de catadores formalizados e integrados em cooperativas reconhecidas, o número de cooperativas apoiadas por município, o nível de satisfação dos utilizadores com a coleta seletiva e a intensidade de ações de educação ambiental (horas/aula por ano letivo), são utilizados para caracterizar o desempenho social dos sistemas (Besen et al., 2017; Gutberlet et al., 2020).

Ferramentas como o Índice de Inclusão Social em RSU (IIS-RS) (Besen et al., 2017) e metodologias de *Material Flow Cost Accounting* (MFCA) (Wan et al., 2015) têm sido propostas para rastrear não apenas o valor material dos fluxos recicláveis, mas

também a distribuição de benefícios económicos ao longo da cadeia de reciclagem, incluindo as cooperativas e associações de catadores (Rutkowski & Rutkowski, 2015).

2.4.5 Dimensão institucional: governança, regulação e contexto territorial

A dimensão institucional avalia a maturidade da governança, o grau de implementação de instrumentos de política e a capacidade regulatória na gestão de RSU. Indicadores como existência e atualização de PMGIRS, adesão a consórcios intermunicipais, completude e qualidade dos dados reportados ao SINIR e SNIS, e frequência de ações de fiscalização ambiental em aterros e outras instalações são utilizados para avaliar a robustez institucional do sistema (Freitas & Barros, 2021; Santos et al., 2024).

Modelos de *benchmark* institucional, como o conjunto de indicadores “*Wasteaware*” para avaliação integrada de sistemas de gestão sustentável de resíduos, propõem indicadores compostos que integram dimensões de coleta, reciclagem, disposição, inclusão social, sustentabilidade financeira e instituições/políticas (Wilson et al., 2014). Estes indicadores foram testados em mais de 50 cidades em diferentes continentes e demonstram utilidade para comparar o desempenho de sistemas em contextos socioeconómicos diversos, identificando simultaneamente pontos fortes e fragilidades a serem priorizadas em planos de ação (Abdulredha et al., 2018).

Ao comparar diferentes contextos nacionais, nota-se que Portugal apresenta uma maior padronização e monitoramento sistemático dos indicadores de desempenho, devido à atuação dos sistemas multimunicipais e às exigências regulatórias europeias, que incluem metas de reciclagem, redução da deposição em aterro e controlo de emissões (Gama & Russo, 2024). Já o Brasil enfrenta desafios associados à heterogeneidade municipal, carência de infraestrutura, limitações financeiras e dificuldades na implementação de coleta seletiva e do tratamento adequado de resíduos, fatores que impactam tanto a eficiência operacional quanto o desempenho ambiental dos sistemas (Gama & Russo, 2024; Santos et al., 2024). Estudos apontam que, embora algumas cidades brasileiras apresentem índices de recuperação de recicláveis superiores à média nacional, a maioria dos municípios ainda depende fortemente de aterros e, em muitos casos, de lixões, o que evidencia a necessidade de fortalecer os instrumentos de política e a capacidade institucional (Santos et al., 2024).

Dessa forma, o cenário de *benchmarking* internacional revela disparidades e oportunidades críticas: enquanto a região de Cantábria apresenta uma deposição em aterro

de cerca de 40% (Cifrian et al., 2012) e Portugal atingiu uma taxa de preparação para reutilização e reciclagem próxima dos 30% em 2022 (Gama & Russo, 2024), o Brasil ainda destina mais de 60% dos seus resíduos a lixões ou aterros sem valorização (ABRELPE, 2024). Este quadro comparativo evidencia que a estagnação nos avanços europeus e os desafios estruturais brasileiros partilham uma necessidade comum: a transição de modelos de eliminação para modelos de recuperação. Nesse sentido, o sistema de gestão de Medianeira possui elevado potencial de otimização, desde que a tomada de decisão seja orientada pela aplicação sistemática de indicadores de fluxos materiais, pegada de carbono e governança institucional, permitindo o alinhamento das práticas locais com os padrões internacionais de economia circular.

2.4.6 Integração multicritério e benchmarking de cenários

A Matriz de Decisão Multicritério, através de métodos como o *Analytic Hierarchy Process* (AHP) e o PROMETHEE, permite integrar as dimensões operacional, ambiental, económica, social e institucional em um índice único de desempenho (Alvarenga et al., 2023; Khan et al., 2025). Essa abordagem possibilita a atribuição de pesos específicos a cada dimensão (por exemplo, Operacional: 25%; Ambiental: 30%; Económica: 20%; Social: 15%; Institucional: 10%) para classificar cenários alternativos de gestão com base em critérios de sustentabilidade adaptados à realidade local (Alvarenga et al., 2023).

Estudos recentes que aplicaram os métodos AHP, TOPSIS (*Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*) e PROMETHEE II em cenários de gestão de RSU em cidades de países em desenvolvimento demonstraram que combinações que favorecem a digestão anaeróbia, valorização energética e reciclagem tendem a ocupar as primeiras posições no *ranking*, superando cenários centrados em aterro e incineração sem recuperação energética (Mujtaba et al., 2024).

No contexto de Medianeira, a aplicação de uma matriz multicritério permitiria comparar o cenário atual, caracterizado por baixa taxa de reciclagem e ausência de aproveitamento energético do biogás, com cenários que integrem aumento da coleta seletiva, implantação de unidades de compostagem e/ou digestão anaeróbia e recuperação de biogás em aterros (Amancio et al., 2026).

2.5 Estudos relevantes em gestão de RSU: Desafios e Estratégias em diferentes contextos

A análise comparativa de sistemas de gestão de RSU entre diferentes regiões é crucial para identificar estratégias eficazes e adaptar soluções a contextos locais específicos. Conforme Mmereki et al. (2016), a gestão de RSU em países menos desenvolvidos e em desenvolvimento é frequente ineficaz e pouco estabelecida, devido à falta de cooperação entre partes interessadas, fragilidades estruturais institucionais e ausência de legislação específica para reciclagem, entre outros fatores. Os autores também afirmam que fatores socioeconômicos impactam a composição de resíduos, uma vez que níveis mais altos de alfabetização tendem a aumentar o conteúdo de papel e descarte de itens duráveis em vez de sua reparação.

As práticas de segregação na fonte também variam acentuadamente: em países desenvolvidos como EUA, Reino Unido, Bélgica, Espanha, França e Japão, a separação domiciliar é amplamente praticada, enquanto nos países em desenvolvimento o processamento ocorre geralmente após a coleta (Banerjee & Sarkhel. 2020). De modo semelhante, a adoção de tecnologias é desigual. Em países desenvolvidos, aplicam-se tecnologias avançadas, como tratamento térmico e aterros sanitários com recuperação de energia, visando proteger o meio ambiente e a saúde pública. Já em países menos desenvolvidos e em desenvolvimento, tendem a ser empregadas tecnologias mais baratas, como aterros sanitários, devido à ausência de alternativas mais sofisticadas e aos altos custos associados gerados (Mmereki et al., 2016). Iniciativas de economia circular, observadas na Europa, EUA e Japão, buscam uma perspectiva do “berço ao berço” para prevenir a perda de recursos. Contudo, Awino & Apitz (2024) alertam que a gestão de resíduos continuará sendo um desafio global a menos que esses conceitos sejam plenamente integrados.

2.5.1 Panorama Europeu

Na Europa, as estratégias de GRSU abrangem políticas em nível nacional e regional (Clemente et al., 2024). As regiões da União Europeia mais eficientes na gestão de RSU foram encontradas na Holanda, seguida pela Alemanha, França e Itália, respectivamente (Chioatto et al., 2023), embora o continente ainda precise avançar no desencorajamento da disposição em aterros sanitários (Karim & Wetterhan, 2020). A Alemanha destaca-se como exemplo de sucesso: a Lei de Ciclo Fechado de Substâncias introduziu o princípio do “poluidor-pagador”, a Portaria sobre Armazenamento de

Resíduos proibiu o descarte de resíduos não tratados em aterros, e a Portaria de Embalagens exigiu embalagens ecologicamente compatíveis e sua recuperação (Zhang et al., 2010). A Dinamarca, por sua vez, transformou seu sistema de GRSU de um modelo insustentável na década de 1970 para um dos mais eficientes do mundo, por meio de impostos sobre os aterros e incineração, sistemas de coleta seletiva, metas de reciclagem e proibição do descarte de resíduos incineráveis em aterros a partir de 1997 (Iyamu et al., 2020). A cidade de Berlim também registrou queda significativa na disposição de resíduos entre 1992 e 2012, reflexo direto de políticas eficazes (Ding et al., 2021).

2.5.2 Panorama Asiático

Na Ásia, grande parte dos resíduos ainda é descartado de forma inadequada, em lixões a céu aberto ou por meio de queima, e o continente apresentou desempenho inferior na matriz de decisão de GRSU em comparação com EUA e Europa (Karim & Wetterhan, 2020). Em Singapura, a gestão é regulamentada pela Lei de Saúde Pública (EPHA), seguindo uma hierarquia que prioriza redução e reutilização na fonte, reciclagem, incineração e, por fim, aterramento, com metas para 2030 de 70% de reciclagem geral e 30% de reciclagem doméstica (Ding et al., 2021). Na China, a classificação de resíduos tem recebido maior atenção nos últimos anos. Embora a taxa de reciclagem de RSU tenha aumentado de 12,1% em 2006 para 17% em 2011, houve uma queda para 15,6% em 2015 (Ding et al., 2021). Em resposta, o Conselho de Estado publicou em 30 de março de 2017 o "Aviso do Plano de Implementação do Sistema de Classificação de Resíduos do Ministério da Habitação e Desenvolvimento Urbano-Rural (MOHURD)". O plano estabeleceu a meta de atingir uma taxa mínima de reciclagem de 35% para resíduos domésticos até 2021. Além disso, 46 cidades importantes implementariam a classificação de resíduos domésticos e resíduos perigosos em categorias predefinidas (Ding et al., 2021).

2.5.3 Panorama Norte Americano

Nos Estados Unidos, a estruturação da GRSU iniciou-se a partir da década de 1880, quando epidemias recorrentes evidenciaram a necessidade de sistemas organizados. Inovações tecnológicas foram progressivamente incorporadas, e a Lei de Conservação e Recuperação de Recursos de 1976 (RCRA) forçou o fechamento dos lixões municipais (Iyamu et al., 2020). Em 2015, o país empregava um conjunto diversificado de técnicas de gestão (Hayda et al., 2023), mas ainda destinava mais da metade dos RSU a aterros

sanitários, indicando a necessidade de avançar na redução dessa prática (Karim & Wetterhan, 2020; Awino & Aritz, 2024).

As similaridades observadas nos casos de sucesso, como Alemanha e Dinamarca, apontam para a importância de uma forte legislação, políticas fiscais incentivadoras (como impostos sobre aterros), engajamento público e investimentos em infraestrutura e tecnologia (Mmereki et al., 2016). Em contraste, as regiões com maiores desafios demonstram a necessidade de abordar fragilidades institucionais, promover a cooperação entre partes interessadas e desenvolver uma cultura de separação na fonte e economia circular (Aparcana, 2017). As constatações sugerem que, embora existam disparidades significativas na adoção de tecnologias e nas taxas de reciclagem, a integração de conceitos de economia circular e a implementação de políticas de responsabilidade estendida do produtor são caminhos promissores para todos os contextos, independentemente do nível de desenvolvimento econômico (Mmereki et al., 2016; Singh et al., 2014).

3 METODOLOGIA

Este capítulo descreve a abordagem metodológica adotada para avaliar o sistema de gestão de RSU do município de Medianeira, detalhando o desenho de investigação, os procedimentos de recolha e tratamento de dados, e os critérios e ferramentas utilizados para estimar o potencial energético do biogás e a pegada de carbono do sistema. São apresentadas a caracterização da área de estudo, a análise da estrutura normativa e legislativa, a construção de inventários de dados operacionais e a modelação da produção de biogás via LandGEM, bem como a aplicação do software SWEET para quantificação das emissões de GEE. Por fim, descreve-se a definição e a aplicação de indicadores de sustentabilidade, organizados nas dimensões social, ambiental-operacional, político-institucional e económica, permitindo uma avaliação integrada do desempenho do sistema municipal de RSU.

3.1 Abordagem geral e desenho metodológico

Este estudo adota uma abordagem integrada para avaliar o sistema de gestão de RSU do município de Medianeira (Paraná, Brasil), com ênfase na análise do desempenho operacional, na estimativa do potencial de recuperação energética do biogás e na avaliação ambiental por meio do indicador de ACV - pegada de carbono. Essa abordagem permite identificar lacunas no contexto regulatório e operacional, bem como práticas que possam ser aprimoradas. A avaliação do desempenho focará na eficiência das atividades diárias de gestão, enquanto a avaliação do desempenho ambiental concentrar-se-á especificamente no indicador de pegada de carbono. Isso implica uma análise das emissões de GEE ao longo de todas as etapas de gestão dos RSU, sem contemplar todos os múltiplos indicadores de uma ACV completa.

O desenho de investigação baseia-se numa combinação de análise documental (regulação, planos municipais, relatórios operacionais), recolha e tratamento de dados empíricos (produção, composição, destinação de resíduos) e modelação técnico-económica (potencial energético de biogás e pegada de carbono). A metodologia dirigida permite compreender os determinantes regulatórios, técnicos e operacionais que explicam o contexto e propor recomendações adaptadas para o município. O desenho metodológico segue uma lógica sequencial e integrada, que compreende: caracterização do sistema → recolha de dados primários e secundários → modelação e quantificação do biogás e

pegada de carbono → cálculo e análise dos indicadores de sustentabilidade → proposição de recomendações práticas e políticas.

O fluxograma apresentado na figura 5 sintetiza a abordagem metodológica que foi adotada neste estudo, evidenciando a sequência lógica das etapas desde a caracterização do sistema municipal até a aplicação de indicadores e formulação de recomendações técnico-operacionais.

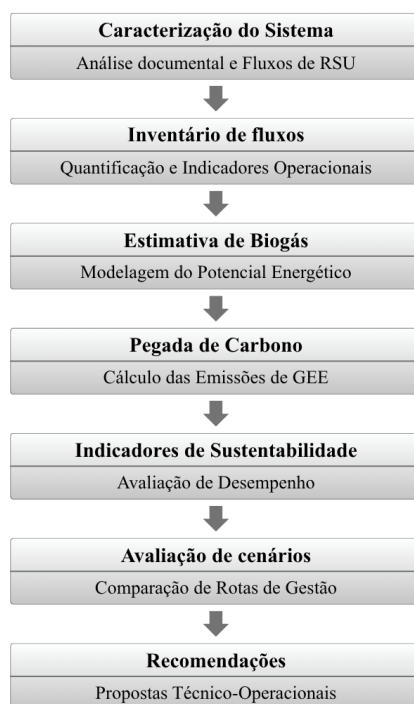


Figura 5. Síntese esquemática das etapas metodológicas do estudo.

3.2 Caracterização da área de estudo

3.2.1 Município de Medianeira (Brasil)

O município de Medianeira está localizado na região oeste do Paraná, abrangendo uma área de 328,732 km² (IBGE, 2024) e população total de 54.925 habitantes, sendo 5.815 população rural (SINISA, 2025). O Produto Interno Bruto (PIB) do município é de aproximadamente R\$ 55,3 mil, dos quais 48,6% advém de serviços, 30,7% de indústrias, 11% de administração pública e 9,7% da agropecuária (IBGE; CARAVELA). Em 2022, a densidade demográfica era de 165,39 habitantes por quilômetro quadrado (IBGE).

Segundo o Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB, 2018), o clima predominante é Cfa (subtropical húmido mesotérmico), caracterizado pela ausência de

estação seca definida e verões quentes, com precipitação média anual de 2.000 mm. As temperaturas médias variam entre 24 °C nos meses mais quentes (dezembro a março) e 17 °C nos meses mais frios (junho e julho).

A figura 6 apresenta a localização do município de Medianeira no Estado do Paraná.

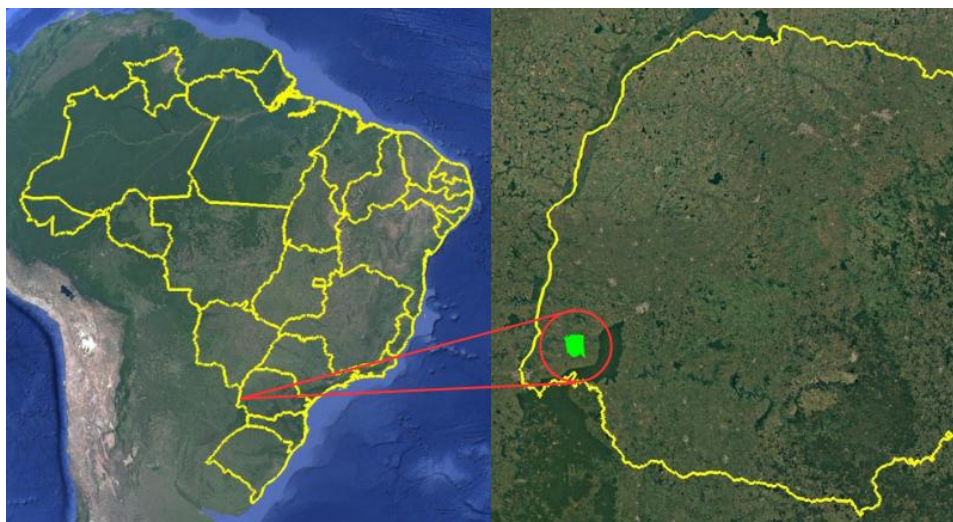


Figura 6. Localização do município de Medianeira – PR.

Fonte: Adaptado de Google Earth Pro, 2023.

3.3 Fontes de dados e procedimentos de recolha

A obtenção de dados primários e secundários fundamenta-se na consulta a documentos oficiais, relatórios de gestão e registros operacionais disponibilizados pelas entidades responsáveis, bem como informações técnicas provenientes de órgãos reguladores e ambientais.

As fontes de dados secundários incluem legislação nacional e municipal, planos estratégicos, relatórios técnicos e publicações científicas, acessados por meio de consultas sistemáticas a portais institucionais e governamentais, incluindo os sítios eletrônicos do Governo Federal, Governo do Estado do Paraná e da Prefeitura Municipal de Medianeira.

Os dados primários foram obtidos por meio de contatos com servidores da Secretaria do Meio Ambiente e técnicos responsáveis pelo Aterro Sanitário Municipal, incluindo informações sobre recepção, pesagem e disposição final dos RSU. Adicionalmente, foram utilizadas informações disponibilizadas pelo SINISA, IBGE, PMSB e ASSAMA.

3.4 Inventário de informação necessária para o cálculo dos indicadores e métricas de avaliação

A elaboração e análise dos inventários de fluxo de materiais de RSU de Medianeira fundamenta-se na coleta e sistematização de dados primários e secundários, coletados por fontes oficiais (SINISA, PMSB, ABRELPE, IBGE), no período de 2024.

Como não foi realizada coleta primária e/ou auditoria de campo, a validação dos dados foi feita cruzando informações de diferentes fontes oficiais e verificando a consistência dos fluxos de resíduos via balanços de massa, garantindo que as entradas e saídas estejam coerentes com os registros existentes.

Esses indicadores operacionais servirão como base para a análise integrada da sustentabilidade, complementando posteriormente os resultados da pegada de carbono calculada com o *software* SWEET e do potencial energético do biogás, estimado através do modelo LandGEM.

Tabela 12. Inventário de dados por indicador/métrica.

Indicador/ Métrica	Dados Necessários	Unidade
Geração per capita	RSU total gerado; População	t/ano; hab
Cobertura de coleta	Domicílios atendidos; População total	Nº de domicílios; hab
Taxa de reciclagem	RSU reciclados; RSU total	t/ano
Desvio do aterro	RSU não aterrados (reciclagem); RSU total	t/ano
Proporção de tratamento	Fluxos por rota (t/rota)	%
Ecoeficiência	Custos operacionais; RSU gerado	R\$/t
Vida útil do aterro	Capacidade remanescente; Entrada anual	m ³ ; m ³ /ano

3.5 Estimativa do potencial energético dos resíduos com valorização do biogás

A estimativa do potencial energético associado à valorização do biogás no aterro sanitário municipal de Medianeira seguiu uma abordagem integrada, que combina projeção populacional, quantificação da geração e disposição de RSU, modelação da produção de metano via método de Decaimento de Primeira Ordem (FOD) implementado no *software* LandGEM (USEPA, 2005) e avaliação de conversão energética. O horizonte temporal adotado abrange o período de 2006-2033, considerando o início da operação do

aterro sanitário municipal em 2006 e o encerramento previsto das novas células de resíduos em 2033, em conformidade com o Plano Diretor Municipal de Medianeira (Prefeitura Municipal de Medianeira, 2021) e com o horizonte de planejamento estabelecido no PMSB (PMSB, 2018).

3.5.1 Estimativa do volume de resíduos sólidos gerados

A projeção populacional de Medianeira e o cálculo da quantidade de RSU gerada são fundamentais para as análises de produção de biogás no aterro sanitário e das simulações de geração de GEE. A projeção populacional do município foi realizada com base nos dados dos Censos Demográficos do IBGE referentes aos anos de 2010 e 2022, aplicando dois métodos distintos: progressão aritmética e progressão geométrica.

Na progressão aritmética, foi calculada a taxa de crescimento médio anual (R), considerando a variação populacional entre os anos-base, conforme equação abaixo.

$$R = \frac{P2 - P1}{t2 - t1}$$

Onde:

P1 e P2 correspondem às populações nos anos-base;

T1 e t2 correspondem aos respectivos anos.

Para a progressão geométrica, foi determinada a taxa de crescimento médio anual (Q), conforme TSUTIYA (2006), utilizado em estudos de gestão de RSU (Morais et al., 2022). A fórmula aplicada é:

$$Q = \left(\frac{P2}{P1}\right)^{\frac{ty-t1}{t2-t1}}$$

A população projetada anual foi obtida a partir dessas taxas, adotando-se como valor de referência a média entre os resultados obtidos pelos dois métodos. A geração anual de RSU foi calculada como:

$$RSUy = Py \times GPC \times 365$$

Onde:

Py = população no ano de projeção;

GPC = geração per capita diária.

A GPC foi adotada como variável ao longo do horizonte de análise, com taxa de variação de 1% ao ano aplicada de forma composta em relação ao valor de referência do ano-base de 2024 (0,8646 kg/hab.dia), obtido a partir dos dados do SINISA (2024). A GPC para cada ano foi calculada conforme as equações:

$$GPC_y = 0,8646 \times (0,99)^{(2024-y)}, \text{ para } y < 2024$$

$$GPC = 0,8646 \times (1,01)^{(y-2024)}, \text{ para } y > 2024$$

Onde:

y = ano de projeção.

Essa abordagem está alinhada à metodologia adotada por Piñas et al. (2016) e permite capturar a evolução temporal da geração per capita em horizontes alargados de análise.

3.5.2 Modelagem da produção de biogás via LandGEM

O software LandGEM (*Landfill Gas Emissions Model*, USEPA, 2005) implementa o método de Decaimento de Primeira Ordem (FOD), recomendado pelo IPCC (2006, 2019) para estimativa de emissões de metano em aterros sanitários ativos. Este modelo considera a decomposição anaeróbica da fração orgânica dos RSU, incorporando cinética temporal, composição dos resíduos e condições climáticas locais de Medianeira.

A equação utilizada por esse método é a seguinte:

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 k \times Lo \left(\frac{Mt}{10} \right) e^{-kt_{i,j}}$$

Em que:

Q_{CH_4} = geração anual de metano para o ano calculado (m^3 /ano);

i = incremento de tempo de 1 ano;

n = ano do cálculo (ano inicial de abertura do aterro);

j = incremento do tempo de 0,1 ano;

k = taxa de decaimento do metano (ano^{-1})

Lo = capacidade potencial de geração do metano (m^3 /Mg);

M_t = massa de resíduos despejadas no ano em cada seção (Mg);

$t_{i,j}$ = Ano, em cada seção, de recebimento de massa de resíduos (tempo, com precisão de decimais; por exemplo, 3,2 anos).

Considerando que o modelo LandGEM foi desenvolvido pela U.S. EPA com base, predominantemente, em características operacionais, climáticas e de composição de resíduos observadas nos Estados Unidos, sua aplicação ao contexto brasileiro requer a seleção criteriosa dos parâmetros cinéticos, de modo a reduzir possíveis distorções nas curvas de projeção. Dessa forma, para o cenário de Medianeira (PR), os parâmetros fundamentais k (taxa de decaimento e geração de metano) e L_0 (potencial de geração de metano) foram definidos com base nas características climáticas e em valores reportados na literatura, conforme descrito a seguir (Feitosa & Jucá, 2014; IPCC, 2019; Lins et al., 2022; U.S. EPA, 2021).

- Taxa de decaimento de metano (k): Adotou-se $k = 0,05 \text{ ano}^{-1}$. A escolha não decorreu apenas da classificação climática do município, mas de sua compatibilidade com valores empregados na literatura para aterros localizados em regiões húmidas. Segundo o IPCC, a taxa de decaimento é influenciada pela composição dos resíduos, pelo teor de humidade, pelas condições climáticas, pelas características do local de disposição e pelas práticas operacionais.

Medianeira é caracterizada por clima subtropical húmido, sem uma estação seca bem definida. Em estudo de revisão sobre tecnologias de recuperação energética de resíduos, Galavote et al., (2022) indicam valores de k entre 0,05 e 0,06 ano^{-1} para aterros submetidos a condições húmidas, enquanto valores entre 0,02 e 0,03 ano^{-1} são associados a condições mais seca. Dessa forma, o valor de 0,05 ano^{-1} foi adotado como uma estimativa, situada no limite inferior do intervalo indicado para aterros húmidos.

- Potencial de geração de metano (L_0): Adotou-se $L_0 = 85 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{t}$, valor inferior ao parâmetro de 170 m^3/t utilizado como padrão regulatório pelo LandGEM. A definição desse parâmetro considerou os dados de composição gravimétrica dos RSU de Medianeira, nos quais a fração orgânica putrescível e biodegradável ultrapassa 50%. Considerou-se também que o potencial de geração de metano não depende apenas da proporção de matéria orgânica, mas de sua degradabilidade, do teor de carbono orgânico degradável, da humidade, das condições de disposição e da fração efetivamente convertida em metano. O IPCC

estabelece que o potencial de geração deve ser estimado a partir da massa de carbono orgânico degradável decomponível e da fração de metano presente no biogás.

A adoção destes coeficientes específicos e calibrados para a realidade do Sul do Brasil garante maior robustez estatística ao inventário preditivo, mitigando sobre-estimativas no pico de produção de biogás e permitindo um dimensionamento técnico e económico mais fiável para as alternativas de valorização energética propostas nesta pesquisa.

Tabela 13. Parâmetros adotados no software LandGEM.

Parâmetros	Valores
Taxa de decaimento do metano (k) (ano⁻¹)	0,05
Capacidade potencial de geração do metano (Lo) (m³/Mg)	85
Percentagem de metano contido no biogás (%)	50

Fonte: USEPA, 2005.

3.5.3 Estimativa de potência e energia disponíveis no aterro

A partir da vazão estimada de metano gerado por ano, pode-se determinar, por meio da equação abaixo, a potência e energia utilizando as seguintes equações:

$$P = \frac{Q \times PCI \times \eta}{860.000}$$

$$E = P \times \text{Rend} \times \text{Tempo de Operação}$$

Onde:

P = potência disponível (MW);

Q = geração anual de metano por ano calculado (m³ CH₄/ ano);

PCI = poder calorífico do metano (kcal /m³ CH₄);

η = eficiência dos motores (em média, 0,28);

860.000 = conversão de kcal/h para MW;

E = energia disponível (MWh/dia);

Rend = rendimento de motores operando a plena carga (estimado em 0,87);

Tempo de operação = tempo de operação dos motores.

Os valores adotados de $PCI_{CH_4} = 5.500 \text{ kcal/m}^3$, supondo 50% de metano presente no biogás do aterro e o tempo de operação dos motores de 24 horas por dia (Felca et al., 2021).

3.6 Quantificação da pegada de carbono associada ao sistema de gestão de RSU

A quantificação da pegada de carbono associada ao sistema de gestão de RSU foi realizada com o objetivo de estimar as emissões de GEE decorrentes das diferentes etapas do gerenciamento dos resíduos no município de Medianeira. Para isso, utilizou-se o *Solid Waste Emissions Estimation Tool* (SWEET v5.0), ferramenta desenvolvida pela U.S. EPA com o apoio da *Global Methane Initiative* (GMI) e suporte da *Climate and Clean Air Coalition* (CCAC), alinhada às diretrizes do IPCC (2006/2019). A ferramenta permite avaliar as emissões provenientes de diferentes etapas do sistema, incluindo coleta, transporte, tratamento e disposição final dos resíduos.

3.6.1 Delimitação das fronteiras do sistema

A definição das fronteiras do estudo é uma etapa fundamental para a quantificação da pegada de carbono, pois estabelece os limites dentro dos quais as emissões de GEE são consideradas. A delimitação adotada segue as diretrizes do IPCC (2006/2019), considerando as etapas operacionais diretamente associadas ao sistema municipal de gestão de RSU de Medianeira.

No presente estudo, a fronteira organizacional corresponde ao sistema municipal de gestão de RSU de Medianeira, incluindo as atividades sob responsabilidade da administração pública municipal e de operadores responsáveis pela execução dos serviços de limpeza urbana e manejo de resíduos.

A fronteira operacional compreende as principais etapas do sistema, incluindo a geração de resíduos, a coleta e transporte, bem como a disposição final em aterro sanitário. Essas etapas representam as principais fontes potenciais de emissões de gases de efeito estufa associados ao sistema brasileiro.

Serão consideradas na análise as emissões resultantes da decomposição dos resíduos no aterro municipal, bem como emissões associadas ao consumo de combustível nas atividades de coleta e transporte. Atividades relacionadas à fabricação de equipamentos, produção de veículos ou infraestrutura do sistema não são contempladas, por se situarem além das fronteiras operacionais do sistema e das capacidades de modelagem no SWEET v5.0.

3.6.2 Identificação das fontes de emissão

A modelagem utiliza como base o GWP100 (*Global Warming Potential*) do quinto e sexto relatório de avaliação (AR5 / AR6) do IPCC, permitindo a conversão de gases e poluentes de vida curta em uma unidade comum de dióxido de carbono equivalente (CO₂eq). A tabela 14 apresenta a matriz de fontes e os poluentes monitorados pelo sistema.

Tabela 14. Matriz de fontes e poluentes monitorados do sistema de gestão de RSU.

Etapas do gerenciamento	Fontes de emissão	Poluentes climáticos (CO₂e)	Poluentes atmosféricos (t)
Coleta e transporte	Caminhões compactadores e veículos leves	CO ₂ , CH ₄ fóssil, BC	NO _x , SO _x , PM
Disposição final	Decomposição em aterros e incêndios	CH ₄ (biogénico), BC	-
Tratamento/ Reciclagem	Operação de pátios e prensas	CO ₂ , CH ₄ , BC	NO _x , PM
Queima Aberta	Combustão irregular de resíduos	CO ₂ , CH ₄ , BC, OC	NO _x , SO _x , PM

Fonte: Adaptado de U.S. EPA, 2005.

Para a consolidação da pegada de carbono, adotam-se os seguintes parâmetros de conversão para o horizonte de 100 anos, conforme as premissas do modelo (IPCC AR6, 2021) (tabela 15).

Tabela 15. Parâmetros de conversão GWP100 (IPCC AR5 / AR6)
(Manual SWEET v5.0).

Poluente	Nome	GWP100 Adotado	Unidade de reporte
CO₂	Dióxido de carbono	1	tCO ₂ e
CH₄ (bio)	Metano biogénico	27	tCO ₂ e
CH₄ (fóssil)	Metano fóssil	29,8	tCO ₂ e
BC	Carbono negro	900	tCO ₂ e
OC	Carbono orgânico	-69	tCO ₂ e
N₂O	Óxido nitroso	298	tCO ₂ e

Fonte: IPCC AR5 / AR6, 2021

3.6.3 Quantificação das emissões de gases de efeito estufa com SWEET

A alimentação do modelo segue a estrutura de entrada de dados (*Blue Tabs*) sendo:

- Informações gerais: Dados demográficos de Medianeira (população com coleta formal e informal, taxa de geração per capita e a caracterização gravimétrica detalhada (alimentos, papel, plástico, vidro, metais, etc.), totalizando 100% da massa gerada. Os parâmetros climáticos locais (precipitação e temperatura média) são configurados para definir as taxas de decomposição de resíduos.
- Coleta e transporte: Composição da frota municipal e terceirizada, tipo de combustível (diesel/gasolina), consumo anual ou quilometragem e o tempo médio de marcha lenta (*idling*).
- Disposição final: Dados históricos de abertura, profundidade média, massa depositada anualmente e a eficiência do sistema de extração de gás (LFG). O modelo utiliza o algoritmo *Landfill Gas Emissions Model* (LandGEM) para projetar a curva de geração de metano.
- Desvio de resíduos: Os dados da Unidade de Valorização de Recicláveis (UVR) são inseridos para calcular o impacto do desvio de materiais que deixam de ser dispostos em aterro, gerando reduções nas emissões fugitivas e créditos de emissões evitadas no ciclo de vida.
- Manuseio de equipamentos: São incluídas as horas de operação e potência de escavadeiras, carregadeiras e demais equipamentos utilizados na operação do aterro e da unidade de triagem.

As emissões totais calculadas são convertidas em dióxido de carbono equivalente (CO₂eq) utilizando os valores de Potencial de Aquecimento Global (GWP) do IPCC AR5 e AR6 (2021). O resultado obtido representa a pegada de carbono do sistema municipal de resíduos sólidos de Medianeira no cenário base, refletindo a contribuição das etapas de geração, coleta, transporte e disposição em aterro.

Devido às limitações do software, o início da operação do aterro foi considerado como o ano 2000, embora a operação real tenha iniciado em 2006.

3.6.4 Definição dos cenários de mitigação

Para avaliar o potencial de redução das emissões de GEE do sistema de gestão de RSU de Medianeira, foram construídos e simulados quatro cenários alternativos ao

cenário base. Todos têm início em 2027 e foram definidos com base na viabilidade técnica municipal, no alinhamento com as metas do PLANARES e nas práticas documentadas na literatura. A tabela 16 sintetiza os cenários propostos.

Tabela 16. Cenários de mitigação simulados no SWEET v5.0.

Cenário	Designação	Descrição
C1	Desvio da fração orgânica para compostagem	Desvio de 30% da fração orgânica dos RSU para compostagem.
C2	Valorização energética do biogás	Instalação de sistema de queima ativa (flare) com eficiência de captação de 60%.
C3	Expansão da reciclagem via ASSAMA	Aumento da taxa de reciclagem para 20% total de RSU gerado.
C4	Cenário integrado – rota da economia circular	Aplicação simultânea de C1, C2 e C3.

3.7 Construção e aplicação dos indicadores de sustentabilidade

A avaliação da sustentabilidade do sistema de gestão de RSU de Medianeira foi realizada por meio da aplicação de indicadores, definidos a partir de referências consolidadas na literatura e adaptados à realidade local.

Inicialmente, foi conduzido um levantamento bibliográfico com o objetivo de identificar modelos e indicadores utilizados em estudos semelhantes, com destaque para os trabalhos de Milanez (2002), Polaz e Teixeira (2009), Santiago e Dias (2012), Oliveira et al, (2021), Novaes et al. (2023) e Carvalho et al. (2022), além de diretrizes estabelecidas pela PNRS e PLANARES.

A partir desse levantamento, foi possível identificar um conjunto amplo de indicadores utilizados na avaliação da gestão de RSU. No entanto, considerando as especificidades do município de Medianeira, bem como a disponibilidade de dados, optou-se por realizar uma seleção e adaptação desses indicadores, priorizando aqueles que pudessem ser efetivamente aplicados ao contexto estudado.

Dessa forma, o conjunto de 22 indicadores, distribuídos entre 4 dimensões (social, ambiental-operacional, político-institucional e econômica) foi selecionado com base em três critérios:

1. Normatividade oficial: Indicadores do SINISA e obrigações legais da PNRS (Lei 12.305/2010);
2. Operacionalidade local: Indicadores mensuráveis com dados públicos disponíveis no município de Medianeira;

3. Consistência técnica: Seleção equilibrada, garantindo cobertura das quatro dimensões da sustentabilidade.

3.7.1 Estruturação do sistema de indicadores e composição por dimensões

Os indicadores foram organizados em uma matriz estruturada por dimensões, de modo a possibilitar a análise integrada dos diferentes aspectos da sustentabilidade. A quantidade de indicadores em cada dimensão foi definida com base na relevância dos temas abordados e na disponibilidade de dados para o município em estudo.

Dimensão social

Os indicadores da dimensão social e seus respectivos critérios de avaliação são apresentados na tabela 17.

Tabela 17. Indicadores de sustentabilidade para a dimensão social.

Indicador	Classificação
Percentual de pessoas atendidas pela coleta seletiva	(MD) < 30%. (D) 31-90%. (F) 91-100%.
Grau de seletividade do serviço de coleta de RSU	(MD) Apenas coleta destinada ao aterro. (D) Coleta destinada ao aterro, mais coleta de recicláveis secos. (F) Coleta de rejeitos, mais coleta de recicláveis secos, mais coleta de resíduos úmidos.
Instrumentos legais na relação com as organizações de catadores.	(MD) Não há contrato ou convenio. (D) Há convênio sem remuneração. (F) Há contrato ou convenio com remuneração.
Disponibilização dos serviços públicos de coleta ou recepção de RS na área rural.	(MD) Serviço de coleta ou recepção de RS insuficiente. (D) Serviços de coleta ou recepção de RS suficiente, mas apenas destinada ao aterro. (F) Serviços de coleta ou recepção de recicláveis, mais coleta e recebimento de rejeitos, mais aproveitamento dos resíduos orgânicos na propriedade rural.
Catadores organizados (cooperativas, associações)	(MD) Presença de catadores na área de disposição final. (D) Parte organizado. (F) Todos organizados.

Fonte: Adaptado de Milanez (2002), Polaz e Teixeira (2009), Santiago e Dias (2012), Oliveira et al, (2021), Novaes et al. (2023) e Carvalho et al. (2022).

Dimensão ambiental-operacional

A seguir, na tabela 18, apresentam-se os indicadores da dimensão ambiental-operacional.

Tabela 18. Indicadores de sustentabilidade para a dimensão ambiental-operacional.

Indicador	Classificação
Possui um Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos?	(MD) Não possui. (D) Em processo de conclusão. (F) Sim.
Geração de RSU per capita (kg/hab.ano)	(MD) > 379. (D) 301-378. (F) < 300.
Existência de coleta seletiva no município	(MD) Não existe. (D) Em fase de implantação. (F) Sim.
Existência de lixeiras públicas	(MD) Não possui. (D) Somente no centro da cidade. (F) Em toda área urbana.
Eficiência de coleta convencional	(MD) < 30%. (D) 31-90%. (F) 91-100%.
Veículo coletor específico e apropriado em termos de capacidade, tratamento para as necessidades de geração local	(MD) Não possui. (D) Sim (também utilizado em outras funções). (F) Sim (utilizado somente para esta função).
Grau de recuperação dos passivos ambientais (antigos lixões)	(MD) As áreas degradadas não foram mapeadas ou não houve recuperação das áreas identificadas. (D) As áreas degradadas foram mapeadas, porém não devidamente recuperadas. (F) Todas as áreas degradadas foram devidamente recuperadas.
Índice de recuperação de materiais recicláveis	(MD) Até 5%. (D) Entre 5,1% e 10%. (F) Acima de 10,1%.
Existência de aterro para resíduos inertes (resíduos de construção e demolição)	(MD) Não possui. (D) Sim e apenas para disposição. (F) Sim e com reaproveitamento.

Fonte: Adaptado de Milanez (2002), Polaz e Teixeira (2009), Santiago e Dias (2012), Oliveira et al, (2021), Novaes et al. (2023) e Carvalho et al. (2022).

Dimensão político-institucional

Na sequência, são apresentados, na tabela 19, os indicadores da dimensão político-institucional.

Tabela 19. Indicadores de sustentabilidade para a dimensão político-institucional.

Indicador	Classificação
Estruturação da gestão de RSU na administração pública municipal	(MD) Inexistência de setor específico para RSU na administração municipal. (D) Existência de setor específico para GRS, porém sem pessoal qualificado. (F) Existência de setor específico para RSU com pessoal qualificado.
Participação da população através de canais específicos para gestão dos RSU	(MD) Inexistência dos canais de participação específicos para RSU. (D) Existência dos canais de participação específicos, com pouca utilização pela população. (F) Existência de canais específicos e sua utilização pela população.
Participação Social na elaboração do PMGRS	(MD) Audiência Pública com pouca participação da população. (D) Audiência pública com participação da população. (F) Participação da população em todas as etapas de elaboração do plano e na audiência pública.
Capacitação contínua de agentes que atuam na área da limpeza pública	(MD) Não possui. (D) Capacitação de forma esporádica. (F) Constante capacitação.

Fonte: Adaptado de de Milanez (2002), Polaz e Teixeira (2009), Santiago e Dias (2012), Oliveira et al, (2021), Novaes et al. (2023) e Carvalho et al. (2022).

Dimensão Económica

Por fim, apresenta-se na tabela 20, os indicadores de sustentabilidade da dimensão econômica.

Tabela 20. Indicadores de sustentabilidade para a dimensão económica.

Indicador	Classificação
Origem dos recursos para o gerenciamento de resíduos sólidos	(MD) Não existência de cobrança de taxa deste serviço. (D) Cobrança de taxa junto com o IPTU. (F) Existe taxa específica para o serviço de limpeza pública.
Aplicação dos recursos provenientes da coleta seletiva⁴	(MD) Outra. (D) Atividades socioculturais e assistenciais. (F) Na própria manutenção da coleta seletiva.
Investimento financeiro em Educação Ambiental para a Gestão de RSU	(MD) Não há investimento. (D) Investimento insuficiente (F) Investimento suficiente

Fonte: Adaptado de Milanez (2002), Polaz e Teixeira (2009), Santiago e Dias (2012), Oliveira et al, (2021), Novaes et al. (2023) e Carvalho et al. (2022).

Tabela 20 (cont). Indicadores de sustentabilidade para a dimensão económica.

Indicador	Classificação
Iniciativas de Logística reversa no município	(MD) Inexistência de iniciativas de logística reversa no município.
	(D) Existência de iniciativas pontuais de logística reversa sem divulgação, caracterizadas pelo uso da população.
	(F) Existência crescente de pontos de recebimento de produtos sujeitos a logística reversa, de forma articulada, com divulgação e uso da população.

Fonte: Adaptado de Milanez (2002), Polaz e Teixeira (2009), Santiago e Dias (2012), Oliveira et al, (2021), Novaes et al. (2023) e Carvalho et al. (2022).

3.7.2 Método de avaliação e agregação dos resultados

Para a avaliação da tendência de sustentabilidade de cada indicador, foi adotada uma classificação em três níveis: muito desfavorável (MD), desfavorável (D) e favorável (F), conforme a parametrização proposta por Milanez (2002) e abordagens semelhantes na literatura (Polaz e Teixeira, 2009; Camargo, 2014; Oliveira et al., 2021).

Esta classificação permitiu uma análise qualitativa e comparativa do desempenho do sistema em cada dimensão da sustentabilidade.

Agregação por dimensão

Os indicadores foram inicialmente avaliados de forma individual e, posteriormente, agregados por dimensão. O desempenho de cada dimensão foi obtido através do cálculo da percentagem de indicadores classificados como favoráveis (F) relativamente ao total de indicadores da respetiva dimensão.

Índice global de sustentabilidade

O índice global de sustentabilidade foi determinado pela média aritmética simples dos quatro índices dimensionais, atribuindo-se peso igual a cada dimensão. Esta opção metodológica assegura uma abordagem equilibrada entre as diferentes dimensões da sustentabilidade.

Esta opção encontra suporte em Santiago e Dias (2012), que, na validação da sua matriz de indicadores através do método Delphi, verificaram a ausência de diferenciação significativa entre os pesos atribuídos às dimensões, tendo optado igualmente por uma ponderação equitativa.

Desta forma, o presente estudo adota uma abordagem integrada e não ponderada, garantindo coerência metodológica e comparabilidade dos resultados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta e discute os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia descrita no capítulo anterior, organizados em seis secções temáticas que percorrem o sistema de gestão de RSU de Medianeira de forma progressiva. Parte-se do diagnóstico institucional e operacional do município, abrangendo o modelo de governança, o arranjo sociotécnico da coleta seletiva e as condições de infraestrutura de disposição final, para em seguida caracterizar os fluxos de materiais e o desempenho operacional do sistema. Com base nesse diagnóstico, são estimados o potencial de geração do biogás e de recuperação energética do aterro, seguidos da quantificação da pegada de carbono do sistema.

A partir dos resultados de emissões, são analisados quatro cenários alternativos de mitigação de GEE, permitindo avaliar o impacto de diferentes estratégias de gestão sobre a trajetória temporal das emissões. O capítulo encerra com a avaliação do desempenho do sistema por meio de indicadores de sustentabilidade organizados em quatro dimensões, oferecendo uma leitura integrada das condições atuais e do potencial de melhoria do sistema de gestão municipal.

4.1 Caracterização Institucional e Arranjos Operacionais de Medianeira

O mapeamento da governança e a análise dos arranjos operacionais constituem o primeiro bloco de resultados empíricos desta investigação. Esta secção transcende a mera descrição administrativa, avaliando criticamente a eficiência dos modelos de contratualização, a capacidade de universalização dos serviços e o nível de conformidade do município face às exigências da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS).

Considerando que o enquadramento legal e normativo da gestão de RSU já foi apresentado nas secções anteriores, nesta etapa ele é retomado apenas como referência para a análise dos resultados. Para esse efeito, foram considerados a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) – Lei nº 12.305/2010 e regulamentada pelo Decreto nº 10.936/2022; o Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Paraná – PERS/PR; e a Lei Municipal nº 1.109/2022, que estabelece a Política Municipal de Meio Ambiente de Medianeira.

Com base nesses instrumentos, a análise concentra-se na forma como as diretrizes nacionais, estaduais e municipais se materializam na estrutura administrativa e operacional do município. São examinadas, portanto, a distribuição das responsabilidades

institucionais, a organização dos serviços de coleta e transporte, a cobertura do atendimento, os mecanismos de coleta seletiva, a destinação final dos resíduos, as ações de educação ambiental e o funcionamento do aterro sanitário municipal.

4.1.1 Modelo de Governança e Eficiência da Coleta Convencional (Fração Indiferenciada)

Os resultados do levantamento institucional apontam para uma evolução na estrutura de governança de Medianeira. A responsabilidade macrogestora do sistema de RSU, originalmente tutelada pela Secretaria de Obras e Serviços Urbanos, encontra-se atualmente centralizada na Secretaria de Agricultura Sustentável e Abastecimento. Este órgão atua como o ente regulador e fiscalizador das atividades de coleta, limpeza urbana e gerenciamento de fluxos especiais, balizado pelas diretrizes do Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB) de 2018.

No que concerne à execução operacional da coleta convencional (rejeitos e orgânicos indiferenciados), o município adota um modelo híbrido (direto e indireto). O principal resultado dessa articulação jurídica é o Contrato Administrativo nº 194/2021, que delega à empresa terceirizada CORAE Conservação e Limpeza LTDA os serviços de coleta, transporte e limpeza urbana (roçada e capina).

Os dados consolidados junto ao Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento e Manejo de Resíduos Sólidos (SINISA) revelam que este arranjo operacional absorve uma força de trabalho de 72 funcionários e uma frota ativa de 12 caminhões. Como resultado direto desta estrutura, o diagnóstico de 2024 demonstrou a universalização plena (100% de cobertura) do serviço de coleta domiciliar, atendendo a totalidade dos 57.120 habitantes da área urbana e do distrito de Maralúcia, com uma frequência mínima semanal. A distribuição espacial e temporal deste serviço está consolidada no cronograma de frequências apresentado na Tabela 21.

Tabela 21. Cronograma da coleta de resíduos orgânicos e rejeitos.

Bairros	Coleta	Período do dia
Centro	Diária	Tarde
Cidade Alta	Diária	Manhã
Itaipu, São Cristóvão, Condá e Belo Horizonte	Segunda-feira; Quarta- feira; Sexta-feira	Manhã
Ipê, Nazaré, Santos Dumont, Panorâmico, Independência, Jardim Irene e Frimesa	Terça-feira; Quinta-feira e Sábado	Manhã

Fonte: Adaptado de Prefeitura de Medianeira (2026).

4.1.2 O Arranjo Sociotécnico da Coleta Seletiva e Desempenho da ASSAMA

Em contraste com o modelo terceirizado da fração indiferenciada, a rota de reciclagem de Medianeira assenta num arranjo sociotécnico de forte apelo inclusivo, operacionalizado pela ASSAMA (Associação dos Agentes do Meio Ambiente de Medianeira). Instituída em 2003 e em funcionamento contínuo desde 2005, a associação atua como o braço executor da coleta seletiva diária, estendendo a sua cobertura às zonas urbana e rural - esta última estruturada de forma eficiente através de pontos de transbordo estratégicos.

O diagnóstico de produtividade da ASSAMA para o ano-base de 2024 revelou um contingente de 42 trabalhadores associados, responsáveis pela recuperação de aproximadamente 2.110 toneladas de resíduos recicláveis. Do ponto de vista socioeconómico, a triagem, prensagem, enfardamento e posterior comercialização destes materiais, realizados numa unidade contígua ao aterro, geram receitas distribuídas de forma proporcional à participação de cada associado, validando o modelo de responsabilidade partilhada exigido pela PNRs.

Contudo, sob a ótica da eficiência global do ciclo de vida, a análise cruzada destes dados revela um resultado crítico: apesar do valor expressivo de 2.110 toneladas coletadas seletivamente, este volume representa uma fração minoritária quando confrontado com o potencial total de geração do município. Este indicador evidencia uma severa limitação na taxa de captura na fonte, traduzindo-se na perda económica de recursos recicláveis que acabam por ser desviados e soterrados junto à fração indiferenciada na coleta convencional.

A infraestrutura atual da associação, que mitiga parcialmente este cenário, inclui prensas hidráulicas, balanças, caminhões, retroescavadeira e carrinhos elétricos. Este

arranjo operacional é fortemente subsidiado pelo poder público municipal (fornecimento de infraestrutura física, logística de transporte e benefícios sociais) e potencializado pelo suporte técnico da Itaipu Binacional, que atua no monitoramento e aporte de equipamentos. O mapeamento do fluxo semanal de coleta seletiva encontra-se detalhado na Tabela 22.

Tabela 22. Cronograma operacional da coleta de resíduos recicláveis.

Bairros	Dia de coleta
Condá; Belo Horizonte	Segunda-feira
Centro (entre Av. Rio Grande do Sul até a Av. 24 de Outubro; entre Rua Bahia e Rua Iguaçu; entre Rua Goiás e Rua Guaíra); Santos Dumont, Cidade Alta I e II; Panorâmico	Terça-feira
Parque Independência; Itaipu; São Cristóvão	Quarta-feira
Área Industrial; Ipê; Nazaré; Centro; Cidade Alta (entre a Rua Bahia e Rio Branco; entre Rua Riachuelo e Rua Iguaçu)	Quinta-feira
Frimesa; Jardim Irene; Paraíso	Sexta-feira
Quadrante central entre as ruas Riachuelo, Rio Branco, Av. 24 de Outubro e Rua Goiás	Segunda-feira, quarta-feira e sexta-feira

Fonte: Prefeitura de Medianeira, 2026

Adicionalmente aos recicláveis comuns, o município possui um fluxo estruturado para resíduos eletroeletrônicos e pilhas pós-consumo, executado em parceria entre a Prefeitura e a ASSAMA. A iniciativa ocorre de forma programada em meses bimestrais (fevereiro, abril, junho, agosto, outubro e dezembro) na Praça Ângelo Darolt. O cronograma institucional fixa plantões de descarte divididos em blocos de dois dias consecutivos por período (19 e 20/02; 23 e 24/04; 11 e 12/06; 13 e 14/08; 22 e 23/10; 14 e 15/12).

4.1.3 Diagnóstico da Infraestrutura de Disposição Final e Passivos Ambientais

A avaliação da última etapa do sistema revela que Medianeira erradicou o seu antigo passivo ambiental (lixão a céu aberto), o qual se encontra desativado e sob um Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD). Desde 2006, a disposição final é realizada num aterro sanitário de 5,2 hectares, localizado a 1,5 km do perímetro urbano (PR-495).

O histórico de engenharia do local aponta para a finalização e fechamento de quatro células primárias, que operaram por um período acumulado de 10 anos. No entanto, a análise do cenário atual expõe um estrangulamento de capacidade: a célula em atividade, cujo horizonte projetado de saturação estava previsto para o ano de 2025, continua em operação além do seu limite teórico, operando em regime de sobrevida enquanto uma nova célula é construída.

Os dados de vistoria indicam que o projeto da nova célula em execução contempla critérios técnicos rigorosos de engenharia sanitária:

- Processos de terraplanagem estrutural;
- Sistemas de impermeabilização de base reforçada;
- Redes de drenagem de lixiviados (chorume) conectadas a lagoas de armazenamento;
- Sistemas verticais de exaustão e saída de gases.

Atualmente, o monitoramento mássico dos RSU que dão entrada no sistema baseia-se estritamente na pesagem bruta e tara da frota de caminhões através de uma balança rodoviária instalada no portal do aterro.

4.1.4 Discussão Integrada das Limitações do Sistema

O cruzamento analítico de todos os dados operacionais apresentados neste capítulo permite extrair um diagnóstico claro sobre a sustentabilidade de Medianeira e o nível de adequação de Medianeira frente às metas legais. Dessa forma, a tabela 23 avalia o grau de conformidade do arranjo municipal com as diretrizes e instrumentos da PNRS.

Tabela 23. Matriz de avaliação de conformidade de Medianeira face à Lei nº 12.305/2010.

Diretriz e Instrumento da PNRS	Situação prática encontrada em Medianeira	Status de conformidade
Não geração e redução (Art. 9º)	Ausência de incentivos fiscais e de programas contínuos de minimização de resíduos na fonte.	Não conforme
Universalização da coleta (Art. 7º)	Coleta convencional atinge 100% da população urbana e distrital regulamentada (SINISA, 2024).	Plenamente conforme
Coleta Seletiva Estruturada (Art. 36)	Rotas exclusivas implantadas nas zonas urbana e rural com cronograma semanal e ampla divulgação.	Plenamente conforme

Tabela 23 (cont.). Matriz de avaliação de conformidade de Medianeira face à Lei nº 12.305/2010.

Diretriz e Instrumento da PNRS	Situação prática encontrada em Medianeira	Status de conformidade
Inclusão de Catadores (Art. 7º, XII)	Integração formal da ASSAMA (42 associados) com repasse de renda, infraestrutura física e logística subsidiada.	Plenamente conforme
Logística Reversa (Art. 33)	Campanhas regulares bimestrais e centralizadas para descarte seguro de resíduos eletroeletrônicos e pilhas.	Plenamente conforme
Ordem de Prioridade no Manejo (Art. 9º)	Resíduos recolhidos pela CORAE (fração indiferenciada) são aterrados diretamente, sem triagem ou tratamento prévio.	Não conforme
Disposição Final Adequada (Art. 54)	Uso de aterro sanitário para disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos	Plenamente conforme

A análise integrada indica que Medianeira exibe um desempenho satisfatório nas dimensões social, de atendimento básico e de fluxos especiais. O índice de 100% de cobertura posiciona Medianeira significativamente acima da média ponderada brasileira, evidenciando a eliminação de lacunas de atendimento comuns em áreas periurbanas e rurais de outros municípios do mesmo porte. Da mesma forma, o arranjo sociotécnico construído junto à ASSAMA valida o modelo de responsabilidade compartilhada e inclusão produtiva exigido pela legislação federal. O programa bimestral de recolhimento de lixo eletrônico na Praça Ângelo Darolt consolida essa perspectiva ao viabilizar canais práticos de logística reversa pós-consumo, evitando a contaminação por metais pesados.

Em contrapartida, conforme evidenciado anteriormente, embora a coleta seletiva apresenta um volume relevante em termos absolutos, sua participação no fluxo total de resíduos gerados no município ainda é limitada. Esse resultado demonstra que parte expressiva dos materiais potencialmente recicláveis permanece incorporada aos resíduos destinados ao aterro sanitário, reduzindo a eficiência do aproveitamento material e contribuindo para o aumento da massa encaminhada à disposição final. Assim, o principal desafio não se restringe à existência da coleta seletiva, mas envolve a ampliação de sua cobertura, a melhoria da segregação na fonte e o fortalecimento da participação da população.

Ao não processar a fração indiferenciada, o sistema infringe o princípio da Ordem de Prioridade no Gerenciamento (Art. 9º da PNRS). Sob a ótica do ciclo de vida, o soterramento direto de materiais reaproveitáveis e matéria orgânica crua acelera drasticamente a saturação das células do aterro sanitário — o que justifica o atual estado de estrangulamento e sobrevida da célula ativa, cuja projeção teórica de esgotamento era prevista para o ano de 2025.

Além do impacto na vida útil física da infraestrutura, a digestão anaeróbia descontrolada da matéria orgânica no subsolo maximiza a geração de lixiviados e a pegada de carbono do município. Este fenômeno e as suas respectivas emissões de gases de efeito estufa (GEE) serão quantificados e modelados matematicamente através dos *softwares* LandGEM e SWEET nas seções seguintes.

4.2 Análise dos fluxos de materiais e desempenho operacional

4.2.1 Geração de resíduos

A evolução da geração total de RSU e do indicador per capita no triênio 2022-2024 é apresentado na figura 7. A geração total registrada foi de 34.743 toneladas em 2022, valor que apresenta discrepância significativa em relação aos anos subsequentes, possivelmente associada a inconsistência no registro ou consolidação dos dados pelo SINISA para esse ano, 15.647 toneladas em 2023 e 18.026 toneladas em 2024. No ano-base de 2024, a fração destinada ao aterro sanitário correspondeu a 15.916 toneladas (88,29%), enquanto 2.110 toneladas (11,71%) foram encaminhadas à triagem via coleta seletiva.

O indicador de geração per capita em 2022 foi de 609 kg/hab.ano (1,66 kg/hab.dia), 284,88 kg/hab.ano (0,78 kg/hab.dia) para o ano de 2023 e 2024 foi estimado em 315,73 kg/hab.ano (0,86 kg/hab.dia).

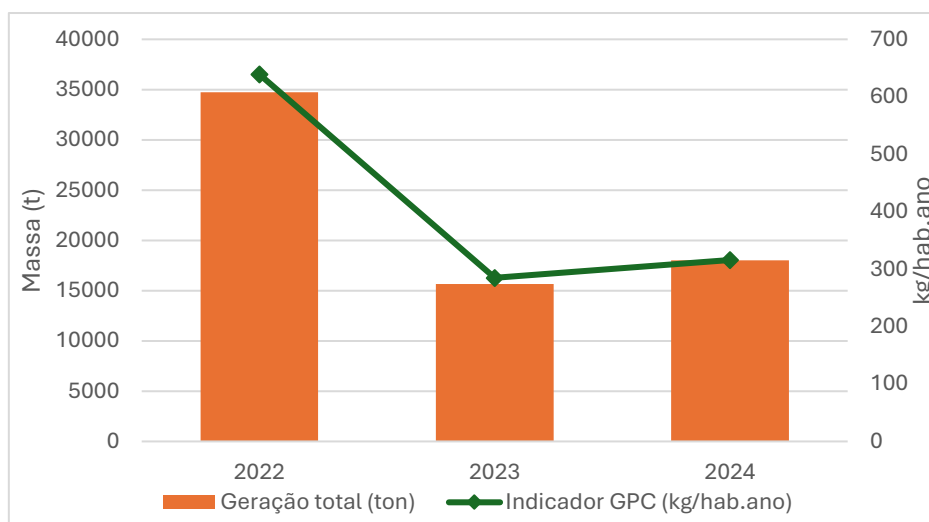


Figura 7. Evolução temporal da geração total de RSU e indicador específico per capita em Medianeira (2022-2024).

Fonte: Elaborado com base em dados SNIS (2022) e SINISA (2023/2024).

A composição gravimétrica estimada para os RSU de Medianeira é apresentada na figura 8. Diante da ausência de dados locais de caracterização gravimétrica, a distribuição percentual das frações foi estimada a partir dos parâmetros de referência para a América Latina do IPCC (2019), utilizada como dados de entrada no modelo SWEET. Essa abordagem encontra respaldo no próprio PMSB de Medianeira, que adotou estimativa similar com base em dados do Compromisso Empresarial para Reciclagem (CEMPRE), indicando cerca de 60% de matéria orgânica na composição local.

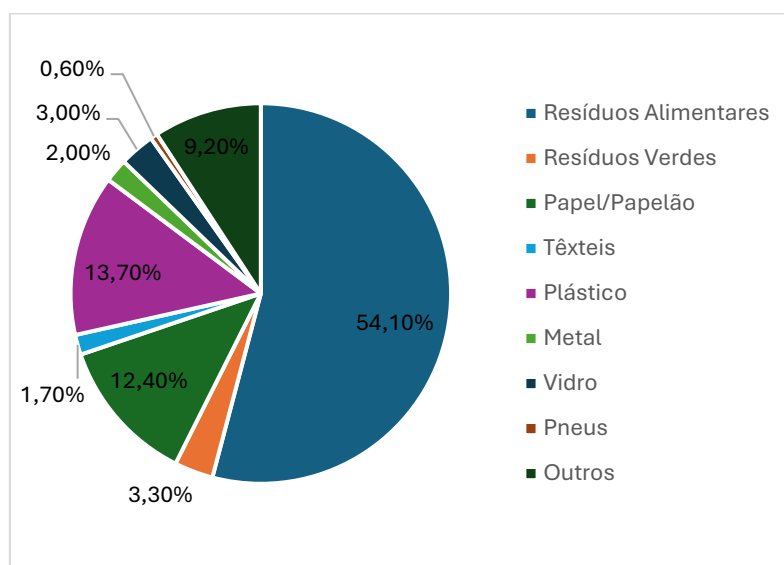


Figura 8. Composição gravimétrica dos RSU de Medianeira (2024).

Fonte: Adaptado de IPCC (2019), dados aplicados ao modelo SWEET v5.0.

A fração de resíduos alimentares representa 54,1% do total, seguida de plásticos (13,7%), papel/papelão (12,4%) e outras frações em menores proporções, como vidro (3,0%), metais (2,0%) e têxteis (1,7%). A partir dessa distribuição, a figura 9 apresenta a análise de Pareto correspondente, permitindo identificar as frações com maior representatividade no total gerado.

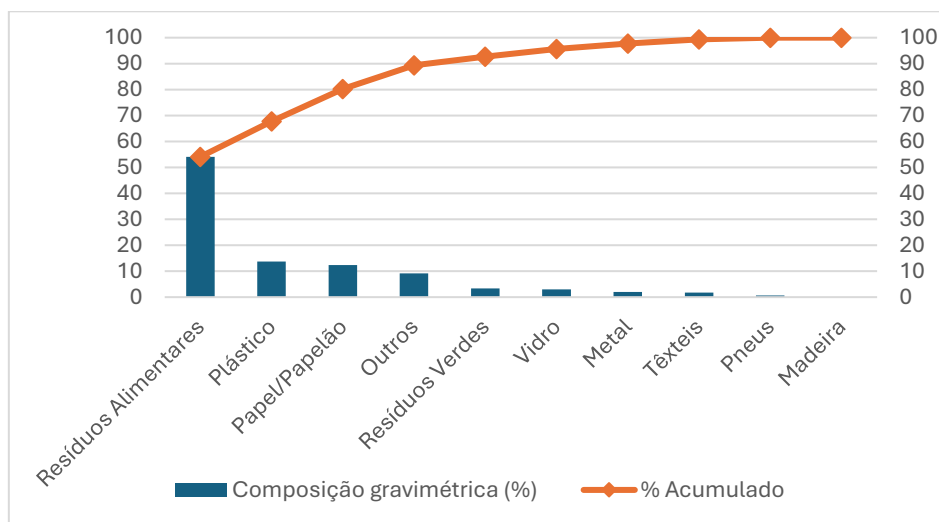


Figura 9. Análise de Pareto da composição gravimétrica dos RSU de Medianeira (2024).

Fonte: Adaptado de IPCC (2019), dados aplicados ao modelo SWEET v5.0.

As três primeiras frações – resíduos alimentares, plásticos e papel/papelão - concentram 80,20% da composição total.

O desempenho operacional da triagem da ASSAMA no período é apresentado na figura 10. O volume efetivamente reciclado cresceu de 515,8 toneladas em 2022 para 665 toneladas em 2023 e 1.500 toneladas em 2024. O volume de rejeitos da reciclagem passou de 284,2 toneladas em 2022 para 402 toneladas em 2023 e 610 toneladas em 2024. O indicador de eficiência (rejeitos/reciclados) registou valores de 0,55, 0,60 e 0,41 t/t respectivamente.

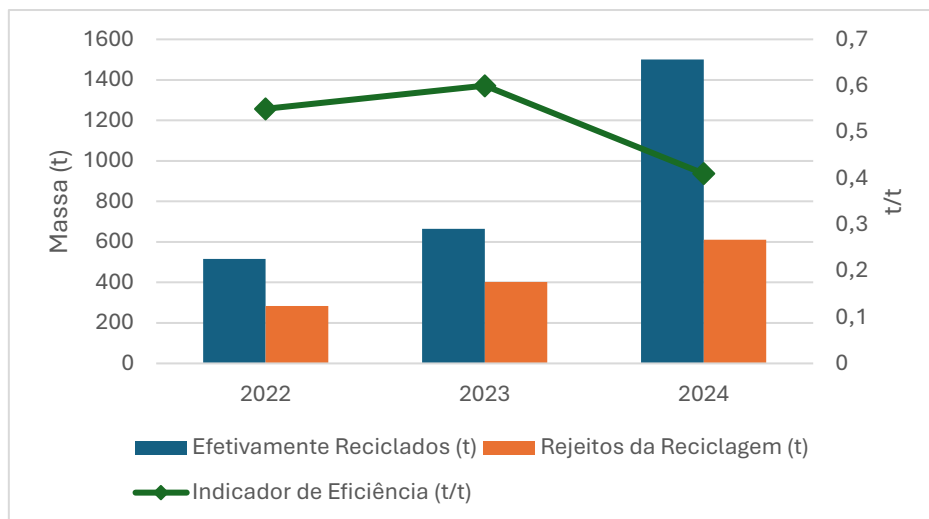


Figura 10. Eficiência operacional da triagem ASSAMA.

4.2.2 Distribuição dos fluxos de resíduos

A distribuição do fluxo de materiais do sistema de gestão de RSU de Medianeira em 2024, analisada com base na abordagem de *Material Flow Analysis* (MFA), é apresentada na figura 11.

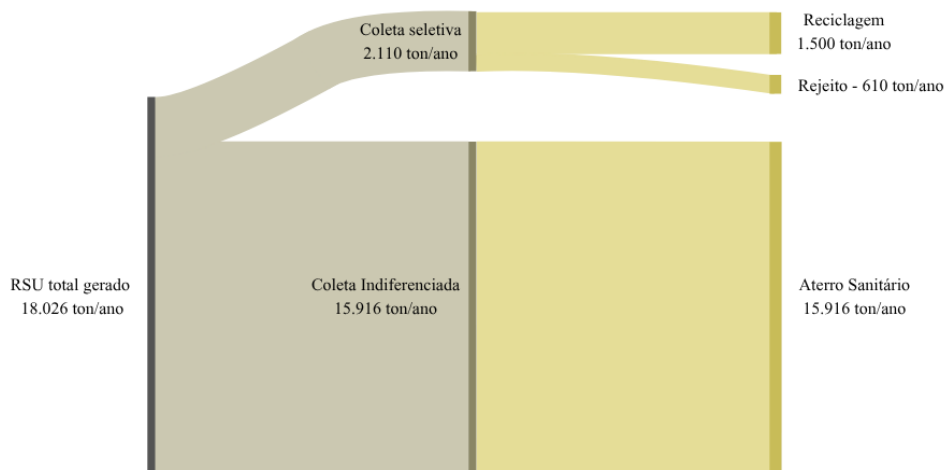


Figura 11. Fluxo de materiais do sistema de gestão de RSU em Medianeira

Fonte: Elaborado com base em dados do SINISA (2024).

Do total de 18.026 toneladas geradas, 15.916 toneladas (88,29%) foram destinadas ao aterro sanitário via coleta indiferenciada, enquanto 2.110 toneladas (11,71%) foram encaminhadas à triagem da ASSAMA via coleta seletiva. Do volume triado, 1.500 toneladas foram efetivamente recicladas e 610 toneladas retornaram ao

aterro sanitário como rejeito. Os indicadores operacionais do sistema são consolidados na tabela 24.

Tabela 24. Indicadores operacionais do sistema de gestão de RSU de Medianeira.

Indicadores	Valor	Métricas necessárias	Valor (2024)
Geração per capita	0,8646 kg/hab.dia	RSU total gerado	18.026 t
		População total	57.120 hab
Cobertura de coleta total de resíduos domiciliares	100%	-	-
Taxa de coleta seletiva	11,71%	RSU coletados seletivamente	2.110 t
		RSU total gerado	18.026 t
Taxa de reciclagem efetiva	8,32%	RSU reciclados	1.500 t
		RSU total gerado	18.026 t
Taxa de desvio do aterro	8,32%	RSU reciclados	1.500 t
		RSU total gerado	18.026 t
Ecoeficiência	425,69R\$/t.ano	Custos operacionais	7.673.510,34 R\$
		RSU total gerado	18.026 t

Fonte: Elaborado com base em dados SINISA (2024).

A taxa de reciclagem efetiva e a taxa do desvio do aterro correspondem a 8,32%, reflexo direto das 610 toneladas de rejeitos que retornaram ao aterro após a triagem. O indicador de ecoeficiência de R\$425,69/t evidencia o custo associado à elevada dependência da disposição final.

4.2.3 Discussão integrada do fluxo de materiais e desempenho operacional

O indicador de geração per capita estimado para Medianeira em 2024 (0,8646 kg/hab.dia) situa-se dentro da faixa de referência para municípios de porte semelhante, tipicamente entre 0,8 e 1,0 kg/hab.dia (ABRELPE, 2024; Kaza et al., 2018), indicando padrão de geração moderado e compatível com o perfil socioeconômico e urbano do município. Ressalta-se que este resultado não deve ser interpretado de modo isolado, pois o impacto ambiental decorrente da geração de resíduos depende fundamentalmente das estratégias de gestão implementadas e do aproveitamento dos materiais em todo o sistema.

Nesse sentido, a composição gravimétrica revela um aspecto crítico do sistema, a predominância de fração orgânica (54,1%), consistente com os parâmetros de referência

estabelecidos pelo IPCC, que estimam entre 50% e 60% para essa fração, e com as estimativas do PERS/PR, que projeta 49% de matéria orgânica para municípios entre 50.001 e 200.000 habitantes (Paraná, 2021). Essa predominância orgânica, associada à completa ausência de rotas de valorização para esse fluxo no município, representa o principal *gap* do sistema atual. A PNRS estabelece a compostagem como instrumento prioritário de gestão de resíduos orgânicos e preconiza a disposição final em aterro sanitário como última alternativa na hierarquia de gestão. A inexistência de iniciativas de compostagem ou digestão anaeróbia em Medianeira coloca o sistema em desacordo com essa hierarquia, resultando na destinação de aproximadamente 9.760 toneladas de resíduos orgânicos ao aterro sanitário anualmente, com consequente aumento das emissões de gases de efeito estufa associadas à decomposição anaeróbia.

No que se refere ao desempenho da reciclagem, a taxa efetiva de 8,32% evidencia que, apesar da cobertura de 100% da coleta seletiva no território municipal, a recuperação de materiais ainda é limitada. A análise do indicador de eficiência da triagem (0,41t/t em 2024) demonstra melhora operacional da ASSAMA no período analisado, com redução proporcional dos rejeitos por tonelada reciclada. Contudo, o volume absoluto de rejeitos encaminhados ao aterro quase dobrou entre 2022 e 2024 (284,2 para 610 toneladas), reflexo direto da expansão de volume triado sem avanços equivalentes na qualidade da separação na fonte pela população. Esse resultado indica que a eficiência do global do sistema permanece condicionada ao comportamento do gerador, sendo a educação ambiental e a sensibilização da população fatores determinantes para a redução dos rejeitos e o aumento da qualidade dos materiais encaminhados a triagem.

Comparativamente ao contexto nacional, a taxa de reciclagem efetiva de Medianeira (8,32%) supera a média brasileira de reciclagem formal, estimada em 4% considerando apenas a coleta seletiva municipal, e equipara-se ao índice de 8,3% quando incluídas as contribuições de catadores autônomos e da indústria recicladora (ABREMA, 2024). Esse resultado evidencia que o desempenho do município é comparável ao melhor cenário nacional, ainda que ambos os valores permaneçam expressivamente inferiores aos padrões internacionais. Na Europa Ocidental, mais de 55% dos resíduos são reciclados, enquanto na América do Sul esse índice não ultrapassa 6% (ABREMA, 2024). No contexto global, observa-se ainda maior diversificação das rotas de tratamento, com tecnologias como compostagem, digestão anaeróbia e recuperação energética complementando a reciclagem e reduzindo significativamente a dependência da disposição em aterros (Kaza et al., 2018). Essa diferença evidencia o descompasso entre

o sistema municipal e modelos mais avançados de gestão, caracterizados pela diversificação das rotas de tratamento e maior grau de circularidade.

De forma geral, a análise integrada dos fluxos de materiais evidencia que o sistema de gestão de RSU de Medianeira apresenta características predominantemente lineares, com baixa circularidade, ausências de rotas de valorização para a fração orgânica majoritária e elevada dependência da disposição final em aterro sanitário. Essas limitações estruturais identificadas, fundamentam a simulação de cenários alternativos de gestão desenvolvida nas secções seguintes, com vistas a avaliar o potencial de melhoria do desempenho ambiental e operacional do sistema municipal.

4.3 Potencial de geração de biogás e recuperação energética

4.3.1 Projeção populacional e estimativa da geração de RSU

A projeção populacional de Medianeira apontou um aumento constante ao longo do período analisado (2006-2033). A projeção para 2024 atingiu 56.630 habitantes, e ao fim do período de projeção, em 2033, o total seria de 67.517 habitantes.

A geração per capita evoluiu de 0,7215 kg/hab.dia em 2006 para 0,8646 kg/hab.dia em 2024, atingindo 0,9456 kg/hab.dia em 2033. A geração anual total de RSU foi estimada em 10.586 toneladas em 2006, 17.871 toneladas em 2024 e 23.303 toneladas em 2033. Os dados completos encontram-se na tabela 25.

Tabela 25. Projeção populacional, GPC e geração total de RSU.

Ano	População M.A.* (hab.)	População M.G.** (hab.)	População Média	GPC ($\frac{\text{kg}}{\text{hab.dia}}$)	RSU gerado (t)
2006	40221	40173	40197	0,7215	10586
2007	40620	40578	40599	0,7288	10800
2008	41019	40987	41003	0,7362	11018
2009	41418	41400	41409	0,7436	11239
2010	41817	41817	41817	0,7511	11464
2011	42863	42742	42802	0,7587	11853
2012	43909	43687	43798	0,7664	12251
2013	44955	44653	44804	0,7741	12659
2014	46001	45641	45821	0,7819	13077
2015	47047	46650	46849	0,7898	13506
2016	48093	47682	47887	0,7978	13945
2017	49139	48736	48938	0,8059	14395
2018	50185	49814	50000	0,8140	14855
2019	51231	50916	51073	0,8222	15328

Nota: * MG: Método geométrico; **MA: Método aritmético

Tabela 25 (cont.). Projeção populacional, GPC e geração total de RSU.

Ano	População M.A.* (hab.)	População M.G.** (hab.)	População Média	GPC ($\frac{\text{kg}}{\text{hab.dia}}$)	RSU gerado (t)
2020	52277	52042	52159	0,8305	15812
2021	53323	53193	53258	0,8389	16308
2022	54369	54369	54369	0,8474	16816
2023	55415	55571	55493	0,8560	17337
2024	56461	56800	56631	0,8646	17871
2025	57507	58057	57782	0,8732	18417
2026	58553	59340	58947	0,8820	18976
2027	59599	60653	60126	0,8908	19549
2028	60645	61994	61320	0,8997	20137
2029	61691	63365	62528	0,9087	20739
2030	62737	64766	63752	0,9178	21356
2031	63783	66199	64991	0,9270	21989
2032	64829	67663	66246	0,9362	22638
2033	65875	69159	67517	0,9456	23303

Nota: * MG: Método geométrico; **MA: Método aritmético

Com base nos dados estimados de RSU gerado, o modelo LandGEM foi alimentado com a série anual de RSU apresentada na tabela 25, considerando o período de operação compreendido entre os anos de 2006 e 2033.

4.3.2 Estimativa da geração de biogás no aterro

O modelo LandGEM foi utilizado para simular a evolução da geração do metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), compostos orgânicos não metânicos (NMOC) e do gás total do aterro sanitário de Medianeira, tanto durante o funcionamento do aterro (2006-2033) quanto após o seu fechamento, com uma análise que se estende até 2100.

Em 2007, primeiro ano com geração estimada pelo modelo, a produção de metano foi de 43994,3 m^3/ano , enquanto o volume total de gases no aterro foi de 87988,6 m^3/ano . A geração cresceu de forma contínua ao longo do período de operação do aterro, atingindo 1.082.831,5 m^3/ano de metano em 2033, último ano de disposição de resíduos. Após o encerramento, verificou-se ainda aumento residual na geração, com pico em 2034, quando o metano atingirá 1.126.866,1 m^3/ano e o gás total alcançará 2.253.732,1 m^3/ano .

A partir de 2035, a curva apresenta declínio progressivo. Em 2040, a produção estimada de metano foi de 834.802,9 m^3/ano , reduzindo-se para 506.333,5 m^3/ano em 2050 e 307.106,8 m^3/ano em 2060. Em 2100, a geração residual de metano alcançará 41.562,4 m^3/ano , evidenciando a persistência de geração residual por décadas após o encerramento do aterro.

O CO₂ apresentou comportamento simétrico ao metano em m³/ano, resultado direto do teor de metano de 50% adotado no modelo, com pico de 1.126.866,1 m³/ano em 2034. Enquanto os NMOC atingirão valor máximo de 9.014,9 m³/ano no mesmo ano. A evolução temporal dos gases está apresentada na Figura 12.

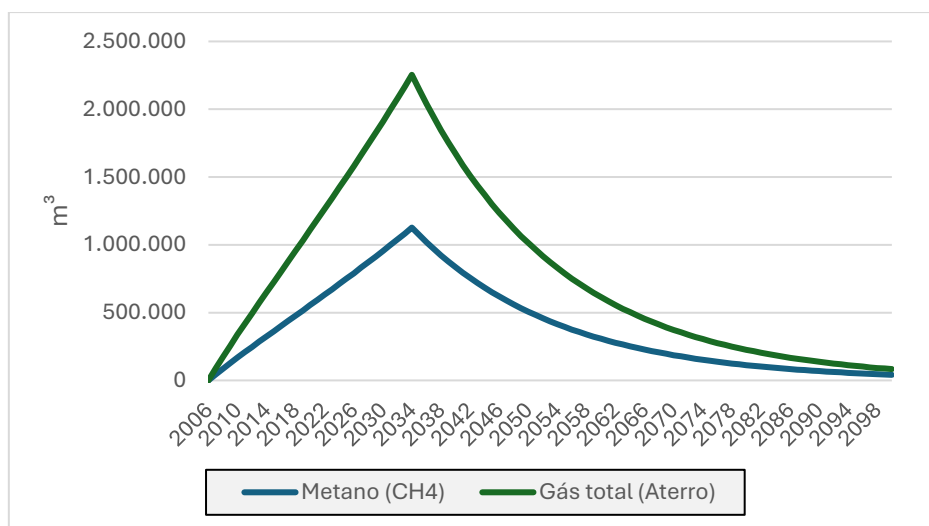


Figura 12. Evolução temporal da geração de metano (CH₄) e gás total, em volume, no aterro sanitário de Medianeira.

4.3.3 Potencial de recuperação energética do biogás

Com base nos volumes anuais de metano estimados pelo modelo LandGEM, foi calculado o potencial de recuperação energética do biogás gerado no aterro sanitário. Os resultados indicam que o potencial energético acompanha diretamente a evolução da geração de metano ao longo do tempo.

Em 2007, primeiro ano de geração estimada, a vazão horária de metano foi de 5,022 m³/h, correspondendo a uma potência disponível de 0,009 MW e geração anual de 68,54 MWh/ano. A partir desse ponto, o potencial energético cresceu de forma contínua acompanhando o aumento da massa acumulada de resíduos no aterro.

No ano de 2024, correspondente ao período recente de referência do estudo, a vazão horária estimada de metano foi de 81,17 m³/h, resultando em potência disponível de 0,145 MW e energia anual de 1.107,78 MWh/ano, o que corresponderia ao atendimento de aproximadamente 464 habitantes.

O potencial energético atingiu seu valor máximo em 2034, ano subsequente ao encerramento do aterro, quando a vazão horária alcançou 128,64 m³/h, com potência disponível de 0,230 MW e geração anual de 1.755,55 MWh/ano, suficiente para atender

aproximadamente 735 habitantes. A partir de 2035, observa-se redução progressiva do potencial energético, acompanhando o declínio da geração de metano. Em 2040, a energia estimada foi de 1.300,55 MWh/ano, reduzindo-se para 788,82 MWh/ano em 2050 e 478,44 MWh/ano em 2060. Em 2100, a geração residual alcança 64,75 MWh/ano. A evolução da potência e energia disponíveis está apresentada na Figura 13.

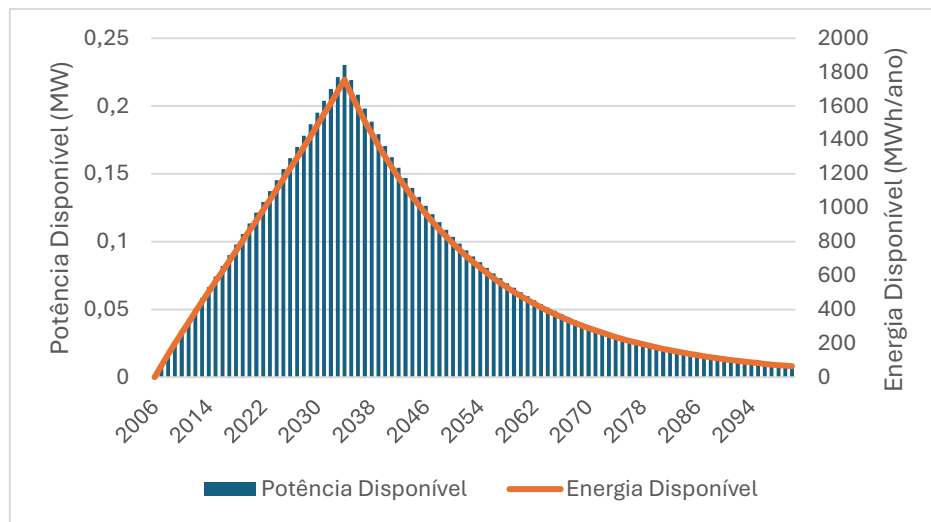


Figura 13. Evolução da potência e da energia disponível a partir do biogás do aterro sanitário de Medianeira (2006-2100).

4.3.4 Geração de metano e potencial energético: LandGEM e SWEET

Foi realizado uma análise comparativa entre as estimativas de geração de metano e potencial energético obtidas pelos modelos LandGEM e SWEET para o aterro sanitário de Medianeira, com o objetivo de avaliar a sensibilidade das estimativas. Ambos os modelos apresentaram comportamento temporal semelhante, com crescimento da geração durante a fase operacional do aterro, pico próximo ao encerramento das atividades e posterior declínio.

A figura 14 apresenta a comparação entre as estimativas de geração de metano obtidas pelos dois modelos entre os anos 2006-2100.

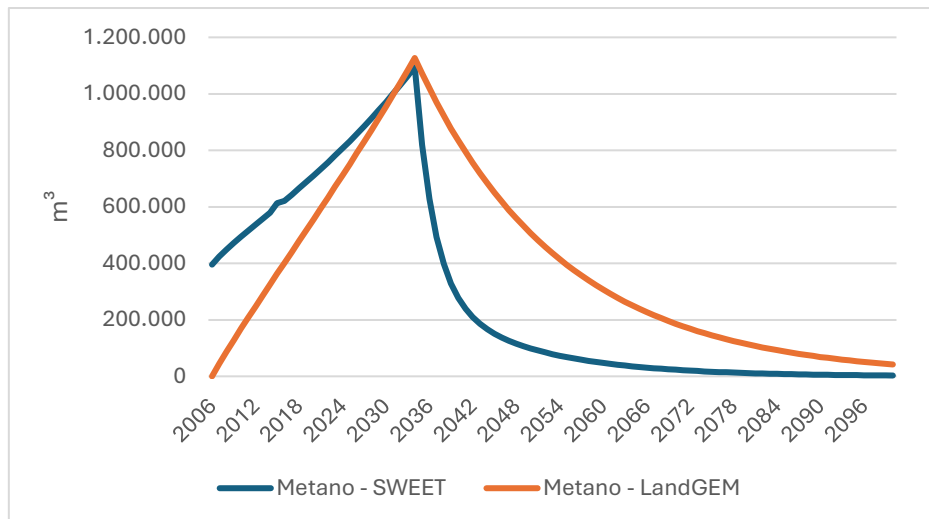


Figura 14. Comparação da geração de metano no aterro estimada pelos modelos LandGEM e SWEET.

Durante o período de operação do aterro (2006-2033), os valores estimados pelos dois modelos apresentaram magnitudes próximas. Em 2024, o LandGEM estimou 711.067 m³/ano de metano, enquanto o SWEET estimou 806.534 m³/ano. No pico de geração, em 2034, o LandGEM estimou 1.126.866 m³/ano e o SWEET 1.095.871 m³/ano.

Após o encerramento do aterro, os modelos divergem significativamente no comportamento de decaimento. O LandGEM apresenta declínio gradual, enquanto o SWEET indica queda acentuada. Em 2040, o LandGEM estimou 834.803 m³/ano de metano contra 277.477 m³/ano do SWEET. Em 2050, essa diferença amplia-se para 506.334 m³/ano no LandGEM contra apenas 98.813 m³/ano no SWEET.

A figura 15 apresenta a comparação do indicador energético entre os dois modelos.

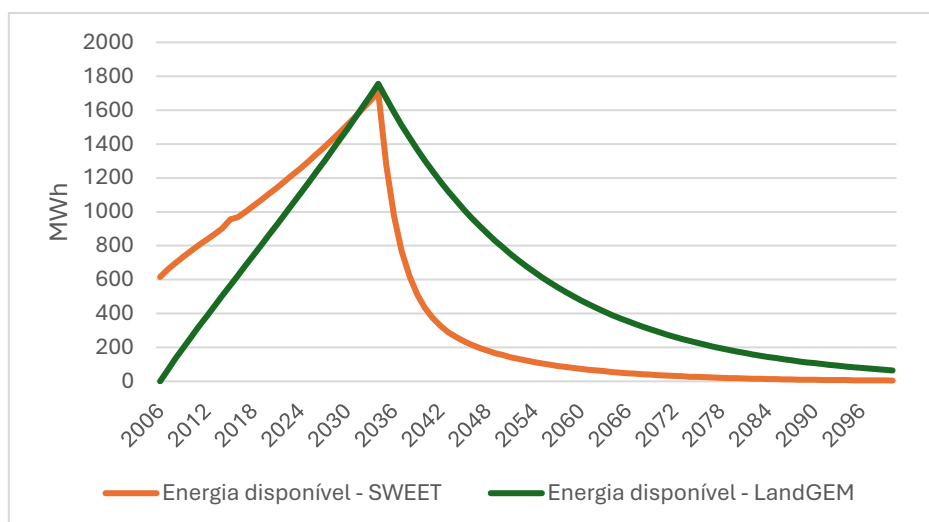


Figura 15. Comparação da energia disponível no aterro estimada pelos modelos LandGEM e SWEET.

A tabela 26 apresenta uma comparação entre os principais indicadores em anos-chave do estudo.

Tabela 26. Comparação entre LandGEM e SWEET para anos representativos.

Ano	Energia (MWh/ano)		Potência (MW)		Habitantes atendidos	
	LANDGEM	SWEET	LANDGEM	SWEET	LANDGEM	SWEET
2024	1107,78	1256,50	0,1454	0,1649	464	526
2034	1755,55	1707,26	0,2304	0,2240	735	714
2040	1300,55	432,28	0,1706	0,0567	544	181
2050	788,82	153,94	0,1035	0,0202	330	64
2100	64,75	4,42	0,0085	0,0006	27	2

Em 2100, o modelo LandGEM ainda estima uma geração energética de 64,75 MWh/ano, equivalente ao atendimento de aproximadamente 27 habitantes, enquanto o modelo SWEET apresenta valor residual de 4,42 MWh/ano, correspondente a 2 habitantes. Essa diferença ilustra de forma expressiva a distinção no comportamento de decaimento entre os dois modelos ao longo do horizonte de análise.

4.3.5 Discussão integrada do potencial de geração do biogás e recuperação energética

- Crescimento populacional e geração per capita

O crescimento populacional projetado para Medianeira, de 37.827 habitantes em 2000 para 67.517 habitantes em 2033, reflete uma dinâmica demográfica expressiva e consistente com os dados censitários oficiais. Entre 2010 e 2022, o município passou de

41.817 para 54.369 habitantes, crescimento de aproximadamente 30% no período, superior à média nacional de 6,45% (Prefeitura de Medianeira, 2022). Esse desempenho demográfico acelerado é coerente com a dinâmica regional do Oeste do Paraná, área polarizada por Cascavel, que segundo as projeções do IPARDES figura entre as regiões com tendência de crescimento contínuo até 2050, ao contrário de diversas outras regiões do estado (Paraná, 2024). O crescimento observado tende a resultar em um aumento da geração total de RSU ao longo do horizonte de análise, intensificando a pressão sobre o sistema de disposição final.

A geração per capita adotada, com valor de referência de 0,8646 kg/hab.dia em 2024 e variação de $\pm 1\%$ ao ano, está alinhada com a metodologia adotada por Piñas et al (2016) para o município de Três Corações, Minas Gerais, onde foi utilizada uma GPC de 0,75 kg/hab.dia com acréscimo de 1% ano. A adoção de uma GPC variável ao invés de um valor fixo, permite capturar a tendência histórica de crescimento do consumo e da geração de resíduos per capita ao longo do tempo, tornando as projeções mais realistas em horizontes temporais alargados.

- Estimativa de geração de biogás

Fei et al (2016), a partir de dados de 57 aterros reais, demonstraram que k aumenta com a temperatura dos resíduos e, principalmente, com a disponibilidade de humidade. Medianeira apresenta precipitação média anual de 2.000 mm e ausência de estação seca definida (PMSB, 2018), mantendo os resíduos húmidos ao longo de todo o ano. As temperaturas médias são inferiores às regiões tropicais, mas a pluviosidade elevada e constante favorece esse fator, sustentando a adoção de $k = 0,05 \text{ ano}^{-1}$. Souza et al (2015), em estudo realizado em aterro sanitário da região Noroeste do Paraná, com clima subtropical temperado e precipitação média de 1.590 mm, confirmam que este valor é adequado para aterros da região Sul do Brasil, observando ainda que a decomposição dos RSU em climas úmidos pode ser até cinco vezes mais rápida do que a prevista pelos parâmetros do modelo original (Maciel & Jucá, 2011; Souza et al., 2015).

Para o parâmetro L_0 , Fei et al. (2016) registraram ampla variação nos valores observados, entre 10 e 300 L CH_4/kg , em função da composição dos resíduos e das condições específicas dos aterros, sendo os menores valores associados a resíduos com menor teor de celulose e hemicelulose. Nesse contexto, a faixa padrão do LandGEM (100–170 $\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{Mg}$) reflete condições de referência originalmente associadas a aterros norte-americanos, nos quais papel e papelão representam parcela significativa da massa

disposta. No entanto, os RSU brasileiros apresentam perfil distinto, com predominância de matéria orgânica húmida e menor participação relativa de materiais lignocelulósicos secos, como papel e papelão, o que reduz o rendimento real de metano por tonelada húmida disposta (Feitosa e Jucá, 2014). Assim, o valor $L_0 = 85 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{Mg}$ adotado neste estudo reflete essa característica composicional.

O pico de geração de metano estimado para 2034, ano subsequente ao encerramento do aterro, representa um comportamento esperado em modelos de Decaimento de Primeira Ordem (FOD). Piñas et al. (2016), ao modelarem o aterro sanitário de Três Corações /MG com vida útil de 20 anos, verificaram que o ponto máximo de geração do metano ocorre no período de encerramento ou imediatamente após o fim das operações de disposição de resíduos. Esse comportamento decorre do fato de que, neste momento, a massa acumulada de resíduos biodegradáveis em decomposição atinge seu maior volume, ao mesmo tempo em que cessa o aporte de novos resíduos. A partir do encerramento, a geração de metano passa a diminuir progressivamente, acompanhando a redução gradual do substrato orgânico disponível para degradação anaeróbia.

A persistência da geração residual do metano até 2100, em valores decrescentes, reflete a cinética lenta de decomposição das frações orgânicas de menor degradabilidade presentes nos resíduos. Souza (2015), verificou que, para um aterro sanitário no Paraná, com apenas três anos de operação, a geração de biogás se estende até meados de 2151, evidenciando que a produção residual do metano por várias décadas após o encerramento é compatível com a dinâmica da degradação anaeróbia em aterros sanitários. Essa persistência tem implicações ambientais significativas, uma vez que o metano de origem biogénica possui GWP de 27 kg $\text{CO}_{2\text{eq}}$ por kg de CH_4 em horizonte de 100 anos (IPCC, 2021). Dessa forma, cada tonelada de metano não capturada pelo aterro de Medianeira representa impacto climático equivalente a cerca de 27 toneladas de $\text{CO}_{2\text{eq}}$, o que coloca a captura de biogás entre as medidas de mitigação mais diretas disponíveis no setor de resíduos.

- Potencial de recuperação energética

Conforme apresentado na tabela 26, os dois modelos produziram estimativas de potência de pico muito próximas em 2034. Felca et al. (2021), em modelagem com o LandGEM para município de 90.000 habitantes com um crescimento populacional de 1% ao ano e uma GPC de 0,75 kg/hab.dia ($k = 0,05 \text{ ano}^{-1}$; $L_0 = 170 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{Mg}$), obtiveram

potência de pico de 0,243 MW, próxima a estimada para Medianeira, mesmo que com massa de resíduos cerca de duas vezes maior. Essa aproximação reflete, em parte, o $L_0 = 85 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{Mg}$ adotado neste estudo, valor menor que o default norte-americano. Piñas et al. (2016) obtiveram, para Três Corações/MG – município de porte similar, potência média de 242 kW ao longo de 20 anos pelo LandGEM.

Coelho et al. (2021), ao avaliarem o Consórcio de Andradas/MG com cerca de 80.000 habitantes, demonstraram viabilidade econômica com 300 kW: VPL de R\$ 3,3 milhões, TIR de 13% a.a. e retorno a partir do nono ano. A potência estimada para Medianeira é inferior a esse valor, de modo que a viabilidade econômica dependerá da eficiência de captação, dos custos de implantação e operação, da tarifa de energia e das condições de comercialização.

Com consumo médio de 2,39 MWh/hab.ano (EPE, 2024), a energia estimada no pico atenderia cerca de 734 habitantes, 1,1% da população projetada em 2034. Esse número não resolve o abastecimento municipal, mas a captura do metano já seria necessária por razões ambientais de qualquer forma, e a geração distribuída aproveitaria o que de outro modo seria apenas uma externalidade negativa do aterro.

- Divergência entre LandGEM e SWEET no período pós encerramento

Durante o período de operação do aterro, entre 2006 e 2033, as estimativas dos modelos LandGEM e SWEET apresentaram magnitudes próximas, com diferenças inferiores a 15% nos valores anuais de metano. Essa convergência é coerente com os resultados de Piñas et al. (2016), que verificaram variação de apenas 5% entre o LandGEM e modelo Biogás/CETESB durante o período operacional, indicando que diferentes modelos de primeira ordem tendem a convergir nessa fase.

Após o encerramento do aterro, entretanto, os modelos passam a divergir de forma expressiva. Em 2040, o LandGEM estimou $834.803 \text{ m}^3/\text{ano}$ de metano, enquanto o SWEET estimou $277.477 \text{ m}^3/\text{ano}$. O LandGEM foi cerca de três vezes superior, uma diferença de 67% em relação ao valor do LandGEM.

O LandGEM aplica um único parâmetro cinético $k = 0,05 \text{ ano}^{-1}$ a toda a massa de resíduos, tratando-a como homogênea. Essa abordagem monofásica implica um decaimento gradual e uniforme, que tende a prolongar a geração estimada por várias décadas após o encerramento. Em contrapartida, o SWEET segue a metodologia do IPCC e trabalha com frações de degradação distintas por categoria (alimentares, verdes, papel,

madeira, têxteis). As frações rápidas são consumidas nos primeiros anos, o substrato que resta no pós-encerramento é menor, e a queda é mais pronunciada.

Segundo a U.S. EPA (2023), um único valor de k pode ser inadequado em aterros com alta participação de resíduos alimentares, já que a degradabilidade média muda ao longo do tempo. De modo semelhante, Yapo et al. (2019), ao compararem LandGEM, IPCC e SWEET para o aterro de Akouédo, na Costa do Marfim, observaram que o LandGEM tende a estimar as emissões superior às obtidas pelos modelos IPCC e SWEET, padrão também observado no estudo. Assim, a divergência observada no período pós-encerramento não constitui um erro metodológico, mas consequência esperada das diferenças entre um modelo monofásico, como o LandGEM, e um modelo multifração baseado na composição gravimétrica, como o SWEET. Dessa forma, neste estudo, o LandGEM pode ser interpretado como uma estimativa superior e o SWEET como uma estimativa inferior da geração de metano após o encerramento, fornecendo uma faixa de referência útil para a avaliação do potencial de aproveitamento energético do biogás.

4.4 Quantificação da pegada de carbono do sistema de gestão de RSU

A quantificação da pegada de carbono do sistema de gestão de RSU de Medianeira foi realizada com base nos resultados obtidos pelo *software* SWEET v5.0. A análise permitiu estimar as emissões totais de gases de efeito estufa expressas em dióxido de carbono equivalente (tCO_2eq), bem como identificar as contribuições relativas dos principais setores e poluentes associados ao manejo dos resíduos no município, com destaque para a disposição final em aterro sanitário, a coleta e transporte e o uso de equipamentos de operação.

4.4.1 Emissões totais do sistema

A tabela 27 apresenta as emissões totais anuais do sistema de gestão de RSU de Medianeira, expressas em tCO_2eq , para o período de 2006-2050.

Tabela 27. Emissões totais anuais do sistema de gestão de RSU de Medianeira.

Ano	Total de emissões (tCO₂eq.)	Ano	Total de emissões (tCO₂eq.)
2006	9.480	2029	22.108
2007	10.106	2030	22.792
2008	10.675	2031	23.495
2009	11.205	2032	24.218
2010	11.712	2033	24.961
2011	12.205	2034	25.725
2012	12.691	2035	19.903
2013	13.174	2036	15.884
2014	13.659	2037	13.087
2015	14.425	2038	11.122
2016	14.643	2039	9.724
2017	15.145	2040	8.717
2018	15.656	2041	7.980
2019	16.176	2042	7.433
2020	16.708	2043	7.021
2021	17.250	2044	6.707
2022	17.805	2045	6.464
2023	18.373	2046	6.274
2024	18.954	2047	6.127
2025	19.550	2048	6.013
2026	20.164	2049	5.926
2027	20.794	2050	5.862
2028	21.442	-	-

As emissões totais apresentam crescimento contínuo ao longo de toda a fase operacional do aterro, partindo de 9.480 tCO₂eq em 2006 e atingindo 18.954 em 2024. Esse crescimento prossegue até 2034, quando é registrado o valor máximo de 25.725 tCO₂eq, ano subsequente ao encerramento da disposição de novos resíduos, previsto para 2033. A partir de 2035, verifica-se redução acentuada das emissões, com queda para 19.903 tCO₂eq, seguida de declínio contínuo nos anos seguintes. Em 2040, as emissões totalizam 8.717 tCO₂eq, reduzindo-se para 5.862 tCO₂eq em 2050, com valor mínimo atingido em 2053, de 5.780 tCO₂eq, representando redução de 77,5% em relação ao pico de 2034.

A partir de 2054, verifica-se retomada gradual e contínua das emissões totais, atingindo 6.050 tCO₂eq em 2060, 10.124 tCO₂eq em 2083 e 16.438 tCO₂eq, em 2100, chegando a 25.500 tCO₂eq em 2115, valor próximo ao pico registrado em 2034, evidenciando o crescimento expressivo de longo prazo dos setores operacionais na ausência de medidas de mitigação. A figura 16 apresenta a evolução temporal das

emissões totais para o horizonte completo de análise (2006-2120), evidenciando três fases distintas: crescimento durante a operação do aterro (2006-2033), declínio após o encerramento da disposição final (2035-2053) e crescimento gradual de longo prazo a partir de 2054, quando as emissões voltam a aumentar progressivamente, atingindo 29.538 tCO₂eq em 2120.

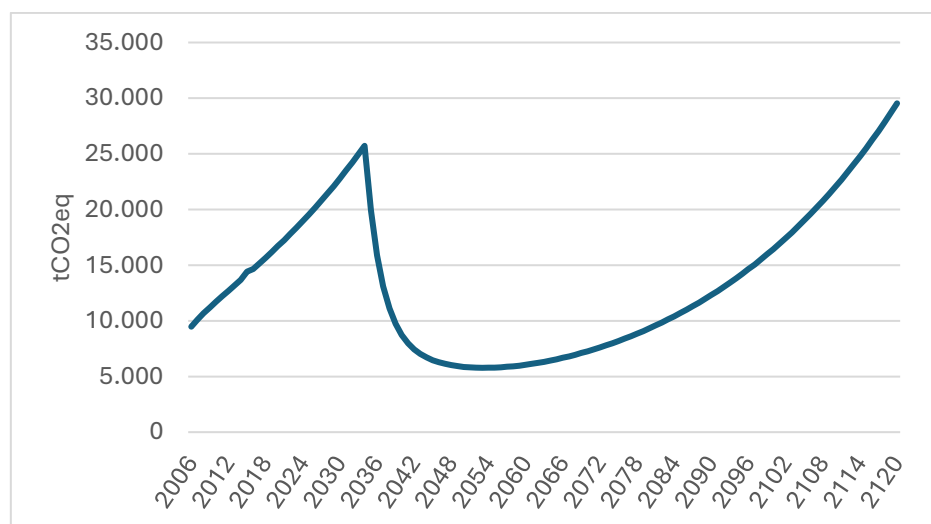


Figura 16. Evolução temporal das emissões totais do sistema de gestão de RSU (2006-2120).

4.4.2 Emissões por setor

A tabela 28 apresenta as emissões anuais desagregadas por setor para o período de 2006 a 2050.

Tabela 28. Emissões anuais por setor no cenário base em tCO₂eq.

Ano	C.T.	A.S.	M.E.	Ano	C.T.	A.S.	M.E.
2006	565	8.445	469	2029	1.106	20.086	916
2007	582	9.042	482	2030	1.139	20.709	944
2008	599	9.579	497	2031	1.173	21.350	972
2009	617	10.077	511	2032	1.208	22.009	1.001
2010	635	10.550	526	2033	1.244	22.686	1.031
2011	654	11.009	542	2034	1.281	23.382	1.062
2012	673	11.459	558	2035	1.319	17.490	1.094
2013	693	11.907	574	2036	1.359	13.399	1.126
2014	713	12.354	591	2037	1.400	10.528	1.160
2015	735	13.081	609	2038	1.441	8.485	1.195
2016	756	13.260	627	2039	1.485	7.009	1.230
2017	779	13.721	645	2040	1.529	5.920	1.267

Nota: (C.T.: Coleta e transporte; A.S.: Aterro Sanitário; M.E.: Manuseio de equipamentos).

Tabela 28 (cont.). Emissões anuais por setor no cenário base em tCO₂eq.

Ano	C.T.	A.S.	M.E.	Ano	C.T.	A.S.	M.E.
2018	801	14.190	664	2041	1.575	5.100	1.305
2019	825	14.667	684	2042	1.622	4.468	1.344
2020	849	15.154	704	2043	1.670	3.967	1.384
2021	875	15.651	725	2044	1.720	3.561	1.426
2022	900	16.158	746	2045	1.772	3.224	1.468
2023	927	16.677	768	2046	1.825	2.938	1.512
2024	954	17.209	791	2047	1.879	2.691	1.557
2025	983	17.753	815	2048	1.935	2.474	1.604
2026	1.012	18.313	839	2049	1.993	2.281	1.652
2027	1.042	18.888	864	2050	2.053	2.108	1.701
2028	1.074	19.479	890	-	-	-	-

Nota: (C.T.: Coleta e transporte; A.S.: Aterro Sanitário; M.E.: Manuseio de equipamentos).

O setor do aterro sanitário constitui a principal fonte de emissões ao longo da fase operacional. Em 2024, por exemplo, esse setor correspondeu por 17.209 tCO₂eq, correspondendo a 90,8% das emissões totais, enquanto a coleta e transporte de resíduos contribuiu com 954 tCO₂eq (5,0%) e o manuseio de equipamentos com 791 tCO₂eq (4,2%). No pico das emissões, em 2034, o aterro sanitário atingiu 23.382 tCO₂eq frente a 1.281 tCO₂eq da coleta e transporte e 1.062 tCO₂eq dos equipamentos.

Após o encerramento da disposição de resíduos no aterro sanitário municipal, previsto para 2033, as emissões associadas especificamente à massa de resíduos anteriormente depositada diminuem progressivamente, passando de 17.490 tCO₂eq em 2035 para 5.920 tCO₂eq em 2040 e 2.108 tCO₂eq em 2050. Essa redução decorre do decaimento gradual da matéria orgânica remanescente, uma vez que, após o encerramento, não são consideradas novas entradas de resíduos nessa unidade.

Em contrapartida, as emissões atribuídas aos setores de coleta e transporte e de manuseio de equipamentos permanecem ao longo do horizonte de análise, atingindo em 2050, respectivamente 2.053 tCO₂eq e 1.701 tCO₂eq. Esses valores não representam a continuidade das operações no aterro encerrado, mas a manutenção dos serviços municipais de coleta, transporte e movimentação dos resíduos gerados após 2033, os quais necessitariam de encaminhamento para outra unidade de tratamento e disposição final.

Como a unidade receptora posterior ao encerramento do aterro municipal não foi especificamente definida ou caracterizada no modelo, as emissões projetadas para esses setores devem ser interpretadas como uma extrapolação das atividades operacionais do

sistema municipal de gestão de resíduos, e não como emissões provenientes do aterro encerrado. No horizonte de 2120, os valores de 16.143 tCO₂eq para coleta e transporte e de 13.380 tCO₂eq para manuseio de equipamentos possuem, portanto, caráter indicativo e resultam da continuidade das premissas de crescimento adotadas pelo SWEET, não constituindo uma previsão direta das condições operacionais reais do município nesse período. A figura 17 apresenta a evolução temporal das emissões setoriais para o horizonte completo de análise.

Ressalta-se, como limitação da modelação, que não foi definido um cenário operacional específico para a destinação dos resíduos gerados após o encerramento do aterro sanitário municipal em 2033. Desse modo, embora o modelo mantenha as emissões relacionadas com a coleta, o transporte e o manuseio de resíduos, não é possível atribuí-las a uma unidade receptora determinada. Os resultados posteriores a 2033 devem, assim, ser compreendidos como projeções setoriais condicionadas às premissas de continuidade dos serviços municipais e de crescimento da geração de resíduos.

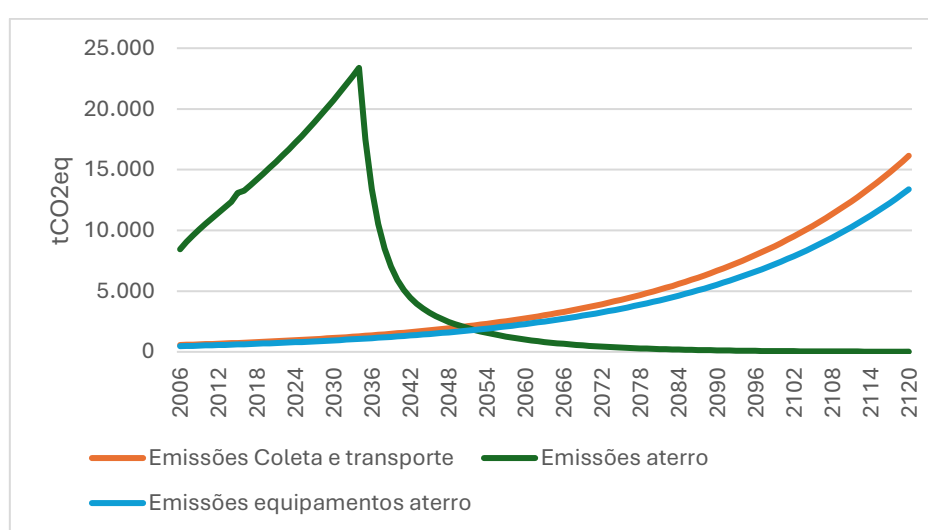


Figura 17. Evolução temporal das emissões setoriais no sistema de gestão de RSU de Medianeira no período 2006-2120.

4.4.3 Emissões por poluente

A análise das emissões por poluente permite caracterizar a natureza dos gases predominantes em cada setor do sistema. A figura 18 apresenta a distribuição por poluente no setor de disposição final.

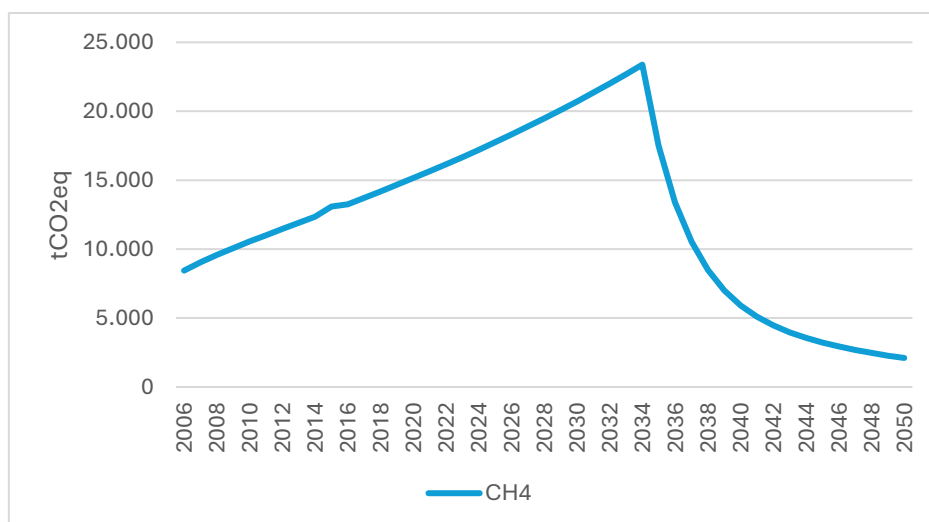


Figura 18. Emissões por poluente do aterro sanitário.

No setor do aterro sanitário, o metano (CH₄) constitui o poluente largamente dominante, com valores expressivamente superiores aos demais componentes ao longo de todo o período analisado. Essa predominância decorre do elevado potencial de aquecimento global do metano que, quando convertido em CO₂ equivalente, assume magnitudes muito superiores às emissões dos outros poluentes. Por outro lado, os demais poluentes monitorizados, como NO_x, BC (*Black Carbon*) e OC (*Organic Carbon*) não apresentam contribuições nesse setor.

A Figura 19 apresenta a distribuição por poluente no setor de coleta e transporte. Nesse setor, as emissões apresentam comportamento distinto, caracterizado por crescimento gradual ao longo do tempo, em função da continuidade das operações e do consumo de combustíveis fósseis.

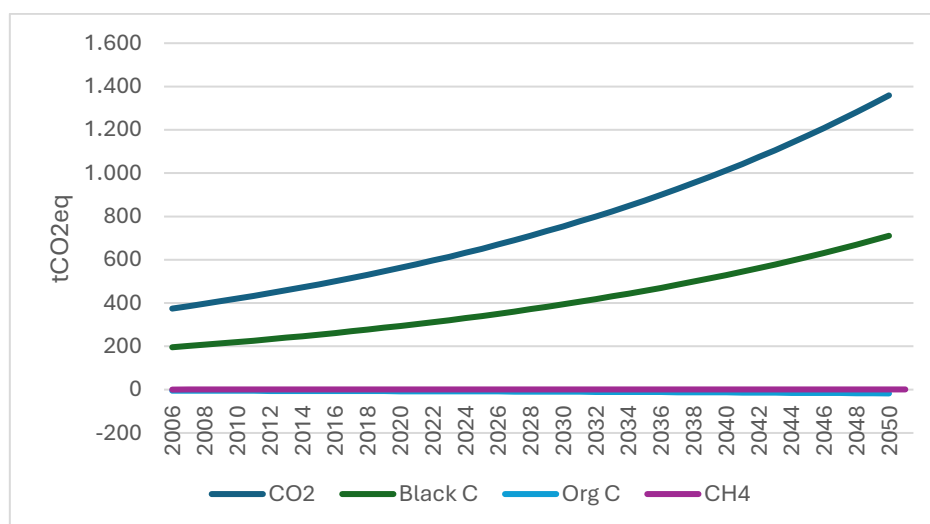


Figura 19. Emissões por poluente da coleta e transporte de resíduos.

Observa-se que o dióxido de carbono (CO₂) constitui o principal poluente emitido, reflexo do consumo de combustíveis fósseis pela frota de veículos. O BC apresenta contribuição secundária relevante, associada à combustão incompleta nos motores a diesel, sendo a maioria dos utilizados no município de Medianeira. Os demais poluentes, OC e CH₄, registram valores significativamente inferiores. De forma semelhante, a figura 20 apresenta a distribuição por poluente no setor de manuseio de equipamentos, composto por escavadeira e trator de esteira a diesel operando no aterro sanitário.

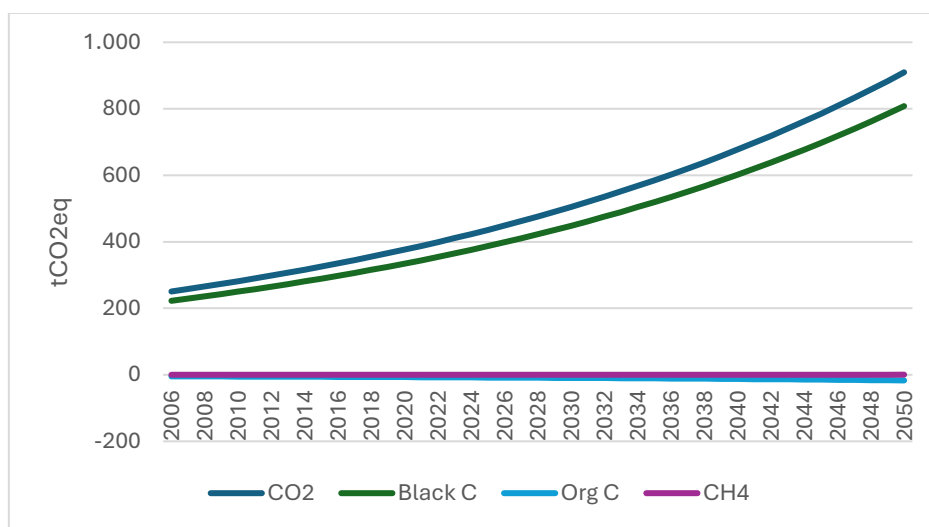


Figura 20. Emissões por poluente do manuseio de equipamentos.

No setor de manuseio de equipamentos, observa-se padrão semelhante ao da coleta e transporte, com predominância do CO₂ e contribuição secundária do BC, ambos associados à combustão de combustíveis fósseis nos motores dos equipamentos. Os demais poluentes apresentam valores pouco expressivos. A Figura 21 apresenta as emissões totais do sistema por poluente para o horizonte completo de análise.

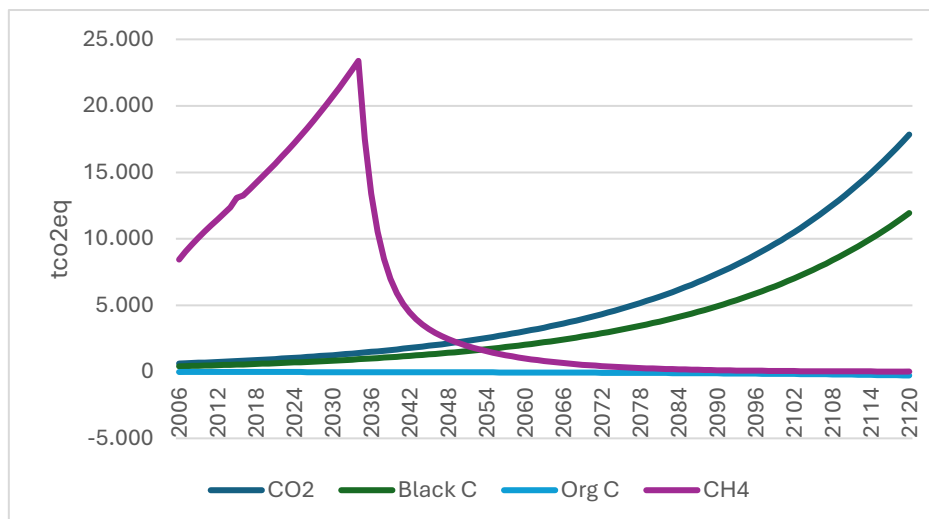


Figura 21. Emissões totais por poluente.

Na perspectiva agregada do sistema, o CH₄ domina as emissões totais durante a fase ativa do aterro. Após o encerramento da disposição final, o CO₂ assume progressivamente maior relevância relativa, refletindo o peso crescente dos setores operacionais. O OC apresenta contribuição negativa ao longo de todo o período, associada ao seu efeito de resfriamento climático, com magnitude insuficiente para alterar o balanço total das emissões.

4.4.4 Análise integrada das emissões do sistema

O aterro sanitário constituiu a principal fonte de emissões de GEE do sistema de gestão de resíduos de Medianeira ao longo de toda a fase operacional. Em 2024, as emissões desse setor totalizaram 17.209 tCO₂eq, correspondendo a 90,8% das emissões totais do sistema, enquanto a coleta e transporte contribuiu com 954 tCO₂eq (5,0%) e o manuseio de equipamentos com 791 tCO₂eq (4,2%). No pico das emissões, em 2034, o aterro sanitário atingiu 23.382 tCO₂eq frente a 1.281 tCO₂eq da coleta e transporte e 1.062 tCO₂eq do manuseio de equipamentos.

Essa predominância decorre da decomposição da matéria orgânica disposta no aterro, processo que gera metano em grandes quantidades, gás com potencial de aquecimento global muito superior ao do CO₂ (IPCC, 2021). Junqueira et al. (2022), em avaliação do ciclo de vida do gerenciamento de RSU de Feira de Santana (BA), identificaram o aterro sanitário como a principal contribuição da pegada de carbono no cenário base, com destaque as emissões fugitivas do metano. Maria et al. (2020), ao estudarem o aterro de Luanda (Angola), encontraram dominância semelhante das

emissões diretas de metano no balanço global do sistema. Guo et al. (2022), analisando inventários de GEE de vários países, no setor de resíduos, mostraram que a disposição em aterro responde por 69 a 95% das emissões do setor de resíduos. Isso indica que essa concentração é uma característica estrutural de sistemas baseados em aterramento, e não uma particularidade local.

O pico das emissões totais foi registrado em 2034, ano subsequente ao encerramento da disposição de novos resíduos, previsto para 2033, atingindo 25.725 tCO₂eq. Esse comportamento é esperado e decorre da dinâmica intrínseca à degradação anaeróbia da matéria orgânica onde as reações bioquímicas responsáveis pela geração do metano não cessam com o encerramento das operações, uma vez que apenas uma pequena fração de carbono contido nos resíduos é emitida no ano em que estes são depositados, sendo a maior parte liberada gradualmente ao longo dos anos subsequentes (Alcani et al., 2018). Yapo et al. (2019), ao estimarem as emissões do aterro de Akouédo (Costa do Marfim), verificaram que o pico ocorreu um a dois anos após o encerramento em 2018, mesmo padrão observado em Medianeira.

A partir de 2035, as emissões caíram de 19.903 tCO₂eq para 8.717 tCO₂eq em 2040, chegando ao mínimo de 5.780 tCO₂eq em 2053, redução de 77,5% em relação ao pico. Com o estoque de carbono biodegradável se esgotando, a geração do metano decresce exponencialmente. Rafiq et al. (2018) documentaram esse decaimento também no aterro de Faisalabad (Paquistão) e apontam que ele é recorrente em modelos de primeira ordem. Alcani et al. (2018) estimam que a decomposição diminui por 30 anos ou mais após a deposição dos resíduos.

A partir de 2054, as emissões voltam a crescer. 10.124 tCO₂eq em 2083, 16.438 tCO₂eq em 2100 e 29.538 tCO₂eq em 2120. Esse crescimento não vem do aterro, cujas emissões seguem em queda, mas dos setores de coleta, transporte e manuseio de equipamentos, que aumentam continuamente com o crescimento populacional e a geração de RSU.

A análise por poluente revelou que o metano constitui o componente largamente dominante das emissões do aterro sanitário durante toda a fase operacional, reflexo direto do elevado potencial de aquecimento global desse gás em relação ao CO₂ (IPCC, 2021). Ao longo do prazo, contudo, à medida que as emissões do aterro declinam após encerramento, o CO₂ assume progressivamente maior relevância relativa no balanço total do sistema, impulsionado pelo crescimento contínuo das emissões dos setores de coleta, transporte e manuseio de equipamentos, uma vez que a gestão nunca estagna. Rouhi et al.

(2023), ao modelarem a pegada de carbono do transporte de RSU em Teerã, confirmam que as emissões desse setor são compostas principalmente por CO₂ fóssil, e que o combustível consumido, distância percorrida e massa transportada são os três parâmetros que mais influenciam esse resultado.

Diante disso, evidencia-se que o desempenho ambiental do sistema de gestão de RSU de Medianeira no cenário base está condicionado por dois vetores distintos, no curto e médio prazo, pelo metano gerado no aterro, onde atualmente 88,29% dos resíduos são encaminhados de forma indiferenciada, e no longo prazo, pelo CO₂ dos setores operacionais, cuja trajetória de crescimento independe do encerramento do aterro. Nesse contexto, a modelação de cenários alternativos no SWEET, considerando o desvio de frações orgânicas para compostagem, a valorização energética do biogás e a expansão da reciclagem, constitui um passo necessário para avaliar em que medida intervenções na gestão dos RSU podem alterar essa trajetória, conforme desenvolvido na seção seguinte.

4.5 Análise dos cenários alternativos de emissões de GEE

4.5.1 Dinâmica temporal das emissões por cenário

As emissões totais anuais por cenário, expressas em tCO₂eq para o período de 2006-2050, encontram-se sistematizadas no Apêndice 1.

No período de 2006 a 2026, todos os cenários apresentam emissões idênticas ao cenário base, uma vez que as intervenções têm início em 2027. A partir desse ano, os cenários passam a divergir, com reduções de magnitude distinta conforme natureza de cada intervenção.

O C1 apresenta redução gradual face ao cenário base a partir de 2027, atingindo 7.940 tCO₂eq em 2040, valor 8,9% inferior aos 8.717 tCO₂eq do cenário base no mesmo ano. O C3 segue comportamento semelhante, com emissões de 8.261 tCO₂eq em 2040, representando redução de 5,2% face ao cenário base. Ambos os cenários mantêm a trajetória geral do cenário base, pico em 2034, declínio até 2053 e retoma gradual a partir de 2054, mas com valores sistematicamente inferiores ao longo de todo o horizonte de análise.

O C2 e o C4 apresentam comportamento distinto. A partir de 2028, ano de entrada em operação do sistema de captação de biogás, registam-se quedas abruptas nas emissões totais. O C2 passa de 20.797 tCO₂eq em 2027 para 8.979 tCO₂eq em 2028, atingindo 4.928 tCO₂eq em 2040, redução de 43,5% face ao cenário base. O C4, que

combina simultaneamente as três intervenções, registra a maior redução do conjunto: 8.188 tCO₂eq em 2028 e 4.217 tCO₂eq em 2040, correspondendo a uma redução de 51,6% face ao cenário base no mesmo ano. A figura 22 apresenta a evolução temporal das emissões por cenário no período 2024-2050.

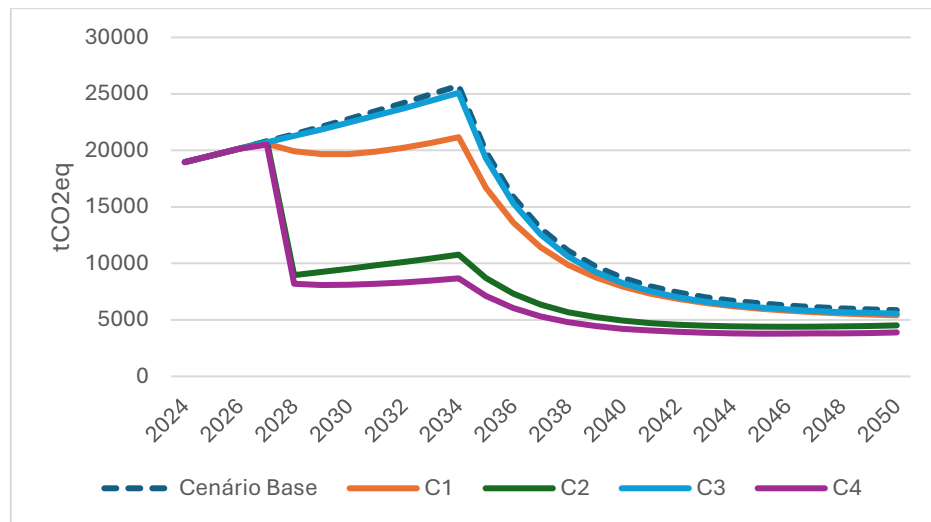


Figura 22. Evolução temporal das emissões totais por cenário no período de intervenção (2024-2050).

A figura 23 apresenta a evolução temporal das emissões totais para o horizonte completo de análise (2006-2120), evidenciando a divergência entre os cenários a partir de 2027 e a convergência progressiva no longo prazo, à medida que as emissões do aterro declinam e os setores operacionais assumem maior peso relativo no balanço total do sistema.

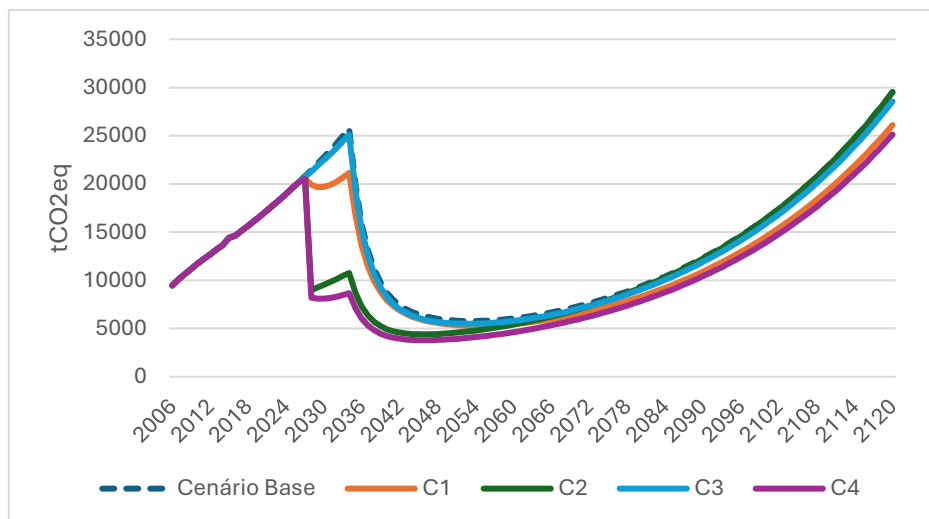


Figura 23. Evolução temporal das emissões totais por cenário do sistema de gestão de RSU de Medianeira (2006-2120).

A figura 24 apresenta as reduções anuais de emissões de cada cenário face ao cenário base, expressas em tco2eq para o período de 2024-2050.

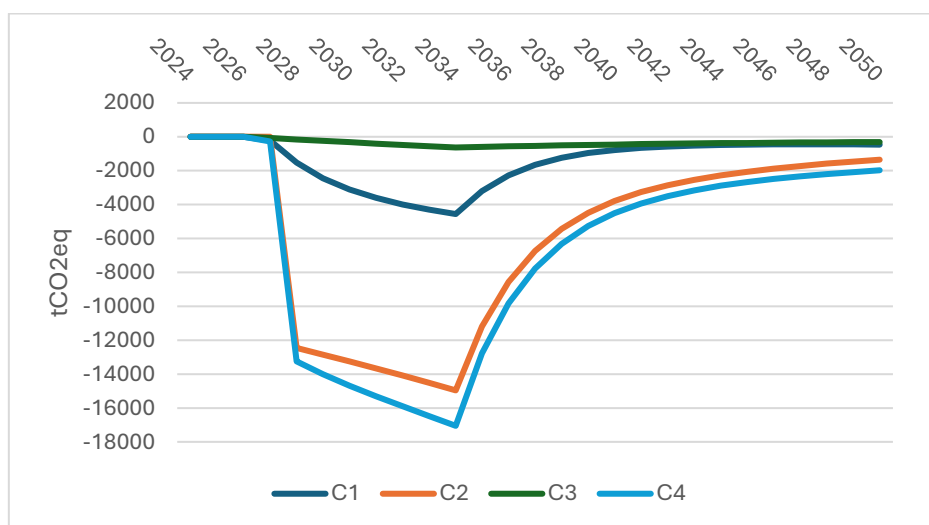


Figura 24. Reduções anuais de emissões face ao cenário base por cenário.

No ano de início das intervenções, 2027, as reduções são ainda marginais em todos os cenários, variando entre -63,10 tCO₂eq no C3 e -281,64 tCO₂eq no C4. A partir de 2028, com a entrada em operação do sistema de captação de biogás, os cenários C2 e C4 registam quedas expressivas, atingindo -12.463,43 tCO₂eq e -13.253,57 tCO₂eq respectivamente.

As reduções máximas são registadas em 2034, ano de pico das emissões do cenário base. Nesse ano, o C4 atinge -17.053,59 tCO₂eq e o C2 -14.961,33 tCO₂eq,

enquanto o C1 regista -4.557,74 tCO₂eq e o C3 -630,75 tCO₂eq. A partir de 2035, as reduções absolutas diminuem progressivamente em todos os cenários, não porque as intervenções percam eficácia, mas porque o próprio cenário base também regista queda nas emissões após o encerramento da disposição final em 2033.

Em 2040, o C4 mantém a maior redução do conjunto com -4.499,96 tCO₂eq, seguido do C2 com -3.788,24 tCO₂eq, do C1 com -776,93 tCO₂eq e do C3 com -456,02 tCO₂eq. A tabela 29 sintetiza as emissões totais de GEE em anos representativos do período analisado, permitindo comparar a magnitude das reduções entre cenários.

Tabela 29. Emissões totais de GEE (tCO₂eq) por cenário e respectiva variação percentual em relação ao cenário base.

Ano	C.B	C1	Δ%	C2	Δ%	C3	Δ%	C4	Δ%
2027	20.794	20.573	-1,06	20.797	+0,01	20.731	-0,30	20.512	-1,35
2028	21.442	19.920	-7,10	8.979	-58,13	21.289	-0,71	8.188	-61,81
2034	25.725	21.168	-17,72	10.764	-58,16	25.095	-2,45	8.672	-66,29
2040	8.717	7.940	-8,91	4.928	-43,46	8.261	-5,23	4.217	-51,63
2050	5.862	5.404	-7,81	4.513	-23,01	5.558	-5,20	3.880	-33,81

Nota: C.B (Cenário Base); C1 (Cenário 1); C2 (Cenário 2); C3 (Cenário 3); C4 (Cenário 4); Δ% (Variação percentual em relação ao cenário base).

4.5.2 Comparação crítica e implicações dos cenários

Os resultados mostram que as quatro intervenções reduzem as emissões face ao cenário base, mas com eficácias muito diferentes. A captação de biogás, isolada no C2 ou combinada no C4, é a medida de maior impacto. O C1 e o C3 produzem reduções menores, por razões distintas.

O sistema de Medianeira é dominado pelo metano do aterro, que responde por mais de 90% das emissões totais, como demonstrado na secção 4.4. Atuar diretamente na captação desse gás, como faz o C2, produz reduções desproporcionalmente maiores do que desviar resíduos. Da mesma forma, Pheakdey et al. (2023) verificaram que a queima ativa por flare em aterros do Cambódia reduz as emissões de GEE em pelo menos 55%.

O C3 registou a menor redução, -2,4% em 2034. A reciclagem reduz a massa enviada ao aterro e evita emissões pela substituição de matéria-prima virgem, mas o modelo SWEET atua no primeiro efeito, sem levar em consideração as emissões indiretas. King e Gutberlet (2013) documentaram que reciclar plástico, papel, vidro e metais é ambientalmente superior ao aterramento, mas o impacto absoluto depende do volume

desviado. Em Medianeira, aumentar a taxa de reciclagem de 8,32% para 20% não é suficiente para alterar a curva de metano do *stock* já depositado no aterro.

O C1 fica numa posição intermédia, -17,7% em 2034 e -8,9% em 2040. O desvio de 30% da fração orgânica para compostagem reduz a entrada de matéria biodegradável no aterro, mas não afeta os resíduos já depositados. Luiz e Suski (2021) mostram que as rotas tecnológicas antes da disposição final são determinantes para a redução de GEE em municípios brasileiros, o que explica por que o C1 ganha mais relevância no longo prazo, quando a massa orgânica no aterro começa a esgotar-se.

O C4 alcança a maior redução, -66,3% em 2034 e -51,6% em 2040, indicando que as intervenções têm efeitos complementares no sistema, ainda que possam existir interações entre elas ao longo do tempo. O desvio de orgânicos reduz a entrada de matéria biodegradável e pode diminuir o potencial de captação de biogás no longo prazo. Esses efeitos não invalidam a superioridade do C4, mas mostram que os ganhos combinados devem ser interpretados à luz das dinâmicas específicas do sistema e do horizonte temporal analisado.

4.6 Avaliação dos indicadores de sustentabilidade do sistema de gestão de RSU

A avaliação dos indicadores de sustentabilidade do sistema de gestão de RSU de Medianeira foi realizado com base nos resultados obtidos nas etapas anteriores, além de contatos diretos com a secretaria do Meio Ambiente da cidade, dados retirados dos portais governamentais e contactos com moradores, abrangendo aspectos ambientais-operacionais, sociais, político-institucionais e económicos.

Os resultados obtidos para cada indicador são apresentados a seguir, organizados por dimensão de sustentabilidade.

Tabela 30. Resultados para os indicadores de sustentabilidade para dimensão social no município de Medianeira.

Indicador	Situação encontrada	Resultado
Percentual de pessoas atendidas pela coleta seletiva	Cobertura da coleta total de Resíduos domiciliares: 100% (SINISA, 2024).	FAVORÁVEL
Grau de seletividade do serviço de coleta de RSU	Coleta de rejeitos + recicláveis secos, sem coleta de orgânicos.	DESFAVORÁVEL
Instrumentos legais na relação com as organizações de catadores.	Contrato com remuneração (ASSAMA).	FAVORÁVEL

Tabela 30 (cont.). Resultados para os indicadores de sustentabilidade para dimensão social no município de Medianeira.

Indicador	Situação encontrada	Resultado
Disponibilização dos serviços públicos de coleta ou recepção de RS na área rural.	Coleta seletiva existente, sem aproveitamento de orgânicos.	DESFAVORÁVEL
Catadores organizados (cooperativas, associações)	42 associados organizados formalmente na ASSAMA (Prefeitura de Medianeira, 2026).	FAVORÁVEL

Na dimensão social, 60% dos indicadores foram classificados como favoráveis. Destaca-se positivamente a cobertura universal da coleta seletiva e a existência de contrato com remuneração com a ASSAMA. Os indicadores desfavoráveis estão associados à ausência de coleta de resíduos orgânicos no município, tanto na área urbana quanto rural.

Tabela 31. Resultados para os indicadores de sustentabilidade para dimensão ambiental-operacional no município de Medianeira.

Indicador	Situação encontrada	Resultado
Possui um Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos?	Em processo de elaboração (Prefeitura de Medianeira, 2026).	DESFAVORÁVEL
Geração de RSU per capita (kg/hab.ano).	315,73 kg/hab.ano (SINISA, 2024)	DESFAVORÁVEL
Existência de coleta seletiva no município.	Sim, Associação dos Agentes do Meio Ambiente (ASSAMA).	FAVORÁVEL
Existência de lixeiras públicas.	Somente no centro da cidade (Observação in loco).	DESFAVORÁVEL
Eficiência de coleta convencional.	100% (SINISA, 2024)	FAVORÁVEL
Veículo coletor específico e apropriado em termos de capacidade, tratamento para as necessidades de geração local	Sim, utilizado somente para esta função (Prefeitura de Medianeira, 2026).	FAVORÁVEL
Grau de recuperação dos passivos ambientais (antigos lixões)	Área mapeada com PRAD, sem recuperação plena (PMSB, 2018).	DESFAVORÁVEL
Índice de recuperação de materiais recicláveis.	8,32% (SINISA, 2024).	DESFAVORÁVEL

Tabela 31 (cont.). Resultados para os indicadores de sustentabilidade para dimensão ambiental-operacional no município de Medianeira.

Indicador	Situação encontrada	Resultado
Existência de aterro para resíduos inertes (resíduos de construção e demolição).	Não possui (Prefeitura de Medianeira, 2026).	MUITO DESFAVORÁVEL

A dimensão ambiental-operacional apresentou o desempenho mais crítico, com apenas 33% dos indicadores favoráveis e um indicador muito desfavorável, a ausência de aterro para resíduos inertes. Os principais pontos críticos são a ausência de PMGIRS consolidado, a geração per capita de 315,73 kg/hab.ano, a disponibilização restrita de lixeiras públicas e o baixo índice de recuperação de recicláveis de 8,32%. No que se refere à recuperação de passivos ambientais, embora o antigo lixão esteja desativado e possua Projeto de Recuperação de Área Degradada (PRAD), não há evidências de recuperação plena da área.

Tabela 32. Resultados para os indicadores de sustentabilidade para dimensão político-institucional no município de Medianeira.

Indicador	Situação encontrada	Resultado
Estruturação da gestão de RSU na administração pública municipal	Setor específico com pessoas qualificadas (Prefeitura de Medianeira, 2026).	FAVORÁVEL
Participação da população através de canais específicos para gestão dos RSU	Canal existente e utilizado pela população (Prefeitura de Medianeira, 2026).	FAVORÁVEL
Participação Social na elaboração do PMGRS	Audiência pública, sem participação em todas as etapas (Prefeitura de Medianeira, 2026).	DESFAVORÁVEL
Capacitação contínua de agentes que atuam na área da limpeza pública	Capacitação esporádica, sem programa estruturado (Prefeitura de Medianeira, 2026).	DESFAVORÁVEL

Na dimensão político-institucional, 50% dos indicadores foram favoráveis. A gestão municipal conta com estrutura institucional adequada e canais de participação utilizados pela população. Por outro lado, a participação social na elaboração do PMGIRS foi limitada, embora tenham ocorrido audiências públicas, a população não esteve envolvida em todas as etapas do processo. As ações de capacitação dos agentes de limpeza pública ocorrem de forma esporádica, sem programa estruturado e contínuo.

Tabela 33. Resultados para os indicadores de sustentabilidade para dimensão económica no município de Medianeira.

Indicador	Situação encontrada	Resultado
Origem dos recursos para o gerenciamento de resíduos sólidos	Taxa específica no boleto de água (Sinisa, 2024).	FAVORÁVEL
Aplicação dos recursos provenientes da coleta seletiva	Renda distribuída entre os associados da ASSAMA (Prefeitura de Medianeira, 2026).	FAVORÁVEL
Investimento financeiro em Educação Ambiental para a Gestão de RSU	Ausência de programa municipal permanente; Ações pontuais e fragmentadas (Prefeitura de Medianeira, 2026).	DESFAVORÁVEL
Iniciativas de Logística reversa no município	Pontos de recebimento articulados com divulgação e uso da população (Prefeitura de Medianeira, 2026).	FAVORÁVEL

A dimensão económica apresentou o melhor desempenho, com 75% dos indicadores favoráveis. O município possui taxa específica para o serviço de limpeza pública, os recursos da coleta seletiva são aplicados na manutenção da ASSAMA e as iniciativas de logística reversa estão articuladas e em expansão. O único indicador desfavorável foi o investimento em educação ambiental, dado que não existe programa municipal permanente nessa área.

A tabela 34 apresenta o desempenho global do sistema.

Tabela 34. Desempenho agregado por dimensão de sustentabilidade para o município de Medianeira.

Dimensão	Total de indicadores	F	D	MD	% favoráveis
Social	5	3	2	0	60%
Ambiental-operacional	9	3	5	1	33%
Político-institucional	4	2	2	0	50%
Económica	4	3	1	0	75%
Média global	22				54,5%

Nota: F (Favoráveis); D (Desfavoráveis); MD (Muito desfavoráveis).

De forma geral, a média global dos percentuais dimensionais foi de 54,5%, indicando um desempenho intermediário do sistema de gestão de RSU de Medianeira. A dimensão económica apresentou o melhor desempenho, seguida pelas dimensões social e político-institucional com resultados equilibrados. A dimensão ambiental-operacional concentra as principais fragilidades do sistema.

Diante desse cenário, evidencia-se que o sistema de gestão de RSU do município apresenta um equilíbrio entre aspectos positivos e limitações. Os indicadores favoráveis demonstram avanços importantes, especialmente relacionados à estrutura institucional, à organização da coleta seletiva e aos mecanismos de financiamento do sistema.

Por outro lado, os indicadores desfavoráveis indicam deficiências no sistema que comprometem o alcance de níveis mais elevados de sustentabilidade, associadas principalmente à ausência de planejamento plenamente consolidado, à insuficiência de ações de educação ambiental, à recuperação parcial de passivos ambientais e à baixa eficiência na recuperação de materiais recicláveis.

Dessa forma, a gestão de RSU no município de Medianeira caracteriza-se como um sistema em processo de transição, no qual coexistem práticas consolidadas e desafios ainda não superados. Embora não possa ser considerada insustentável, a gestão demanda aprimoramentos contínuos para alcançar um padrão mais elevado de sustentabilidade.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 Principais conclusões

O presente estudo teve como objetivo analisar o sistema de gestão de RSU do município de Medianeira, no estado do Paraná, avaliando seu desempenho operacional, a conformidade com a PNRS, a pegada de carbono associada e o potencial de melhoria mediante a adoção de cenários alternativos.

Do ponto de vista institucional, Medianeira apresenta uma estrutura de governança relativamente sólida, sustentada pelo PMSB de 2018 e pela Lei Municipal n.º 1109/2022, que incorpora as diretrizes da PNRS e do PERS/PR. A responsabilidade macrogestora encontra-se centralizada na Secretaria de Agricultura Sustentável e Abastecimento, e a execução operacional da coleta convencional é delegada à empresa CORAE por meio do Contrato Administrativo n.º 194/2021.

A avaliação da conformidade normativa revelou um duplo panorama. Por um lado, o município alcança plena conformidade em dimensões fundamentais: cobertura universal da coleta (100%), estruturação da coleta seletiva com cobertura urbana e rural, inclusão formal de catadores por meio da ASSAMA e implementação de mecanismos de logística reversa para resíduos eletroeletrônicos e pilhas. Por outro lado, persistem duas não conformidades relevantes com a PNRS: a ausência de programas estruturados de não geração e redução na fonte e o descumprimento da ordem de prioridade no manejo, uma vez que a fração indiferenciada recolhida pela CORAE é encaminhada diretamente ao aterro sem qualquer processo de triagem ou tratamento biológico prévio.

A análise dos fluxos de materiais para o ano-base de 2024 revelou que, das 18.026 toneladas de RSU geradas, 88,29% foram encaminhadas ao aterro sanitário e apenas 11,71% foram desviadas via coleta seletiva. A taxa de reciclagem efetiva foi de 8,32%, valor que, embora superior à média brasileira de reciclagem formal (4%), permanece expressivamente inferior aos padrões da Europa Ocidental (>55%). A geração per capita estimada de 0,8646 kg/hab.dia situa-se dentro da faixa de referência para municípios de porte semelhante, não constituindo por si só um fator crítico, mas amplificando os impactos decorrentes da baixa circularidade do sistema.

A análise da eficiência operacional da ASSAMA revelou uma melhoria no indicador de rejeitos por tonelada triada (0,41 t/t em 2024, face a 0,55 t/t em 2022), sinal positivo de evolução técnica da associação. Contudo, o volume absoluto de rejeitos quase duplicou no período, reflexo da expansão do volume triado sem ganhos equivalentes na

qualidade da separação na fonte, indicando que a eficiência global do sistema permanece fortemente condicionada ao comportamento dos geradores.

A quantificação da pegada de carbono pelo modelo SWEET v5.0 demonstrou que o aterro sanitário constitui a fonte dominante de emissões de GEE do sistema, respondendo por 90,8% das emissões totais em 2024, com o metano como poluente largamente predominante. O crescimento contínuo das emissões durante a fase operacional projeta um pico de 25.725 tCO₂eq em 2034, ano subsequente ao encerramento previsto da disposição de resíduos. Após esse ponto, as emissões do aterro decrescem progressivamente, mas as emissões dos setores de coleta, transporte e manuseio de equipamentos continuam a crescer, assumindo maior relevância relativa no longo prazo.

A modelação com o LandGEM estimou uma geração de biogás com pico de 1.126.866,1 m³/ano de metano em 2034 e potencial energético máximo de 1.755,55 MWh/ano, suficiente para abastecer aproximadamente 735 habitantes. A comparação entre os modelos LandGEM e SWEET demonstrou semelhança durante o período operacional (diferença inferior a 15%), com divergência expressiva no período pós-encerramento, atribuída às diferenças estruturais entre um modelo monofásico (LandGEM) e um modelo multifração baseado na composição gravimétrica (SWEET).

A proposição e simulação de quatro cenários alternativos de gestão demonstrou que todas as intervenções analisadas produzem reduções de emissões face ao cenário base, mas com eficácias significativamente distintas. A captação e aproveitamento energético do biogás (C2) revelou-se a medida de maior impacto isolado, com redução de 58,2% das emissões em 2034 face ao cenário base. O desvio de 30% da fração orgânica para compostagem (C1) obteve a segunda maior redução isolada (-17,7% em 2034), enquanto a expansão da reciclagem para 20% (C3) registou o menor impacto (-2,4% em 2034), uma vez que a reciclagem não altera o *stock* de metano já em decomposição no aterro. O cenário combinado (C4), alcançou a maior redução do conjunto, -66,3% em 2034 face ao cenário base. Estes resultados confirmam que a captação de biogás é a medida de mitigação mais imediata e eficaz disponível no setor de resíduos de Medianeira, dado que o sistema é estruturalmente dominado pelas emissões de metano do aterro.

A avaliação multidimensional dos indicadores de sustentabilidade resultou numa média global de 54,5% de indicadores favoráveis, configurando um desempenho intermédio. A dimensão económica apresentou o melhor desempenho, seguida pelas

dimensões social e político-institucional. A dimensão ambiental-operacional concentrou as maiores fragilidades do sistema.

Em síntese, o sistema de gestão de RSU de Medianeira caracteriza-se como um sistema em transição, no qual práticas consolidadas, como a universalização da coleta e a inclusão produtiva da ASSAMA, coexistem com limitações estruturais que comprometem a sua sustentabilidade de longo prazo. A elevada dependência da disposição final em aterro, a ausência de rotas de valorização para a fração orgânica e a insuficiência de ações de educação ambiental constituem os principais vetores de melhoria identificados.

5.2 Propostas de melhoria para o sistema de gestão de RSU de Medianeira

Com base nas limitações identificadas e nas boas práticas evidenciadas pela análise comparativa com outros municípios e referências internacionais, a principal proposta de melhoria consiste na instalação de um sistema de captação ativa e aproveitamento energético do biogás gerado no aterro sanitário. Essa proposta necessita da instalação de uma rede de drenos verticais para captação do biogás nas células do aterro.

A segunda proposta consiste na criação de uma infraestrutura municipal de valorização da fração orgânica por compostagem ou digestão anaeróbia, visto que, a fração orgânica representa o principal gap do sistema atual e o maior potencial de desvio do aterro. Para a implementação, recomenda-se a elaboração de estudo de viabilidade técnica e econômica que avalie comparativamente as tecnologias de compostagem em leiras revolvidas, compostagem em sistema fechado e digestão anaeróbia, considerando as características do município.

Terceiramente, fortalecer e expandir a coleta seletiva realizada pela ASSAMA, por meio de investimentos em campanhas de educação ambiental com caráter permanente e contínuo, orientadas especificamente para a correta separação de resíduos na fonte. Além disso, programa municipal de compostagem domiciliar e comunitária, que reduziria a fração orgânica destinada ao aterro sanitário.

Por fim, devido a limitação das estimativas de geração e composição gravimétrica, recomenda-se a realização periódica de caracterização gravimétrica dos RSU no município e também, a implementação de um sistema de informação integrado para o registro e análise dos dados operacionais do sistema.

5.3 Sugestões para investigações futuras

Os resultados e as limitações identificadas neste estudo abrem perspectivas para novas investigações, as quais poderiam aprofundar o conhecimento sobre a gestão de RSU em Medianeira e em municípios de porte semelhante no Brasil.

Inicialmente, realizar uma campanha de caracterização gravimétrica local dos RSU de Medianeira, com recolha de amostras representativas por setor e época do ano. Isso permitiria substituir os parâmetros de referência do IPCC por dados empíricos locais, o que aumentaria consideravelmente a precisão das estimativas de geração de biogás, emissões de GEE e potencial energético.

Em seguida, realizar um estudo de viabilidade técnico-económica detalhado para a implantação de um sistema de captação e aproveitamento energético do biogás.

Além disso, a ACV comparativa entre os cenários alternativos de gestão simulados nesta pesquisa possibilitaria a avaliação dos impactos ambientais em outras categorias, além das emissões de GEE. Isso forneceria uma perspectiva mais ampla sobre os compromissos ambientais de cada intervenção. Adicionalmente, as emissões de GEE com base nos escopos do *GHG Protocol*.

Por fim, a elaboração de um plano de monitoramento de longo prazo para o aterro sanitário após o seu encerramento, abrangendo a medição em campo das emissões de metano, a qualidade dos chorumes e a estabilidade geotécnica das células fechadas, seria uma contribuição técnica de grande valor para a gestão ambiental do município nas décadas futuras.

5.4 Considerações finais

O presente estudo revelou que o município de Medianeira apresenta uma estrutura robusta e operacional para gerir os RSU, com avanços notáveis na coleta universal, na inclusão dos catadores e na logística reversa. No entanto, a investigação aponta uma forte dependência persistente do aterro sanitário, baixa reciclagem e ausência de rotas de valorização para a fração orgânica predominante. Isso se traduz em uma pegada de carbono crescente e no rápido esgotamento da capacidade atual instalada.

A modelação dos cenários alternativos demonstrou que é possível adotar métodos de gestão mais sustentáveis, tanto tecnicamente como ambientalmente. Com a combinação de captação de biogás, valorização orgânica e expansão da reciclagem, o potencial de redução das emissões podem cair até 66,3%. No entanto, para que isso

aconteça, é preciso investir em infraestrutura, mas também fortalecer o planejamento conjunto, de conscientização ambiental, mecanismos de monitorização e avaliação contínua do desempenho do sistema.

Espera-se que os resultados e as recomendações aqui apresentados possam contribuir para o processo de elaboração do PMGIRS de Medianeira, apoiar a tomada de decisão dos gestores municipais e fornecer uma referência metodológica replicável para outros municípios brasileiros que enfrentam desafios semelhantes na transição para a economia circular e na redução da pegada de carbono do setor de resíduos.

REFERÊNCIAS

- Abrema. (2024). *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2024*. ABREMA. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil.
- Abreu, M. D. (2017). *Compostagem doméstica, comunitária e institucional de resíduos orgânicos*. Ministério do Meio Ambiente.
- Abdulredha, M., Al-Khaddar, R., Kot, P., Jordan, D., & Abdulridha, A. (2018). Benchmarking of the current solid waste management system in Karbala, Iraq, using Wasteaware benchmark indicators. In S. Kamojjala (Ed.), *World Environmental and Water Resources Congress 2018: Groundwater, sustainability, and hydro-climate/climate change - Selected papers from the World Environmental and Water Resources Congress 2018* (pp. 40–48). American Society of Civil Engineers.
- Alvarenga, I. S. (2025). *Recuperação energética de resíduos sólidos urbanos: uma revisão sistemática*. [Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal da Paraíba]. Repositório Institucional da UFPB.
- Alvarenga, A. D., Pereira, A. A. S., & Salgado, E. G. (2023). A tomada de decisão na gestão de resíduos sólidos de municípios pequenos brasileiros. *Revista De Gestão E Secretariado*, 14(8), 14218–14240.
- Amancio, J. M. d. S., Costa, K. A., Freitas, W. K. d., Gois, G. d., Terassi, P. M. d. B., Sabbadini, F. S., Freitas, J. d. S., Falcão, J. B., Conejero, M. A., & Martinazzo, A. P. (2026). A Carbon Footprint Comparative Analysis of Anaerobic Digestion vs. Landfill Gas Recovery in Brazil. *Recycling*, 11(1), 5.
- Amini, H. R., Reinhart, D. R., & Niskanen, A. (2013). Comparison of first-order-decay modeled and actual field measured municipal solid waste landfill methane data. *Waste Management*, 33(12).
- Alcani, M., Dorri, A., & Maraj, A. (2018). Estimation of Energy Recovery Potential And Environmental Impact Of Tirana Landfill Gas. *Environment Protection Engineering*, 44 (3).
- Alves, E. E. N., Inoue, K. R. A., & Borges, A. C. (2010, 23–25 de setembro). *Biodigestores: construção, operação e usos do biogás e do biofertilizante visando a sustentabilidade das propriedades rurais* [Apresentação de trabalho]. II Simpósio Brasileiro de Agropecuária Sustentável, Viçosa, MG, Brasil.

Aparcana, S. (2017). *Approaches to formalization of the informal waste sector into municipal solid waste management systems in low-and middle-income countries: Review of barriers and success factors*. *Waste management*, 61, 593-607.

Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. (2024). *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2023*. ABRELPE.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2024). NBR 10.004 – 1:2024: Resíduos sólidos – Classificação – Parte 1: Requisitos de classificação. ABNT 2024a.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2024). NBR 10.004 – 2:2024: Resíduos sólidos – Classificação – Parte 2: Sistema Geral de Classificação de Resíduos (SGCR). ABNT 2024b.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1992). *NBR 8419: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos*. ABNT.

Associação Portuguesa do Ambiente. (2014). *Plano Estratégico para os Resíduos Urbanos (PERSU 2020)*.

Associação Portuguesa do Ambiente. (2021). *Plano Estratégico para os Resíduos Urbanos 2030 (PERSU 2030)*.

Awino, F. B., & Apitz, S. E. (2024). *Solid waste management in the context of the waste hierarchy and circular economy frameworks: An international critical review*. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 20(1), 9-35.

Ayoub, J. P., Oliveira, M. R. N. de, Freitas, F. H. de, Viana, L. O., & Cruz, I. A. da. (2025). *Gestão de resíduos sólidos urbanos, desafios e perspectivas: Uma revisão bibliográfica*. *IOSR Journal of Multidisciplinary Research*, 2(5, Série 2), 27–31.

Banerjee, S., & Sarkhel, P. (2020). *Municipal solid waste management, household and local government participation: A cross country analysis*. *Journal of Environmental Planning and Management*, 63(2), 210–235.

Bogner, J., Abdel-Aziz, A., Diaz, L. F., Kjeldsen, P., & Mbeca, C. (2022). *Waste Management and Climate Change: Updating Methane Emission Factors*. *Waste Management*, 152, 10–22.

Bouallagui, H., Cheikh, RB, Marouani, L., & Hamdi, M. (2003). *Mesophilic biogas production from fruit and vegetable waste in a tubular digester*. *Bioresource technology*, 86(1), 85-89.

Bogner, J. P., Pipatti, R., Hashimoto, S., Diaz, C., Mareckova, K., Diaz, L., Kjeldsen, P., Monni, S., Faaij, A., Gao, Q., Zhang, T., Ahmed, M. A., Sutamihardjo, R. T. M., & Gregory, R. (2008). *Mitigation of global greenhouse gas emissions from waste:*

Conclusions and strategies from the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Fourth Assessment Report: Working Group III (Mitigation). *Waste Management & Research*, 26(1), 11–32.

Bernstad, A., & la Cour Jansen, J. (2012). Review of comparative LCAs of food waste management systems: Current status and potential improvements. *Waste Management*, 32(12), 2439–2455.

Besen, G. R., Günther, W. M. R., Ribeiro, H., Jacobi, P. R., & Dias, S. M. (2017). *Gestão da coleta seletiva e de organizações de catadores: Indicadores e índices de sustentabilidade* [Livro eletrônico]. Faculdade de Saúde Pública da Universidade de São Paulo.

Brasil. (2010). *Lei nº 12.305/2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos*. Diário Oficial da União.

Brasil. (2010, 23 de dezembro). *Decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010*.

Brasil. (2022a, 12 de janeiro). *Decreto nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010*.

Brasil. (2022b, 13 de abril). *Decreto nº 11.043, de 13 de abril de 2022. Aprova o Plano Nacional de Resíduos Sólidos*.

Brasil. (1981, 31 de agosto). *Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências*. Presidência da República.

Carvalho, D. da S., Sguarezi, S. B., & Froehlich, A. G. (2022). Aplicação de indicadores de sustentabilidade na gestão de resíduos sólidos em Tangará da Serra, Mato Grosso, Brasil. *Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, 9(21), 185–203.

Camargo, I. V. (2014). *Indicadores de sustentabilidade no contexto da Política Nacional de Resíduos Sólidos: uma proposta para Bragança Paulista – SP*. [Dissertação de Mestrado em Engenharia Urbana] – Universidade Federal de São Carlos.

Carvalho, J. M. O., Ruivo, P., Sampaio, J., & Calado, D. (2015). Gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU): - breve incursão às variáveis teóricas de suporte, de avaliação e de comunicação. *Revista Da UI_IPSantarém*, 3(4), 236–254.

Chioatto, E., Khan, M. A., & Sospiro, P. (2023). Sustainable solid waste management in the European Union: Four countries regional analysis. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 33, 101037.

- Christensen, T. H. (2009). *Solid Waste Technology & Management*. Wiley.
- Cifrian, E., Coz, A., & Viguri, J. R. (2012). A methodology for assessing the performance of municipal solid waste management systems in developed and developing countries. *Waste Management*, 32(8), 1327–1338.
- Clemente, E., Domingues, E., Quinta-Ferreira, R. M., Leitão, A., & Martins, R. C. (2024). European and African landfilling practices: an overview on MSW management, leachate characterization and treatment technologies. *Journal of Water Process Engineering*, 66, 105931.
- Campitelli, A., & Schebek, L. (2020). How is the performance of waste management systems assessed globally? A systematic review. *Journal of Cleaner Production*, 272, 122856.
- Christensen, T. H., Bhandar, G. S., Lindvall, H. K., Larsen, A. W., Fruergaard, T., Damgaard, A., Manfredi, S., Boldrin, A., Riber, C., & Hauschild, M. Z. (2007). Experience with the use of LCA-modelling (EASEWASTE) in waste management. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 25(3), 257–262.
- Calderoni, S. (1997). Os Bilhões Perdidos no Lixo. Humanitas/FFLCH/USP.
- Cifrian, E., Galan, B., Andres, A., & Viguri, J. R. (2012). Material flow indicators and carbon footprint for MSW management systems: Analysis and application at regional level, Cantabria, Spain. *Resources, Conservation and Recycling*, 68, 54–66.
- Caravela. (2026, 9 de janeiro). *Economia de Medianeira - PR*. Recuperado em 02 de fevereiro de 2026.
- Coelho, U. R., Mendonça, P. M. de M., Silva, S. T. S., & Barros, R. M. (2021). Biogás: aproveitamento energético e gestão ambiental em aterro sanitário. *Revista Ibero-Americana De Ciências Ambientais*, 12(3), 540–553.
- da Cunha Gomes, C. M. B. (2008). *Estudo do comportamento de aterros de resíduos: Caracterização física, bioquímica e mecânica dos resíduos sólidos urbanos* [Tese de doutorado, Universidade do Porto Portugal].
- de Jesus, B. B. H. C. (2012). *Análise da política da gestão de resíduos sólidos em Timor-Leste: uma descrição comparativa dos sistemas de gestão de resíduos em Portugal e Timor-Leste* [Dissertação de mestrado, Universidade do Minho Portugal].
- Delmont, L. G. (2007). *Análise dos impactos econômicos oriundos da reciclagem de resíduos sólidos urbanos para a economia brasileira no ano de 2004: Uma*

abordagem insumo-produto. [Dissertação de mestrado, Universidade Federal da Bahia, Salvador].

Ding, Y., Zhao, J., Liu, J. W., Zhou, J., Cheng, L., Zhao, J., Shao, Z., Iris, Ç., Pan, B., Li, X., & Hu, Z. T. (2021). A review of China's municipal solid waste (MSW) and comparison with international regions: Management and technologies in treatment and resource utilization. *Journal of Cleaner Production*, 293, Article 126144.

dos Santos, A. N. S., da Silva Soares, D., da Silva, H. F., Veloso, C. C., Furtado, R. G., Nascimento, I. F., & Rasia, R. (2025). Resíduos sólidos e design sustentável—uma análise da reciclagem na “economia circular” à luz da agenda 2030. *ARACÊ*, 7(2), 7365-7391.

Empresa de Pesquisa Energética. (2024). Anuário estatístico de energia elétrica 2024: Ano base 2023. EPE.

Environmental Protection Agency. (2023). *Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: Waste Sector Overview*. Washington, DC: EPA.

Environmental Protection Agency. (2006). *Municipal solid waste in the United States: 2005 facts and figures* (Report No. EPA530-R-06-011). Office of Solid Waste and Emergency Response.

European Commission. (2014). *European List of Waste – Decision 2014/955/EU*. European Commission.

European Commission. (2020, March 11). *Circular economy action plan: For a cleaner and more competitive Europe*.

Eurostat. (2025). *Municipal waste statistics: Statistics explained*. European Union.

Fecchio, L. S., & Camara, P. (2020). *Iniciativas de compostagem no município de São Carlos-SP: panorama entre o presente e o futuro* [Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade de São Paulo].

Feitosa, J. A., & Jucá, J. F. T. (2014). Estimativa de geração de biogás em aterros sanitários brasileiros através de modelos cinéticos. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES).

Fei, X., Zekkos, D., & Raskin, L. (2016). Quantification of parameters influencing methane generation due to biodegradation of municipal solid waste in landfills and laboratory experiments. *Waste Management*, 55, 276-287.

Felca, A. T. A., Gloria, R. F., Alves, A. P., & Barros, R. M. (2021). Estimativa do potencial energético de um aterro sanitário por meio de duas metodologias. In C. da

S. Santos, F. dos S. Ritá, & R. A. Barbosa (Orgs.), *Vigilância e saúde ambiental: No contexto da educação* (pp. 131–140). Editora Científica Digital.

Freitas, E. C., & Barros, J. D. S. (2021). Análise do gerenciamento de resíduos sólidos urbanos através de indicadores de sustentabilidade no município de Uiraúna-PB. *Pesquisa e Ensino em Ciências Exatas e da Natureza*, 5, e1803.

Galavote, T., Cerqueira, A. F., Alves, R. B., Ramalho, J. C. M., Yamane, L. H., & Siman, R. R. (2022). Energy Recovery Technologies From Municipal Solid Waste: Enhancing Solid Waste Brazilian Policy. *Revista Brasileira de Energia*, 28(1).

Global Methane Initiative. (2025, June). *Solid Waste Emissions Estimation Tool (SWEET) user manual* (Version 5.0).

Gomes, B. K. E. (2023). *A importância da política nacional de resíduos sólidos na concretização do meio ambiente ecologicamente equilibrado: avanços e desafios para sua implementação*. [Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará].

Gomes, B. (2023). Instrumentos jurídicos da Política Nacional de Resíduos Sólidos. *Revista de Direito Ambiental*, 15(2), 45-67.

Granado, V. F. (2019). *Contribuições da Compostagem Doméstica para a concretização da Política Nacional de Resíduos Sólidos brasileira* [Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências].

Gripp, W. G. (1998). *Aspectos técnicos e ambientais da incineração de resíduos sólidos urbanos: Considerações sobre a proposta para São Paulo* [Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo].

Gueri, M. D., De Souza, S. N. M., & Kuczman, O. (2017). Parâmetros operacionais do processo de digestão anaeróbia de resíduos alimentares: uma revisão. *BIOFIX Scientific Journal*, 3(1), 17.

Gutberlet, J., Rizpah Besen, G., & Moraes, L. (2020). Governança participativa de resíduos sólidos e o papel da economia social e solidária: experiências de São Paulo, Brasil. *Detritus*, 13, 167–180.

Guabiroba, R. C. da S., Jacobi, P. R., Abegão, L. H. A., & Besen, G. R. (2023). Sustainability performance evaluation of municipal selective collection systems applied to a case study. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, 58(1), 1–10.

Gama, A., & Russo, M. (2024). Challenges in municipal solid waste management: A comparative case study between selected metropolitan areas Brazil and Portugal. *MOJ Ecology & Environmental Sciences*, 9(3), 96–102.

Guo, H., Xu, H., Liu, J., Nie, X., Li, X., Shu, T., Bai, B., Ma, X., & Yao, Y. (2022). Greenhouse Gas Emissions in the Process of Landfill Disposal in China. *Energies*, 15(18), 6711.

Google. (2023). [Imagem do Google Earth Pro de Medianeira, Paraná, Brasil] [Imagem de satélite]. *Google Earth Pro*.

Hayda, Y., Dluhopolskyi, O., Zatonatska, T., Haida, T., Lavrentiev, M., & Smyk, A. (2023, March). Solid waste market: cross-country analysis. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1150(1), 012012.

Hisatugo, E., & Marçal Júnior, O. (2007). Coleta seletiva e reciclagem como instrumentos para conservação ambiental: um estudo de caso em Uberlândia, MG. *Sociedade & Natureza*, 19(2), 205-216.

Houaiss, A., Villar, M., & Franco, F. M. de M. (2009). *Dicionário Houaiss da Língua Portuguesa*. Instituto Antonio Houaiss de Lexicografia.

Institute for Local Self-Reliance. (1997). *Waste to wealth: Recycling means business*. Institute for Local Self-Reliance.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2023). *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2022*. IBGE.

IPCC. (2019). 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 5: Waste. Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC. s.d. *Climate change 2021: The physical science basis*. Intergovernmental Panel on Climate Change.

Iyamu, H. O., Anda, M., & Ho, G. (2020). A review of municipal solid waste management in the BRIC and high-income countries: A thematic framework for low-income countries. *Habitat International*, 95, 102097.

Jacobi, P. R., & Besen, G. R. (2011). Gestão de resíduos sólidos em São Paulo: desafios da sustentabilidade. *Estudos avançados*, 25(71), 135-158.

Johnke, B. (2002). Emissions from waste incineration. In *Good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories* (pp. 455–468). Intergovernmental Panel on Climate Change.

Jucá, J. F., Lima, J., Lima, D., Mariano, M., Lucena, L. & Firmo, A. (2014). *Análise das Diversas Tecnologias de Tratamento e Disposição Final de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil, Europa, Estados Unidos e Japão*. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. Fundação de Apoio ao Desenvolvimento da Universidade Federal de Pernambuco.

Junqueira, H. S., Medeiros, D. L., & Cohim, E. (2022). Gerenciamento de resíduos sólidos urbanos de Feira de Santana: demanda energética e pegada de carbono. *Engenharia Sanitaria E Ambiental*, 27(1), 125-139.

Karim, M. A., & Wetterhan, J. T. (2020). A comparative study of solid waste management in the United States, Europe and Asia. *Annals of civil and environmental Engineering*, 4(1), 003-011.

Kaza, S., Yao, L. C., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What a Waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050*. World Bank.

Khan, M. R., Ullah, K., Ali, Z., Rak, E., Pamucar, D., & Shang, Y. (2025). The MCDM approach using preference ranking organization method for enrichment evaluation (PROMETHEE) for intuitionistic fuzzy sets with AHP-based weight information. *International Journal of Fuzzy Systems*. Advance online publication.

Kiehl, E. J. (1998). *Manual de compostagem: maturação e qualidade do composto*. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.

Lima, J. D. D., Jucá, J. F. T., Reichert, G. A., & Firmo, A. L. B. (2014). Uso de modelos de apoio à decisão para análise de alternativas tecnológicas de tratamento de resíduos sólidos urbanos na Região Sul do Brasil. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 19, 33-42.

King, M. G., & Gutberlet, J. (2013). Contribution of cooperative sector recycling to greenhouse gas emissions reduction: A case study of Ribeirão Pires, Brazil. *Waste Management*, 33, 2771-2780.

Lins, L., Mayer, B., Frare, L. M., & Edwiges, T. (2022). Methane emissions from a landfill in Southern Brazil: Comparison between field measurements and first-order decay models. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(34), 51820–51832.

Lins, E. A. M., Pereira, I. M. de S. N., Arruda, Y. L. de A., Telles, P. V. de M., Silva, C. B. L. da, Marinho, M. E., Costa, I. V. de L., & Pedrosa, D. L. de O. (2025). Uso da compostagem no tratamento de resíduos sólidos orgânicos. *Caderno Pedagógico*, 22(11), e19619.

Lombardi, L., Carnevale, E., & Corti, A. (2015). A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste. *Waste Management*, 37, 26-44.

Luiz, B. V. & Suski, C. A. (2021). Avaliação da geração de gases de efeito estufa em diferentes tratamentos de resíduos domiciliares – Estudo de caso em Florianópolis – Santa Catarina. *Revista Metodologias e Aprendizado*, 4.

Magalhães, G. V. V. (2018). *Avaliação da biodigestão anaeróbia de resíduos orgânicos: ensaios de potencial bioquímico de metano (BMP) e projeto piloto de um biodigestor em escala real*. [Tese de doutorado, Universidade Federal do Ceará].

Maiello, A., Britto, A. L. N. D. P., & Valle, T. F. (2018). Implementação da política nacional de resíduos sólidos. *Revista de Administração Pública*, 52, 24-51.

Maciel, F. J., & Jucá, J. F. T. (2011). Evaluation of landfill gas production and emissions in a MSW large-scale experimental cell in Brazil. *Waste Management*, 31(5), 966-977.

Maria, C., Góis, J., & Leitão, A. (2020). Challenges and perspectives of greenhouse gases emissions from municipal solid waste management in Angola. *Energy Reports*, 6(1), 364-369.

Massuga, F., Doliveira, S. L. D., Soares, S., & Parlow, M. S. (2023). A gestão municipal dos resíduos sólidos urbanos em um município da região sudeste do estado do Paraná: implicações para a sustentabilidade. *REUNIR Revista De Administração Contabilidade E Sustentabilidade*, 13(1), 149–170.

Mattei, G., & Escosteguy, P. A. V. (2007). Gravimetric composition of solid waste landfill. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 12, 247-251.

Ministério do Meio Ambiente (Brasil). (2024). *Relatório de Situação da Implementação da PNRS*. MMA.

Ministério das Cidades. (2023). *28º Diagnóstico do manejo de resíduos sólidos urbanos: Ano de referência 2022*. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. SNIS.

Mmerek, D., Baldwin, A., & Li, B. (2016). A comparative analysis of solid waste management in developed, developing and lesser developed countries. *Environmental technology reviews*, 5(1), 120-141.

Müller, L. N. P. E. S., Arruda, J. B. F., Alcantara, R. L. C., & Pereira, R. L. (2021). Uma análise multicritério de alternativas para o tratamento de resíduos sólidos urbanos do município de Juazeiro do Norte no Ceará. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 26(1), 159-170.

Morais, L. N. L. de, Bezerra, J. M., & Rêgo, A. T. A. do. (2022). Estimativa de produção de biogás e potencial energético dos resíduos sólidos em Pau dos Ferros (RN). *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, 15(2), 525–541.

Manfredi, S., & Christensen, T. H. (2009). Environmental assessment of solid waste landfilling technologies by means of LCA-modeling. *Waste Management*, 29(1), 32–43.

Marefat, A., Golzary, A., Bazargan, A., Nikoo, M. R., & Yoshimura, C. (2026). Economic assessment of waste-to-energy technologies for carbon emissions reduction in developing countries: An innovative methodological approach. *Energy Reports*, 15, Article 108908.

Medina-Mijangos, R., De Andrés, A., Guerrero-Garcia-Rojas, H., & Seguí-Amórtegui, L. (2021). A methodology for the technical-economic analysis of municipal solid waste systems based on social cost-benefit analysis with a valuation of externalities. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 18807–18825.

Milanez, B. (2002). Resíduos sólidos e sustentabilidade: princípios, indicadores e instrumentos de ação (Dissertação de mestrado, Universidade Federal de São Carlos).

Mujtaba, M. A., Munir, A., Imran, S., Nasir, M. K., Muhayyuddin, M. G., Javed, A., Mehmood, A., Habila, M. A., Fayaz, H., & Qazi, A. (2024). Evaluating sustainable municipal solid waste management scenarios: A multicriteria decision making approach. *Heliyon*, 10(4), Article e25788.

Município de Medianeira. (2022, 24 de novembro). *Lei nº 1109/2022: Dispõe sobre a Política de Meio Ambiente do Município e dá outras providências*. Prefeitura Municipal de Medianeira.

Município de Medianeira. (2018). *Plano municipal de saneamento básico (PMSB)*. Prefeitura Municipal de Medianeira.

Nagashima, L. A., Barros Júnior, C. D., Araújo, C. C. D., Silva, E. T. D., & Hoshika, C. (2011). Gestão integrada de resíduos sólidos urbanos – uma proposta para o município de Paranavaí, Estado do Paraná, Brasil. *Acta Scientiarum. Technology*, 33(1), 39–47.

Neiva, A. (2001). Reciclagem cresce no Brasil. *Ecologia e Desenvolvimento*, 11(96), 18–19.

Novaes, J. H., César, A. da S., & Mozer, T. S. (2023). Indicadores de sustentabilidade para a gestão de resíduos sólidos urbanos. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, 12, 1-21.

Oliveira, M. F. dos S., Santos, F. S. dos, Borba, P. F. de S., & Veneu, D. M. (2021). Indicadores de sustentabilidade para a gestão de resíduos sólidos urbanos: Um estudo de caso para o município de Japeri – RJ. *Brazilian Journal of Development*, 7(10), 98856-98874.

Oliveira, J. P., Pessoa, F. L. P., Mehl, A., Alves, F. C., & Secchi, A. R. (2024). *Sustainability indicators to MSW treatment assessment: The Rio de Janeiro case study* [Preprint]. Preprints.org.

Organization for Economic Co-operation and Development. (2022). *Circular Economy in Cities and Regions: Progress and Opportunities*. OECD Publishing.

Organization for Economic Co-operation and Development. (2019). *Waste Management and the Circular Economy in Selected OECD Countries: Evidence from Environmental Performance Reviews*, OECD Environmental Performance Reviews, OECD Publishing.

Paraná. (2021). *Lei Estadual nº 20.607/2021 – Plano Estadual de Resíduos Sólidos (PERS/PR)*. Curitiba: Diário Oficial do Estado do Paraná.

Paraná. (2021). *Resolução Conjunta SEDEST/IAT nº 20/2021 – Plataforma Contabilizando Resíduos*. Curitiba: SEDEST.

Paraná. (2023). *Lei Estadual nº 21.388/2023 – Programa Paraná Resíduos*. Curitiba: Assembleia Legislativa do Paraná.

Paraná. (1999, 22 de janeiro). *Lei nº 12.493, de 22 de janeiro de 1999. Estabelece normas para o gerenciamento de resíduos sólidos, com vistas à prevenção da poluição e à proteção do meio ambiente e da saúde pública*. Assembleia Legislativa do Estado do Paraná.

Paraná (2024, 17 de dezembro). *População paranaense ficará concentrada em grandes centros urbanos até 2050, diz IPARDES*. Agência Estadual de Notícias.

Paes, M. X., Gianelli, B. F., Kulay, L. A., Medeiros, G. A., & Mancini, S. D. (2017). *CO2ZW Brasil: Ferramenta de pegada de carbono para a gestão de resíduos sólidos urbanos*. In I Simpósio Nacional de Gestão e Engenharia Urbana (SINGEORB 2017), 1979-1927.

Pereira Neto, J. T. (1989). Conceitos modernos de compostagem. *Engenharia Sanitária*, 28(3), 104-109.

Pheakdey, D. V., Quan, N. V., & Xuan, T. D. (2023). Economic and Environmental Benefits of Energy Recovery from Municipal Solid Waste in Phnom Penh Municipality, Cambodia. *Energies*, 16(7), 3234.

Pheakdey, D. V.; Noudeng, V., & Xuan, T. D. (2023). Landfill Biogas Recovery and Its Contribution to Greenhouse Gas Mitigation. *Energies*, 16, 4689.

Piñas, J. A. V., Venturini, O. J., Lora, E. E. S., Oliveira, M. A. de, & Roalcaba, O. D. C. (2016). Aterros sanitários para geração de energia elétrica a partir da produção de biogás no Brasil: comparação dos modelos LandGEM (EPA) e Biogás (CETESB). *Revista Brasileira de Estudos de População*, 33(1), 175-188.

Pires, A., Martinho, G., & Chang, N. B. (2011). Solid waste management in European countries: A review of systems analysis techniques. *Journal of environmental management*, 92(4), 1033-1050.

Prefeitura Municipal de Medianeira. (2021). *Plano Diretor Municipal de Medianeira 2021*, Revisão do Plano Diretor Participativo Urbano e Rural 2007. Secretaria do Estado do Desenvolvimento Urbano e de Obras Públicas, Serviço Social Autônomo PARANACIDADE.

Polaz, C. N. M., & Teixeira, B. A. N. (2009). Indicadores de sustentabilidade para a gestão municipal de resíduos sólidos urbanos: um estudo para São Carlos (SP). *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 14 (3), 411-420.

Rafiq, A., Rasheed, A., Arslan, C., Tallat, U., & Siddique, M. (2018). Estimation of greenhouse gas emissions from Muhammad wala open dumping site of Faisalabad, Pakistan. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 2(1), 45–50.

Rech, A. L. (2008). Avaliação de processo alternativo de biodigestão para tratamento de resíduos sólidos orgânicos domésticos. [Dissertação de mestrado, Universidade Estadual do Oeste do Paraná]. TEDE/UNIOESTE.

Rencelj, L. D. S. & Negreiros, A. C. S. V. (2025). Revolução sustentável: como a automação pode transformar a indústria de reciclagem rumo à sustentabilidade ambiental. Universidade Federal Rural do Semiárido.

Rouhi, K., Shafiepour Motlagh, M., & Dalir, F. (2023). Developing a carbon footprint model and environmental impact analysis of municipal solid waste transportation: A case study of Tehran, Iran. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 73(12), 890–901.

Rutkowski, J. E., & Rutkowski, E. W. (2015). Expanding worldwide urban solid waste recycling: The Brazilian social technology in waste pickers inclusion. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 33(12), 1084–1093.

Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation*. McGraw-Hill International Book Co.

Santiago, L. S., & Dias, S. M. F. (2012). Matriz de indicadores de sustentabilidade para a gestão de resíduos sólidos urbanos. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 17(2), 203–212.

Santos, J. J. dos. (2022). *Estudo de caso sobre compostagem na gestão do lixo urbano doméstico na cidade de Campinas* [Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade de São Paulo].

Sarsby, R. W. (2000). *Environmental Geotechnics*. Thomas Telford.

Schramm, J. S. (2015). *Análise preliminar do potencial energético e do processo de incineração como alternativa na gestão de resíduos sólidos urbanos em Florianópolis*. [Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Santa Catarina].

Silva, C. M. A., Ferreira, A. B. S., de Oliveira Lima, L. A., Luz, T. R. S. A., da Silva, M. M., Passos, C. R. S. & Lima, J. N. M. (2024). Política nacional de resíduos sólidos (Lei 12.305/2010): desafios na implementação da logística reversa de medicamentos no Brasil. *Cuadernos de Educación y Desarrollo-QUALIS A4*, 16(5), e4265-e4265.

Singh, J., Laurenti, R., Sinha, R., & Frostell, B. (2014). Progress and challenges to the global waste management system. *Waste Management & Research*, 32(9), 800-812.

Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos. (2021). *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2021*. MMA.

Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos. (2021). *Relatório anual 2021*. Ministério do Meio Ambiente.

Souza, C. (1997). Federalismo, descentralização e reforma constitucional em contextos de desenvolvimento regional desigual. *Organizações & Sociedade*, 4(9), 127-148.

Souza, L. B. G. de. (2015). *Quantificação das emissões de biogás em um aterro sanitário localizado na região Noroeste do Estado do Paraná*. [Dissertação de mestrado, Centro Universitário de Maringá].

Santos, E., Fonseca, F., Santiago, A., & Rodrigues, D. (2024). Sustainability indicators model applied to waste management in Brazil using the DPSIR framework. *Sustainability*, 16(5), 2192.

Smith, A., Brown, K., Ogilvie, S., Rushton, K., & Bates, J. (2001). Waste management options and climate change. *Final report ED21158R4*, 1, 205.

Soesanto, Q. M. B., Utomo, L. R., Rachman, I., & Matsumoto, T. (2021). Life cycle assessment and cost benefit analysis of municipal waste management strategies. *Journal of Environmental Science and Sustainable Development*, 4(1), 69–96.

Tchobanoglous, G. T., Theisen, H., & Vigil, S. A. (1993). *Solid waste: Engineering principle and management issues*. McGraw-Hill Book Company.

Teixeira da Silva, E. (2007). Tratamento de lixo domiciliar e sua aplicação na recuperação de áreas degradadas. *Revista Acadêmica Ciência Animal*, 5(2), 197–209.

Thode Filho, S., Machado, C. J. S., Vilani, R. M., Paiva, J. L., & da Costa Marques, M. R. (2015). A Logística Reversa e a Política Nacional de Resíduos Sólidos: desafios para a realidade brasileira. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, 529-538.

Themelis, N. J., Barriga, M. E. D., Estevez, P., & Velasco, M. G. (2013). *Guidebook for the application of waste to energy technologies in Latin America and the Caribbean*. Earth Engineering Center, Columbia University.

Tribunal de Contas da União. (2022). *Auditoria operacional: Política Nacional de Resíduos Sólidos*. TCU.

Tsutiya, M. T. (2006). *Abastecimento de água*. (3. Ed). Escola Politécnica da USP. <https://pt.scribd.com/doc/127473795/Abastecimento-de-Agua-Tsutiya>

União Europeia (2018). Diretiva (UE) 2018/851 do Parlamento Europeu e do Conselho de 30 de maio de 2018 que altera a Diretiva 2008/98/CE relativa aos resíduos. *Jornal Oficial da União Europeia*, L 150, 109–140.

União Europeia. (2008). *Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste (Waste Framework Directive)*. *Official Journal of the European Union*, L312, 3–30.

United Nations Environment Programme. (2021). *Global Waste Management Outlook 2 – Pathways to Sustainable Waste Management*. Nairobi: UNEP.

United Nations Environment Programme. (2024). *Waste-Wise Cities Tool*. *Waste Management & Research*, 42(1), 15-28.

U.S. Environmental Protection Agency (2023). *Quantifying methane emissions from landfilled food waste* (EPA-600-R-23-064). Office of Research and Development.

Valente, B. S., Xavier, E. G., Morselli, T. B. T. G. A., Jahnke, D. S., Brum Jr, B., Cabrera, B. R., Moraes, P. de O., & Lopes, D. C. N. (2009). Fatores que afetam o

desenvolvimento da compostagem de resíduos orgânicos. *Archivos de zootecnia*, 58(224), 59-85.

Veolia Portugal. (s.d.). *Lipor II — Valorização energética de resíduos urbanos*. Veolia Portugal.

World Bank. (2023). *Sustainable Municipal Waste Services in Developing Economies*. DC: World Bank.

World Bank. (2024). *What a Waste 2.5: Municipal Waste Metrics*. World Bank.

World Resources Institute, & World Business Council for Sustainable Development. (2004). *The greenhouse gas protocol: A corporate accounting and reporting standard* (Rev. ed.).

Wilson, D. C., Rodic-Wiersma, L., Cowing, M. J., Velis, C. A., Whiteman, A. D., Scheinberg, A., Vilches, R., Masterson, D., Stretz, J., & Oelz, B. (2015). ‘Wasteaware’ benchmark indicators for integrated sustainable waste management in cities. *Waste Management*, 35, 329–342.

Wan, Y. K., Ng, R. T. L., Ng, D. K. S., & Tan, R. R. (2015). Material flow cost accounting (MFCA)-based approach for prioritisation of waste recovery. *Journal of Cleaner Production*, 107, 602–614.

Yap, H. Y., & Nixon, J. D. (2015). A multi-criteria analysis of options for energy recovery from municipal solid waste in India and the UK. *Waste management*, 46, 265-277.

Yapo, S. L. H., Kouadio, G. K. Assamoi, E. M., Yoboue, J.B., & Keita, S. (2019). Estimation of Methane Emissions Released from a Municipal Solid Waste Landfill Site through a Modelling Approach: A Case Study of Akouédo Landfill, Abidjan (Côte d’Ivoire). *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 8(5), 1587-1993.

Zhang, D., Keat, T. S., & Gersberg, R. M. (2010). A comparison of municipal solid waste management in Berlin and Singapore. *Waste management*, 30(5), 921-933.

Zhao, W., Huppel, G., & van der Voet, E. (2011). Eco-efficiency for greenhouse gas emissions mitigation of municipal solid waste management: A case study of Tianjin, China. *Waste Management*, 31(6), 1407–1415.

APÊNDICES

Tabela A.1 – Emissões totais anuais de gases de efeito estufa nos cenários avaliados, entre 2006 e 2050.

Year	Cenário Base	Desvio Orgânicos - Compostagem (C1)	Total de Emissões (tCO ₂ e)	Expansão da reciclagem ASSA/MA (C3)	Cenário Integrado - Economia circular (C4)
2006	9479,55				9479,55
2007	10106,28	10106,28	10106,28	10106,28	10106,28
2008	10674,54	10674,54	10674,54	10674,54	10674,54
2009	11204,97	11204,97	11204,97	11204,97	11204,97
2010	11711,75	11711,75	11711,75	11711,75	11711,75
2011	12204,66	12204,66	12204,66	12204,66	12204,66
2012	12690,53	12690,53	12690,53	12690,53	12690,53
2013	13174,22	13174,22	13174,22	13174,22	13174,22
2014	13659,22	13659,22	13659,22	13659,22	13659,22
2015	14424,70	14424,70	14424,70	14424,70	14424,70
2016	14642,87	14642,87	14642,87	14642,87	14642,87
2017	15145,03	15145,03	15145,03	15145,03	15145,03
2018	15655,84	15655,84	15655,84	15655,84	15655,84
2019	16176,36	16176,36	16176,36	16176,36	16176,36
2020	16707,51	16707,51	16707,51	16707,51	16707,51
2021	17250,10	17250,10	17250,10	17250,10	17250,10
2022	17804,91	17804,91	17804,91	17804,91	17804,91
2023	18372,65	18372,65	18372,65	18372,65	18372,65
2024	18954,01	18954,01	18954,01	18954,01	18954,01
2025	19550,34	19550,34	19550,34	19550,34	19550,34
2026	20163,63	20163,63	20163,63	20163,63	20163,63
2027	20794,06	20572,79	20796,79	20730,96	20512,42
2028	21441,95	19919,99	8978,52	21289,45	8188,38
2029	22107,75	19664,61	9255,87	21869,11	8097,46
2030	22792,00	19681,87	9540,98	22470,14	8106,62
2031	23495,26	19888,16	9634,10	23092,85	8185,73
2032	24218,14	20227,46	10135,48	23737,57	8314,58
2033	24961,32	20662,32	10445,39	24404,71	8479,65
2034	25725,44	21167,69	10764,11	25094,69	8671,86
2035	19902,91	16709,12	8711,98	19307,24	7116,39
2036	15883,96	13607,92	7310,75	15320,77	6050,23
2037	13087,16	11428,69	6351,04	12554,03	5316,56
2038	11212,51	9878,44	5692,09	10616,16	4809,90
2039	9723,79	8759,62	5238,14	9244,09	4459,22
2040	8716,58	7939,65	4928,34	8260,56	4216,62
2041	7980,13	7327,91	4716,61	7545,91	4049,75
2042	7433,37	6863,57	4574,79	7019,22	3836,71
2043	7021,35	6505,13	4483,14	6625,62	3662,61
2044	6706,60	6224,25	4428,22	6327,76	3617,33
2045	6463,51	6001,43	4394,76	5925,19	3787,61
2046	6274,45	5823,20	4384,86	5790,78	3795,09
2047	6127,20	5680,15	4405,57		
2048	6013,21	5565,64	4430,26	5612,17	3842,79
2049	5926,40	5474,90	4466,71		
2050	5862,45	5404,49	4513,41	5557,70	3880,21

Nota: A tabela apresenta a evolução temporal anual das emissões totais de GEE, expressas em tCO₂eq, para o cenário base e os cenários alternativos avaliados no período de 2006 a 2050.