

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**LARISSA MARIA SILVEIRA PEREIRA**

**POTENCIAL DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DO BIOGÁS GERADO EM  
ATERROS SANITÁRIOS DE PEQUENO E MÉDIO PORTE NA REGIÃO OESTE  
DO PARANÁ**

**MEDIANEIRA**

**2023**

**LARISSA MARIA SILVEIRA PEREIRA**

**POTENCIAL DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DO BIOGÁS GERADO EM  
ATERROS SANITÁRIOS DE PEQUENO E MÉDIO PORTE NA REGIÃO OESTE  
DO PARANÁ**

**ENERGY RECOVERY POTENTIAL OF BIOGAS GENERATED IN SMALL AND  
MEDIUM SIZE LANDFILLS IN THE WEST REGION OF PARANÁ**

Projeto de Trabalho de Conclusão de Curso  
Engenharia Ambiental apresentada como requisito  
para obtenção do título de Bacharel em Engenharia  
Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do  
Paraná (UTFPR).

Orientador: Thiago Edwiges.

**MEDIANEIRA**

**2023**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**LARISSA MARIA SILVEIRA PEREIRA**

**POTENCIAL DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DO BIOGÁS GERADO EM  
ATERROS SANITÁRIOS DE PEQUENO E MÉDIO PORTE NA REGIÃO OESTE  
DO PARANÁ**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Ambiental da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 19/06/2023

---

Thiago Edwiges  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Medianeira

---

Eduardo Ziglioli  
Mestrado  
Prefeitura Municipal de Medianeira – PR

---

Evandro André Konopatzki  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Medianeira

**MEDIANEIRA**

**2023**

Dedico este trabalho aos meus pais, Marilda e Sivaldo, e ao meu irmão, Felipe, como apreço por todo incentivo e apoio.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por me honrar com força e sabedoria durante todos os anos da minha graduação, por me atender nas dificuldades e por me proporcionar momentos de alegria.

À toda minha família por serem minha base e refúgio, em especial aos meus pais, Marilda Aparecida Silveira Pereira e Sivaldo José Pereira, pelo investimento na minha educação e incentivo constante, além de acreditarem no meu potencial e fazerem parte das minhas conquistas.

Ao meu irmão, Felipe Silveira Pereira, e aos meus sobrinhos, Julia Mota Pereira e Miguel Mota Pereira, que com o apoio e amor incondicional me motivaram a seguir em minha jornada.

Aos meus padrinhos de batismo, Geralda Silva e Alberto Silva, que sempre se fizeram presente e me colocaram em suas orações.

Ao Diego Augusto Picolli, pelo companheirismo, palavras e gestos encorajadores que impulsionam meu crescimento e sucesso profissional.

Aos meus amigos, em especial Vitória Sacomori e Renato Gracioli, pelos momentos de alegria, memórias preciosas e por serem verdadeiros em cada instante.

A todos professores da graduação pelos ensinamentos e contribuição para minha formação.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Thiago Edwiges, pelo conhecimento e pelas experiências compartilhadas, incentivando-me a alcançar meu potencial máximo.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho, à quem conheci e convivi durante minha graduação e agregou de alguma forma em minha formação.

*“Com alguma paciência tudo se alcançará”.*

(Machado de Assis, 1874).

## RESUMO

O gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos (RSU) tem se tornado uma tarefa desafiadora para os municípios devido ao crescimento exponencial da população e desenvolvimento da economia. No Brasil, a disposição final em aterros sanitários é habitualmente aplicada, gerando poluentes gasosos e líquidos pela degradação da fração orgânica dos RSU. Por outro lado, essa fração orgânica representa uma biomassa com potencial de aproveitamento energético através da produção de biogás gerado pela degradação da matéria orgânica em aterros. Com isso, este estudo buscou realizar diferentes cenários com municípios a uma distância de até 70 km de Medianeira – PR (local sede) a fim de avaliar o potencial teórico de biogás e a viabilidade da implantação de um projeto de recuperação energética. A metodologia é baseada em cálculos para projeção de crescimento populacional e de RSU e utilização do software LandGEM desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (U.S Environmental Protection Agency's-EPA) para estimar o potencial teórico do biogás durante a vida útil de 20 anos do aterro sanitário. Além disso, foram realizados cálculos para conversão do gás em energia e para estimar o recurso financeiro do projeto. O cenário 1, composto apenas por Medianeira, obteve produção máxima de 2.818.489 m<sup>3</sup> de biogás em 2043, ano seguinte ao encerramento das atividades do aterro sanitário. Já o cenário 2, composto por Medianeira e municípios a uma distância de 20 km do local sede da pesquisa, obteve 5.973.239 m<sup>3</sup> de biogás no mesmo ano. Quanto ao cenário 3 e 4, formados por municípios a distâncias de 40 e 70 km, respectivamente, apresentaram volume máximo de 9.494.077 e 12.174.222 m<sup>3</sup> de biogás na mesma ordem. O volume acumulado de CH<sub>4</sub> no cenário 1 correspondeu a 1.409.245 m<sup>3</sup>, enquanto o cenário 2 obteve 2.687.958 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub>. Já o cenário 3 e 4 apresentaram volume máximo acumulado de metano de 4.272.335 e 5.478.400 m<sup>3</sup>. Quanto à energia gerada, o cenário 1 possui potencial de bastecer 252 habitantes no ano de produção máxima, o que equivale a 2.322 MWh e gera recurso financeiro máximo de R\$ 1,5 mi. O cenário 2 abastece até 6.203 habitantes com 4.429 MWh, o que corresponde a um recurso financeiro de R\$ 3,2 mi. Já o cenário 3 atinge potencial energético de 7.039 MWh e abastece até 9.859 habitantes, além de corresponder a R\$ 5,1 mi de recurso financeiro. O quarto e último cenário com potencial energético de 9.027 MWh abastece até 12.642 habitantes e possui recurso financeiro correspondente a R\$ 6,7 mi. Com isso, conclui-se que o cenário 2 se faz o mais viável economicamente, pois gera retorno energético duas vezes mais que o município de Medianeira– PR incluindo cidades que estão mais próximas do local sede. Por fim, estudos de viabilidade técnica, economia e ambiental (EVTEA) poderão ser realizados com o intuito de prever os custos e os benefícios da implantação de um sistema de captação de gás em um aterro compartilhado com base no cenário 2.

**Palavras-chave:** aterro sanitário; biogás; resíduos sólidos urbanos; energia renovável.

## ABSTRACT

The management of municipal solid waste (MSW) has become a challenging task for municipalities due to exponential population growth and economic development. In Brazil, the final disposal in landfills is usually applied, generating gaseous and liquid pollutants by the degradation of the organic fraction of MSW. On the other hand, this organic fraction represents a biomass with potential for energy use through the production of biogas generated by the degradation of organic matter in landfills. With this, this study aimed to realize different scenarios with municipalities at a distance of up to 70 km from Medianeira - PR (host site) in order to evaluate the theoretical potential of biogas and the feasibility of implementing an energy recovery project. The methodology is based on calculations for projection of population growth and MSW and use of the LandGEM software developed by the U.S. Environmental Protection Agency's (EPA) to estimate the theoretical potential of biogas during the 20 year lifetime of the landfill. In addition, calculations were performed to convert the gas to energy and to estimate the financial resource of the project. Scenario 1, composed only of Medianeira, obtained a maximum production of 2,818,489 m<sup>3</sup> of biogas in 2043, the year following the closure of the landfill. Scenario 2, on the other hand, composed of Medianeira and municipalities at a distance of 20 km from the research site, obtained 5,973,239 m<sup>3</sup> of biogas in the same year. As for scenario 3 and 4, formed by municipalities at distances of 40 and 70 km, respectively, they presented a maximum volume of 9,494,077 and 12,174,222 m<sup>3</sup> of biogas in the same order. The accumulated volume of CH<sub>4</sub> in scenario 1 was 1,409,245 m<sup>3</sup>, while scenario 2 had 2,687,958 m<sup>3</sup> of CH<sub>4</sub>. Scenarios 3 and 4 had maximum methane accumulated volumes of 4,272,335 and 5,478,400 m<sup>3</sup>. As for the energy generated, scenario 1 has the potential to supply 252 inhabitants in the year of maximum production, which is equivalent to 2.322 MWh and generates a maximum financial resource of R\$ 1.5 mi. Scenario 2 supplies up to 6,203 inhabitants with 4,429 MWh, which corresponds to a financial resource of R\$ 3.2 mi. Scenario 3 reaches an energy potential of 7,039 MWh and supplies up to 9,859 inhabitants, corresponding to a financial resource of R\$ 5.1 million. The fourth and last scenario with an energy potential of 9,027 MWh supplies up to 12,642 inhabitants and has a financial resource of R\$ 6.7 million. Thus, it is concluded that the scenario 2 is the most economically feasible, because it generates energy return twice as much as the city of Medianeira- PR including cities that are closer to the headquarters location. Finally, technical, economic and environmental feasibility studies (EVTEA) can be conducted in order to predict the costs and benefits of implementing a gas capture system in a shared landfill based on scenario 2.

**Keywords:** landfills; biogas; municipal solid waste; renewable energy.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Geração de RSU nas regiões brasileiras .....	20
Figura 2 - Disposição final de RSU no Brasil .....	22
Figura 3 - Corte da seção de um aterro sanitário .....	23
Figura 4 – Esquema de coleta do biogás e conversão energética .....	23
Figura 5 - Fases da degradação biológica de RSU em aterros sanitários .....	24
Figura 6 - Sistema de tratamento de gás por adsorção .....	28
Figura 7 - Impermeabilização da camada final do aterro .....	32
Figura 8 - Captação de gases: (a) com flares (b) para aproveitamento energético .....	33
Figura 9 - Elementos de um poço vertical de captação de gás .....	34
Figura 10 - Elementos de um poço horizontal de captação de gás .....	35
Figura 11 - Motor de combustão interna .....	36
Figura 12 - (a) Esquema do processo e (b) seção transversal de microturbinas .....	38
Figura 13 - Dados do usuário no software LandGEM .....	39
Figura 14 - Dados do usuário no software IPCC .....	40
Figura 15 - Localização do município de Medianeira– PR .....	41
Figura 16 - Localização do aterro sanitário de Medianeira– PR .....	43
Figura 17 - Massa de resíduos em ton/ano no software LandGEM .....	47
Figura 18 - Tarifas aplicadas ao grupo B pela COPEL .....	48
Figura 19 - Comparativo do volume acumulado de RSU pelos próximos 20 anos .....	51
Figura 20 - Localização dos municípios integrantes do cenário 2 .....	52
Figura 21 - Localização dos municípios integrantes do cenário 3 .....	53
Figura 22 - Localização dos municípios integrantes do cenário 4 .....	55
Figura 23 - Volume de biogás em $m^3.ano^{-1}$ .....	57
Figura 24 - Volume de $CH_4$ em $m^3.ano^{-1}$ .....	58
Figura 25 - Volume acumulado de biogás em $m^3.ano^{-1}$ .....	60
Figura 26 - Volume acumulado de $CH_4$ em $m^3.ano^{-1}$ .....	61
Figura 27 - Eletricidade em $KWh.ano^{-1}$ por motor de combustão interna .....	62
Figura 28 - Recurso financeiro do biogás em $R\$/ano$ .....	63

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1- Composição típica do biogás</b> .....	26
<b>Quadro 2- Cenários com os municípios integrantes</b> .....	42
<b>Quadro 3- Massa de resíduos em ton/ano</b> .....	59

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1- Municípios integrantes do cenário 2.....</b>	<b>52</b>
<b>Tabela 2- Municípios integrantes do cenário 3.....</b>	<b>54</b>
<b>Tabela 3- Municípios integrantes do cenário 4.....</b>	<b>56</b>

## LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
APHA	American Public Health Association
CI	Combustão Interna
COT	Carbono Orgânico Total
DA	Digestão Anaeróbia
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPA	Environmental Protection Agency
GPC	Geração Per Capita
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IBPG	International Best Practice Guide
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LandGEM	Landfill Gas Emissions Model
NBR	Normas Brasileiras
NTK	Nitrogênio Total Kjeldahl
P.A.	Progressão Aritmética
P.G.	Progressão Geométrica
PIB	Produto Interno Bruto
PRAD	Projeto de Recuperação de Área Degradada
PMSB	Plano Municipal de Saneamento Básico
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos

SINIR

Sistema Nacional de Informações Sobre a Gestão dos Resíduos  
Sólidos

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	16
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	18
<b>2.1 Objetivo Geral</b> .....	18
<b>2.2 Objetivos Específicos</b> .....	18
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	19
<b>3.1 Resíduos Sólidos Urbanos- RSU</b> .....	19
3.1.1 Geração, coleta e transporte de RSU .....	20
3.1.2 Disposição final de RSU em aterros sanitários .....	21
3.1.3 Aterro sanitário .....	22
<b>3.2 Decomposição dos RSU</b> .....	24
3.2.1 Biogás gerado em aterro sanitário .....	26
<b>3.3 Fatores de influência da DA em aterros sanitários</b> .....	28
<b>3.4 Coleta de gás em aterros sanitários</b> .....	32
3.4.1 Sistema vertical de captação de gás .....	32
3.4.2 Sistema horizontal de captação de gás .....	34
3.4.3 Sistema vertical-horizontal de captação de gás .....	35
3.4.4 Sistema de compressão .....	35
<b>3.5 Conversão energética do biogás</b> .....	35
3.5.1 Motores de combustão .....	36
3.5.2 Turbinas a vapor .....	37
3.5.3 Microturbinas .....	37
<b>3.6 Modelagem da produção de biogás em aterros sanitários</b> .....	38
<b>4 METODOLOGIA</b> .....	41
<b>4.1 Local de pesquisa</b> .....	41
4.1.2 Características do Aterro Sanitário de Medianeira– PR .....	42
<b>4.2 Projeção de geração de RSU</b> .....	44
<b>4.4 Análise da modelagem de biogás</b> .....	46
<b>4.5 Estimativa preliminar do potencial energético e custos de implantação</b> .....	47
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	50
<b>5.1 Projeção de RSU ao longo do tempo</b> .....	50
<b>5.2 Municípios integrantes dos cenários</b> .....	51
<b>5.3 Projeção de geração de biogás e metano</b> .....	56
<b>5.4 Comparação de cenários</b> .....	58

<b>5.5 Estimativa preliminar do potencial energético e custos de implantação</b>	<b>.62</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>66</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento socioeconômico e o crescimento populacional levam ao aumento da produção de resíduos sólidos concentrados nos centros urbanos, cuja gestão é desafiadora e tem trazido consequências significantes para a saúde pública, conservação dos recursos naturais e do capital natural do país. A gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU) é um serviço público importante, mas a disposição inadequada desses resíduos pode trazer consequências ambientais, como poluição do solo e da água, emissões atmosféricas e disseminação de vetores.

De acordo com o Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil (ABRELPE, 2022), são geradas cerca de 81.811.506 toneladas de resíduos por ano, o equivalente a 381 kg por habitante por ano. Em paralelo ao aumento da geração de resíduos, a mesma fonte mostra que a quantidade de materiais dispostos para a coleta também cresceu, representando cerca de 76.118.317 toneladas por ano. Esse aumento possui influência direta da pandemia, período o qual o consumo em restaurantes foi substituído por refeições em ambientes residenciais tornando-se o novo foco de descarte de resíduos.

No Brasil, a disposição final de RSU em aterros sanitários é comumente aplicada, que gera compostos poluentes a partir da sua degradação (PADILHA e MESQUITA, 2022). Contudo, a fração orgânica dos RSU representam uma biomassa com potencial de aproveitamento energético e é considerada uma das principais alternativas para a diversificação da matriz energética, além de proporcionar a redução da dependência dos combustíveis fósseis (NADALETTI *et al.*, 2015). O biogás obtido por meio da degradação dos RSU em aterros sanitários na ausência de oxigênio consiste em uma mistura de gases composto principalmente por dióxido de carbono e metano e seu tratamento permite o uso por meio de energia térmica, veicular ou elétrica.

A captação do biogás por meio de canalizações na área do aterro garante o seu aproveitamento energético. Entretanto, a baixa taxa de recuperação desse composto gasoso nesses locais ocorre porque, em geral, não é um objetivo explícito do projeto do aterro. Cerca de 60% dos RSU são destinados a 700 aterros, dos quais apenas 22 deles possuem sistema de recuperação energética (RUOSO *et al.*, 2022). Além disso, a implantação de um sistema de captação de biogás e sua conversão em

energia elétrica pode não ser economicamente viável em municípios com baixa taxa populacional.

Para que o processo de recuperação energética dos RSU em aterros sanitários aconteça de forma eficiente, implementar estudos de viabilidade técnica, econômica e ambiental durante a fase de planejamento do aterro podem garantir melhor gestão do empreendimento. Ademais, o reaproveitamento energético dos resíduos garante o aumento da vida útil de aterros sanitários e a redução da emissão dos gases de efeito estufa (SINIR, s/d).

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Avaliar o potencial da recuperação energética do biogás gerado em aterros sanitários de pequeno e médio porte na região oeste do Estado do Paraná a partir do conceito de aterro consorciado.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Identificar a quantidade dos resíduos sólidos urbanos dispostos no aterro sanitário de Medianeira– PR;
- Realizar o estudo de crescimento populacional e projetar o cenário para os próximos 20 anos de municípios a uma distância de até 70 km de Medianeira– PR;
- Avaliar a estimativa da geração de gases do efeito estufa (CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>) e o potencial teórico de biogás dos resíduos a partir da metodologia desenvolvida pelo EPA;
- Avaliar o impacto da recepção de resíduos sólidos urbanos dos municípios vizinhos a Medianeira na geração de biogás e na viabilidade da implantação de um projeto de recuperação energética.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Resíduos Sólidos Urbanos- RSU

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), a NBR 100004/2004 define resíduos sólidos como:

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

Os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) consistem naqueles produzidos em regiões de aglomerados no município podendo ser de origem residencial, comercial, industrial, de estabelecimentos de saúde ou de limpeza pública. De acordo com o Panorama Nacional de Resíduos Sólidos no Brasil realizado pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, cada brasileiro gera cerca de 1,043 kg de resíduos por dia, totalizando cerca de 224 mil toneladas diárias de resíduos por habitante (ABRELPE, 2022).

Além do acréscimo na quantidade de RSU gerada, os resíduos passaram a ser compostos por elementos sintéticos e perigosos ao meio ambiente e à saúde humana devido ao avanço e incorporação da tecnologia no cotidiano (GOUVEIA, 2012). Um dos principais componentes dos RSU é o resíduo produzido pelo corpo humano e, quando descartado de forma inadequada, pode transmitir uma variedade de doenças causadas por fungos, vermes e bactérias e gerar o desequilíbrio ecossistêmico (ALMEIDA et al., 2013).

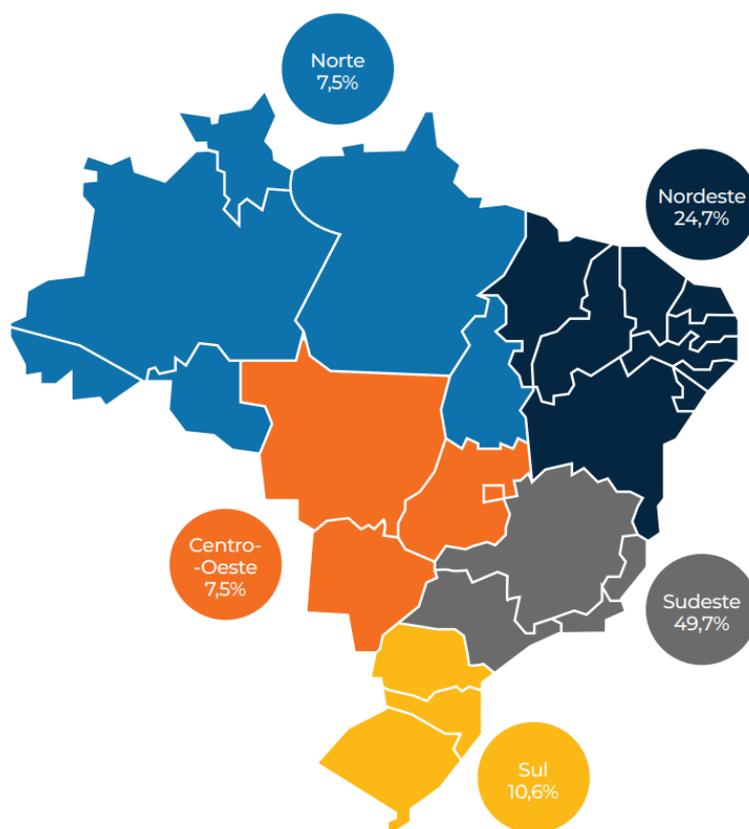
Quanto aos impactos ambientais, a disposição indevida dos RSU e a queima irregular destes ocasionam impactos a longo prazo além de contribuir negativamente para a qualidade do ar. Os fluidos tóxicos gerados pela degradação dos RSU além de infiltrarem no solo e contaminarem lençóis freáticos também causam proliferação de vetores de doenças infecciosas (SILVA et al., 2015). Uma vez que o solo é contaminado, a área entorno do local também se torna infértil e imprópria para uso, posto que alimentos produzidos nessas áreas serão contaminados e ocasionarão riscos à saúde pública.

### 3.1.1 Geração, coleta e transporte de RSU

A retomada das atividades presenciais após o período de isolamento devido a COVID-19 influenciou diretamente na quantidade de resíduo gerado, serviços de limpeza pública urbana e manejo de resíduos sólidos. Neste ano, a geração de resíduos sólidos no Brasil diminuiu cerca de 852.707 toneladas em comparação ao ano de 2021. As possíveis justificativas podem estar relacionadas com a retomada da geração de resíduos em locais pontuais como empresas, escolas, restaurantes e a menor utilização de serviços de entrega durante o período de maior isolamento social (ABRELPE, 2022).

A mesma fonte indica que a geração de resíduos nas regiões brasileiras é liderada pelo Sudeste que produziu cerca de 40.641.166 ton/ano, o equivalente a 49,7% do resíduo gerado no país. Já a região Sul é responsável por gerar cerca de 10,6% da quantidade total de resíduos no Brasil correspondendo a uma média de 0,776 kg/hab.d. A geração de RSU por região brasileira é apresentada pela Figura 1.

**Figura 1 - Geração de RSU nas regiões brasileiras**



Fonte: ABRELPE (2022).

Do total de resíduos sólidos urbanos gerado no Brasil, a taxa de coleta foi de 93% no ano de 2022, correspondente a aproximadamente 76 milhões de toneladas coletadas. De acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento–SNIS, de 399 municípios do Estado do Paraná, 317 são declarantes no sistema que reflete a uma cobertura de 98,38% de coleta indiferenciada (SINIR, 2019). Já a taxa de coleta seletiva no Brasil igualou-se a 75,1% do total de municípios no ano de 2021, sendo que as regiões Sul e Sudeste apresentaram os maiores percentuais de participação correspondendo a 91,4% e 91,2% respectivamente (ABRELPE, 2022).

Quanto à região Oeste do Paraná, formada por 50 municípios, é responsável por 1.083,14 ton/d., o que equivale a 385.596,1 ton/ano da geração total de RSU no Brasil. Do total de RSU gerado na região, apenas 289,07 ton/d. possuem coleta e tratamento adequado o que indica falha no manejo e gestão dos RSU na mesorregião (SINIR, 2019).

Já a etapa de transporte é fundamental para que o gerenciamento de RSU seja eficaz. Um transporte realizado com segurança garante que o resíduo terá o tratamento adequado e chegará a sua devida destinação ou disposição final. O transporte dos RSU é feito utilizando uma frota de caminhões e sua dimensão depende de fatores como população abrangida pelo serviço de coleta, geração per capita de RSU, distância a ser percorrida, velocidade da coleta e do meio de transporte e capacidade dos veículos (LOUZADA; GIROTTO; BRAATZ, 2022).

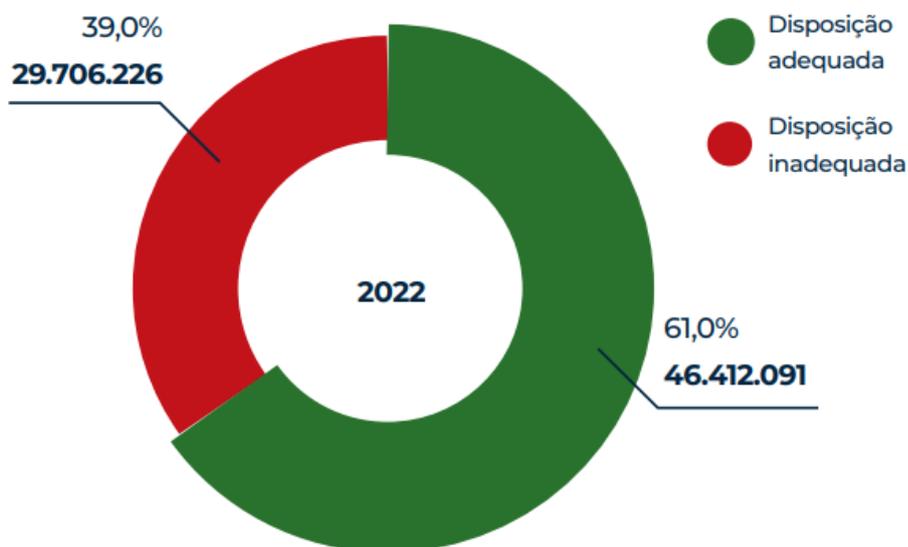
### 3.1.2 Disposição final de RSU em aterros sanitários

A disposição final dos RSU está entre as alternativas de destinação final estipulada pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) desde que as normas operacionais sejam aplicadas para evitar riscos à saúde pública e impactos dos recursos naturais. De acordo com a Lei nº 12.305 de 2010, a disposição final ambientalmente adequada é a “distribuição ordenada de rejeitos em aterros, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos” (BRASIL, 2010).

No ano de 2022, a disposição adequada de RSU no Brasil equivaleu a 61%, valor referente a 46.412.091 ton/ano em 5.570 municípios, enquanto os outros 39% dos resíduos foram dispostos de forma inadequada em lixões a céu aberto (Figura 2).

Dentre as regiões do Brasil, o Nordeste possui a maior quantidade de municípios com disposição inadequada, resultando em 1.279 municípios, enquanto a região Sul possui a menor quantidade de municípios que dispõem RSU de forma inadequada, resultando em 120 municípios (ABRELPE, 2022).

**Figura 2 - Disposição final de RSU no Brasil**

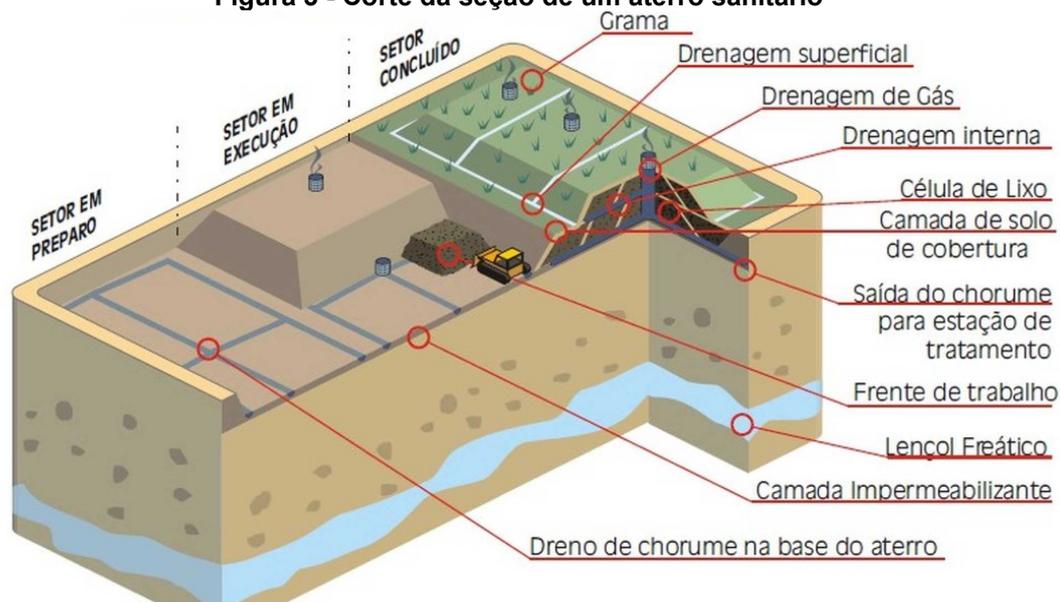


Fonte: ABRELPE (2022).

### 3.1.3 Aterro sanitário

A Norma Brasileira– NBR 8419 do ano de 1992 define aterro sanitário como: “uma técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais” (ABNT, 1992). Ademais, a Norma Brasileira mencionada anteriormente em conjunto com a NBR 13.896 de 1997, estabelecem critérios e requisitos fundamentais para projetos de aterros sanitários no Brasil. Essas exigências incluem a impermeabilização da base e das laterais da célula, drenagem de lixiviado na base do aterro, rede de drenagem subsuperficial e superficial, coleta e drenagem de gás, camada de cobertura diária e final dos RSU e tratamento dos líquidos percolados (ABNT, 1992; ABNT, 1997). A estrutura geral de um aterro sanitário é ilustrada pela Figura 3.

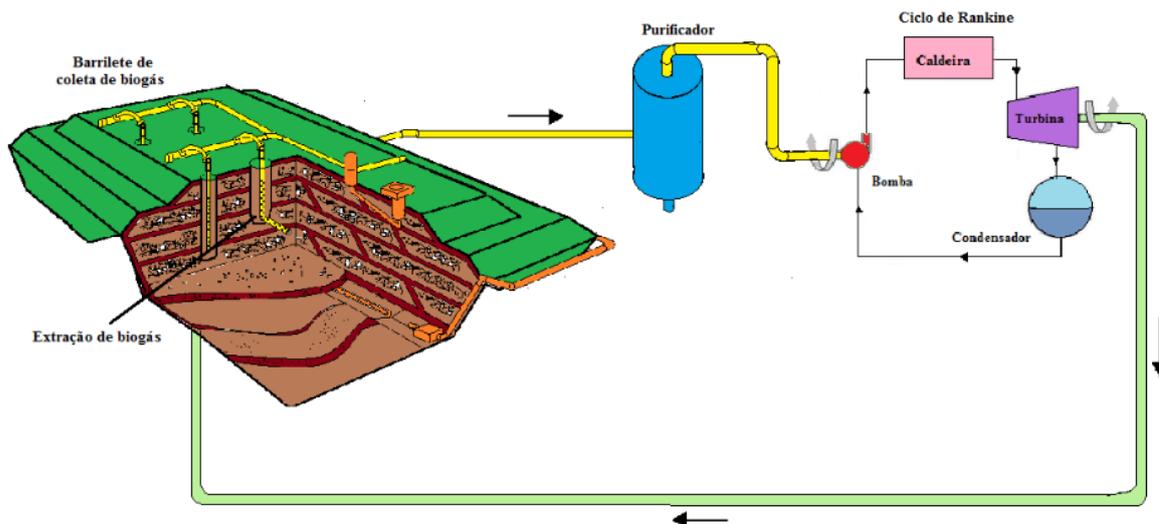
**Figura 3 - Corte da seção de um aterro sanitário**



Fonte: Portal Resíduos Sólidos (s/d).

A coleta e drenagem do gás gerado em aterros sanitários, além de contar com tubulações internas, pode abranger sistemas para conversão do biogás em energia com utilização de purificadores e aplicação do ciclo de Rankine, que consiste no processo de converter o calor obtido pela queima do biogás em energia, como demonstra o esquema da Figura 4.

**Figura 4 – Esquema de coleta do biogás e conversão energética**



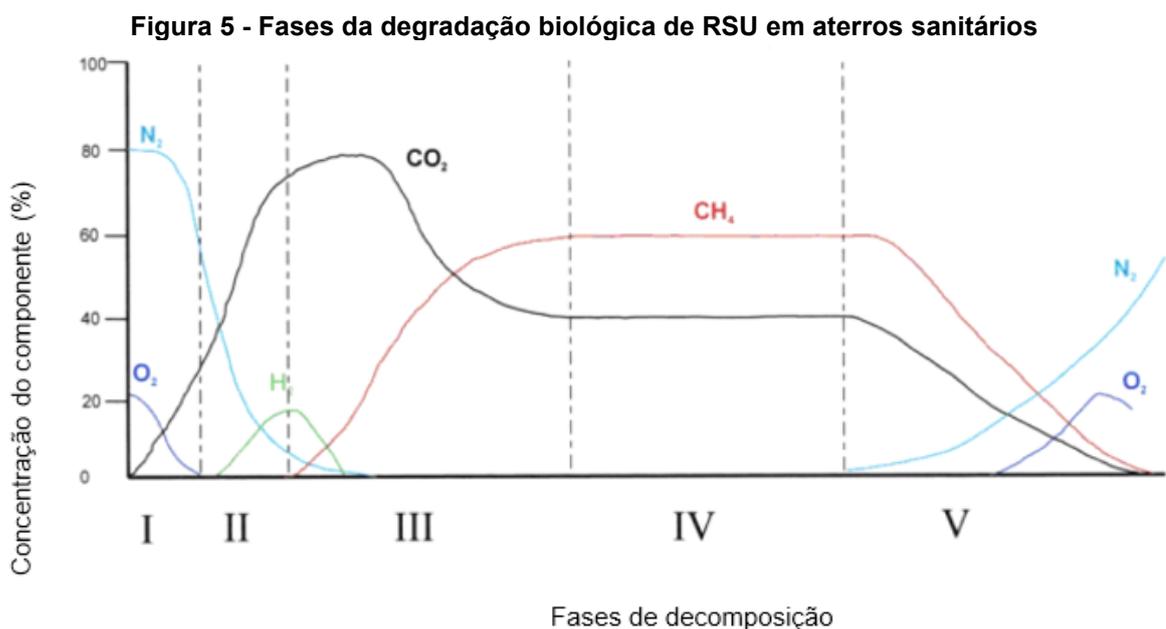
Fonte: Adaptado de OLIVEIRA (s/d).

Dentre as vantagens ambientais da implantação de um aterro sanitário, este apresenta uma solução mais econômica comparado a outros processos, além de

abranger uma maior quantidade de resíduos em uma menor área, garantir a decomposição da matéria orgânica devido as condições de operação e controlar a geração de odores e proliferação de insetos (CONDE *et al.*, 2014). De forma com que o funcionamento do aterro sanitário seja eficiente, a Lei 11.445/2007 traz que é necessário caracterizar o município e a área de implantação com estudos geológicos e geotécnicos, localização topográfica, caracterização climatológica, caracterização e uso de água e solo dentre outros procedimentos (BRASIL, 2007).

### 3.2 Decomposição dos RSU

A decomposição dos RSU em aterros sanitários possui etapas aeróbias e anaeróbias. Essas respectivas fases da degradação biológica dos RSU são representadas pela Figura 5.



Fonte: Adaptado de DUDEK *et al.* (2010).

A fase inicial (Fase I) de degradação dos RSU acontece de forma aeróbia, onde microrganismos que promovem a decomposição do material se desenvolvem na presença de oxigênio molecular. No momento em que o resíduo está sendo transportado e disposto no aterro, está sujeito a processos de decomposição que passam de condições aeróbias para anaeróbias com o tempo tendo como base o funcionamento do aterro. A fase de decomposição aeróbia é relativamente curta, pois

oxigênio presente no meio dos resíduos é rapidamente consumido, resultando em  $\text{CO}_2$  e no aumento da temperatura da célula. sendo finalizada logo após a cobertura e compactação dos resíduos e, portanto, menos significante que a fase de decomposição anaeróbia (YAASHIKAA, 2022).

Conforme a disponibilidade de oxigênio na célula é reduzida, os microrganismos anaeróbios e anaeróbios facultativos desenvolvem o processo de digestão anaeróbia (DA), que consiste na atividade metabólica desses microrganismos na ausência de oxigênio (ADEKUNLE; OKOLIE, 2015). A passagem do meio aeróbio para anaeróbio consiste na fase de transição (Fase II), momento em que se inicia a formação de gases e de lixiviados. O processo possui quatro etapas principais, sendo elas a hidrólise, acidogênese e acetogênese compreendidas pela Fase III do processo e a metanogênese referente à Fase IV. Cada etapa é realizada por diferentes grupos de microrganismos e podem requerer condições ambientais distintas (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2022).

A hidrólise consiste na primeira etapa da fase III e é realizada pela ação de exoenzimas excretadas de bactérias fermentativas hidrolíticas. Nesta fase, a estrutura complexa da matéria orgânica, como carboidratos, proteínas e lipídeos, é quebrada e transformada em materiais solúveis como açúcares, aminoácidos e ácidos graxos para que possam ser assimilados pelos microrganismos (SOARES; FEIDEN; TAVARES, 2017). Esta etapa ainda pode ser mais lenta que as demais limitando a continuação do processo, pois depende de fatores com pH, dimensão das partículas e temperatura. Além disso, no início dessa fase se inicia a produção de  $\text{CH}_4$  com teores baixos e alto teor de  $\text{CO}_2$  devido às etapas anteriores.

Na acidogênese os monômeros produzidos na hidrólise são degradados em cadeias de ácidos orgânicos de cadeia curta como ácidos butíricos, ácidos propanóicos, álcoois, hidrogênio e dióxido de carbono (ADEKUNLE; OKOLIE, 2015). 90% dos microrganismos presentes no processo de DA são representados pela população acidogênica e são, geralmente, os mesmos que efetuam o processo de hidrólise (CAVALEIRO; ALVES, 2020). A quantidade de hidrogênio formada durante o processo influencia o estado de oxidação dos produtos formados pela DA. Caso a pressão parcial de hidrogênio seja alta, a quantidade de compostos reduzidos seria menor resultando em produtos com maior quantidade de carbono (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2022).

Na etapa de acetogênese, os produtos gerados na etapa acidogênica são transformados em ácidos fórmico e acético. Ademais, as bactérias homoacetogênicas proporcionam o equilíbrio do consumo de hidrogênio e dióxido de carbono para a produção de acetato (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2022). Como última etapa da Fase III, o teor de CO<sub>2</sub> tende a decair e o teor de CH<sub>4</sub> aumentar, já que o meio está totalmente anaeróbico e o CO<sub>2</sub> produzido nas fases iniciais tem sua maior parte consumida.

A etapa metanogênica é estritamente anaeróbia e consiste na conversão do carbono contido na biomassa em dióxido de carbono e metano, ou seja, os compostos produzidos pela fase anterior passam a ser consumidos pelas bactérias arqueas metanogênicas. O grupo funcional microbiano desta etapa é geralmente mais sensível quanto às mudanças ambientais como pH, temperatura e concentração de agentes inibidores do processo, tornando a metanogênese uma etapa limitante do processo de DA (EDWIGES et al., 2019). Por fim, a Fase IV corresponde à fase de estabilização do processo e pode durar por até 40 anos (DUDEK et al., 2010). Nessa fase, o gás produzido é constituído em sua maioria por CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>. Contudo, à medida que os compostos de fácil de degradação são consumidos, o meio torna-se dominado por compostos recalcitrantes.

### 3.2.1 Biogás gerado em aterro sanitário

A degradação da biomassa disposta em aterros sanitários por processos biológicos forma o biogás, composto altamente inflamável e com potencial energético. Este gás origina-se da digestão anaeróbia e sua composição consiste principalmente em gás carbônico e metano e seu tratamento possibilita sua conversão em energia podendo ser destinada para o funcionamento de motores, geradores, aquecedores, eletrodomésticos e substituir o gás liquefeito de petróleo (VIEIRA *et al.*, 2015). A composição típica do biogás com seus principais componentes e respectivos teores são apresentados no Quadro 1.

**Quadro 1 - Composição típica do biogás**

<b>Gás</b>	<b>Teor em Volume</b>	<b>Fórmula Química</b>
<b>Metano</b>	55 – 75	CH <sub>4</sub>
<b>Dióxido de Carbono</b>	25 – 45	CO <sub>2</sub>

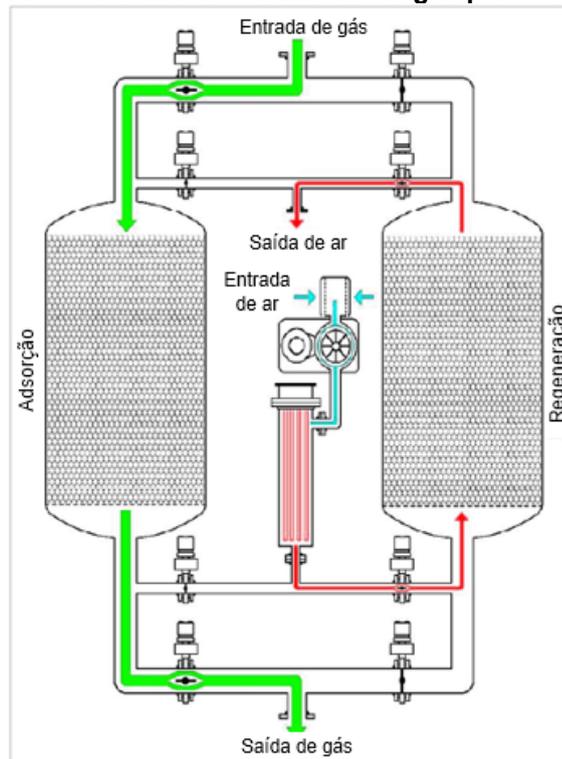
<b>Gás</b>	<b>Teor em Volume</b>	<b>Fórmula Química</b>
<b>Nitrogênio</b>	0 – 3	N <sub>2</sub>
<b>Hidrogênio</b>	0 – 2	H <sub>2</sub>
<b>Oxigênio</b>	0 – 0,1	O <sub>2</sub>
<b>Gás Sulfídrico</b>	0 – 1	H <sub>2</sub> S

**Fonte: Adaptado de Marca Ambiental (2019).**

Ademais, os gases provenientes de aterros sanitários contribuem para o efeito estufa, especialmente o metano, que além de potencial energético possui potencial poluidor 21 vezes mais que o dióxido de carbono. Os siloxanos são compostos comumente encontrados no biogás e, quando o gás é queimado, esses componentes são convertidos em dióxido de silício. Ao direcionar o gás para os sistemas de coleta e conversão de energia, o dióxido de silício se acumula no interior dos motores de combustão interna ou turbinas e causa a redução do desempenho dos equipamentos pelo processo de corrosão, que aumenta o custo de manutenção (EPA, 2023).

As técnicas de absorção e adsorção são aplicadas a fim de tratar o biogás e eliminar as concentrações de siloxanos presentes. O processo de absorção remove compostos do biogás através da adição de solvente ou reagente sólido que ocasiona uma reação físico-química. Já o processo de adsorção consiste em remover os contaminantes por meio de superfícies porosas de adsorventes como o carvão ativado ou gel de sílica (EPA, 2021). A Figura 6 ilustra um tipo comum de sistema de tratamento do biogás por meio da adsorção.

**Figura 6 - Sistema de tratamento de gás por adsorção**



**Fonte: Adaptado de EPA (2023).**

A quantidade e a qualidade do biogás gerado em aterros sanitários dependem de fatores como composição do resíduo, condições climáticas, densidade dos resíduos depositados, entre outros. Em geral, a produção do biogás nesses locais segue um padrão, com fase inicial de alta produção seguida por uma redução gradual ao longo do tempo. Aterros sanitários que operam com o objetivo de aproveitamento energético além da disposição de resíduos proporcionam maior proveito na produção e captação do metano gerado pela degradação da matéria orgânica, além do aumento de vida útil da obra e redução nas emissões de gases de efeito estufa (PECORA; VELÁZQUEZ; COELHO, s/d).

### **3.3 Fatores de influência da DA em aterros sanitários**

- pH

A eficiência da degradação da matéria orgânica pelo processo de DA depende diretamente da faixa de pH do processo. Os microrganismos metanogênicos são altamente sensíveis a ambientes ácidos, inibindo seu crescimento e a produção de

biogás. Contudo, faixas de pH muito básicas podem causar a proliferação das metanogênicas e inibir o processo de acetogênese. Com isso, manter a faixa de pH 7 garante o equilíbrio da concentração de hidrogênio e alta alcalinidade para proporcionar o efeito tampão e o valor de pH ser mantido ao longo o processo (SINGH *et al.*, 2018; KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2022).

- Temperatura

A temperatura é um dos fatores influentes no metabolismo e crescimento dos microrganismos responsáveis pela DA. O aumento da temperatura facilita a solubilidade dos compostos orgânicos e eliminação de agentes patogênicos, contudo, quando acima de cerca de 57°C, a geração de gás no aterro sanitário decai indicando uma deterioração aeróbica em vez de anaeróbica podendo levar a incêndios subterrâneos. Os efeitos da temperatura são complexos e seus perfis possuem grande variação para se obter uma modelagem de estimativa de geração de biogás em aterros, embora alguns modelos utilizam a temperatura ambiente para cálculos (IBPG, 2012). Assim, o controle da temperatura é indispensável para que haja o equilíbrio da produção e consumo de produtos intermediários da, crescimento microbiano e a eficiência global do processo (MORAES, ZAIAT, BONOMI, 2015).

- Oxigênio

O processo da digestão anaeróbia para geração de biogás em aterros pode ser inibido quando o oxigênio no ar é infiltrado na massa de resíduos que estão a poucas profundidades ou cobertos de forma inadequada. O manuseio da recolha de gás também pode contribuir para a infiltração do ar quando operado de forma incorreta, causando consequências em todo processo de decomposição da matéria e sua conversão em energia (IBPG, 2012).

- Teor de sólidos

A determinação do teor de sólidos da amostra a ser analisada é um fator determinante quanto a escolha do processo de reaproveitamento do resíduo.

Resíduos com teor de sólidos menor que 10% são viáveis no processo de digestão anaeróbia, já resíduos com teores maiores são indicados ao reaproveitamento por rota seca como a compostagem. Os sólidos voláteis (SV) de uma amostra correspondem a fração orgânica que será convertida em biogás. Assim, quanto maior o teor de SV mais eficiente será o processo contanto que seja controlado os demais fatores (HASAN *et al.*, 2019).

- Relação C/N

A relação C/N é determinada a fim de avaliar a degradabilidade do resíduo, consistindo no equilíbrio entre Carbono Orgânico Total (COT) e Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK). Valores ótimos da relação C/N para o desenvolvimento dos microrganismos no meio anaeróbio está contida na faixa de 20 a 30. Dessa forma, os microrganismos terão a quantidade necessária de nitrogênio para se desenvolverem a quantidade de carbono suficiente para degradação e conversão da matéria em biogás (GUERI *et al.*, 2018).

- Composição do substrato

O processo de DA depende diretamente da composição do substrato utilizado, uma vez que as características do resíduo regem todo processo de degradação do material. No caso dos resíduos dispostos em aterros sanitário terão a composição variada ao longo do ano, já que esta depende da época do ano, cultura, condições ambientais e também de fatores bióticos e abióticos da região. Com isso, a produção de biogás pode variar ao longo do ano se não gerenciado e monitorado corretamente.

A taxa de produção de metano depende de quatro concentrações principais sendo elas: proteínas, carboidratos, lipídeos e celulose. Resíduos com teores de proteínas mais elevados degradam com mais facilidade, seguido por carboidratos e celulose. Contudo, resíduos com excesso de proteínas e lipídeos em sua composição causam efeito inibitório na DA pelo acúmulo de amônio e nitrogênio afetando o processo (SINGH *et al.*, 2018).

- Compactação

A compactação na célula de um aterro sanitário é de suma importância para garantir a vida útil da obra e reduzir impactos ambientais como processos erosivos e produção de chorume pela infiltração de águas pluviais. Ademais, a compactação também garante a impermeabilidade na massa de resíduos, assentamento à medida que os resíduos degradam e evita a propagação de incêndios. O processo de compactação também influencia no processo de DA, uma vez que elimina os bolsões de ar presentes entre os resíduos dispostos tornando o ambiente anaeróbico. Portanto, a densidade dos resíduos alcançada pela compactação na célula possui efeito significativo na quantidade de gás gerado no aterro (EPA, 2012).

- Cobertura da célula

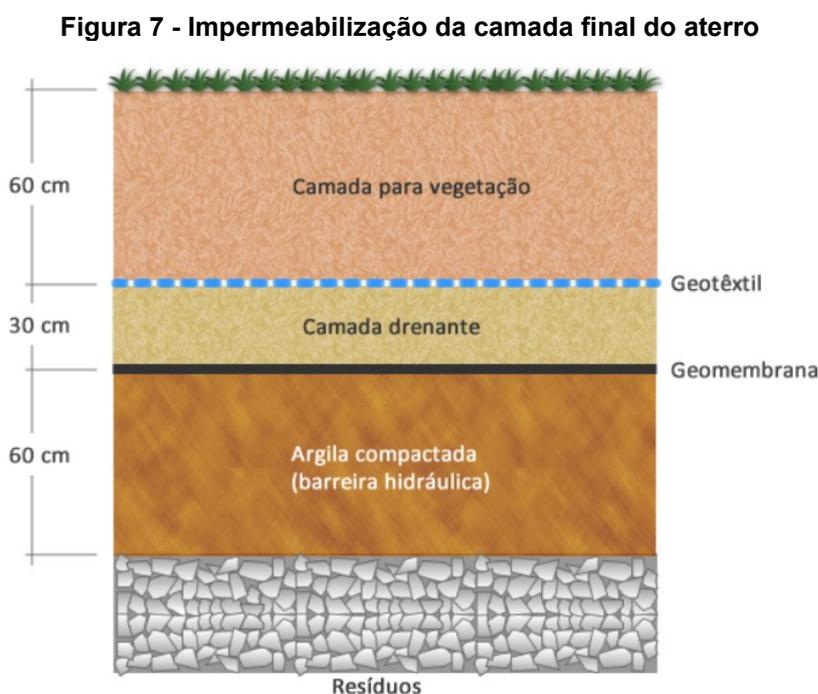
A cobertura diária refere-se ao material que se aplica na camada superficial de resíduos ao final de cada jornada de trabalho e auxilia no controle de odores e roedores, minimiza a infiltração de águas pluviais e previne incêndios na célula. Ademais, o processo é uma prática importante de gestão para otimizar a produção e coleta do gás produzido no aterro, pois ao isolar devidamente os componentes do resíduo do meio externo, a cobertura diária promove condições ideais para o processo de DA.

Na maioria dos casos, o material de cobertura depende do que se encontra disponível no local do aterro e do custo, motivo pelo qual o solo é o material tipicamente usado. Usualmente, aplica-se uma camada de cobertura com 15 cm de espessura e no dia seguinte remove-se a maior parte dela de forma a prolongar a vida útil do aterro. Tal prática influencia na produção de gás do aterro, onde materiais mais permeáveis, como areia, permitem taxas elevadas de infiltração de umidade resultando no aumento da produção de gás. Já materiais mais impermeáveis, como argila, reduz a infiltração de umidade e ar na massa de resíduos. Entretanto, a não remoção da camada impermeável da célula proporciona o acúmulo de lixiviados impossibilitando o direcionamento dos gases para o sistema de coleta (IBPG, 2012).

Quanto a camada final de cobertura da célula, normalmente aplica-se uma camada de argila com condutividade baixa como barreira hidráulica de forma a

controlar a infiltração. Ainda, de forma a aumentar a eficiência da cobertura final, camadas combinadas de solo e materiais geossintéticos, como geomembranas e geotêxtil, aumentam o desempenho e estabilidade da célula (COSTA *et al.*, 2018).

A Norma Brasileira- NBR 13.896 do ano de 1997 traz que a cobertura final deve estar prevista no plano de encerramento do aterro de modo com que minimize a infiltração de água, acomode assentamento sem fratura na estrutura da célula e possua um coeficiente de permeabilidade inferior ao solo natural da localidade do aterro (ABNT, 1997). A demonstração de cobertura final de uma célula de aterro sanitário é representada pela Figura 7.



Fonte: IFSul (s/d).

### 3.4 Coleta de gás em aterros sanitários

Para que haja eficiência na coleta do gás gerado pela decomposição dos RSU no aterro, é necessário estruturas de saídas de gás da célula do aterro, tubos coletores para direcionar o gás para o ponto de coleta e a estação de coleta de gás.

#### 3.4.1 Sistema vertical de captação de gás

Os poços de extração de gás podem ser construídos diretamente na base do aterro sobre a geomembrana durante a construção da célula, evitando que o

revestimento do aterro seja danificado e que não haja infiltração de ar em caso de construir os poços após toda disposição de RSU. Os poços possuem espaçamentos de 30 a 50 metros e proteção ao redor com o próprio material de cobertura do aterro e selo de bentonina na interface de resíduos. A bentonina consiste em um material argiloso que se expande quando molhada e serve como vedação eficaz para a estrutura do poço. Ademais, a vedação plástica ou com geotêxtil juntamente com a bentonina pode ser eficaz para inibir a infiltração de ar na célula (DUDEK *et al.*, 2010; IBPG, 2012).

Na parte inferior do poço é inserido o dreno de extração de gás, que consiste em tubos de 100 a 200 mm de diâmetro e sua extensão aumenta conforme o aumento de RSU dispostos no aterro, de forma a ficar sempre superior à última camada de resíduos. As tubulações dos drenos são conectadas para regular o fluxo de gás, e os pontos de controle de fluxo são conectados a uma linha principal que conduz o gás para geradores de energia ou sistemas de queima (flares), como demonstra a Figura 8.

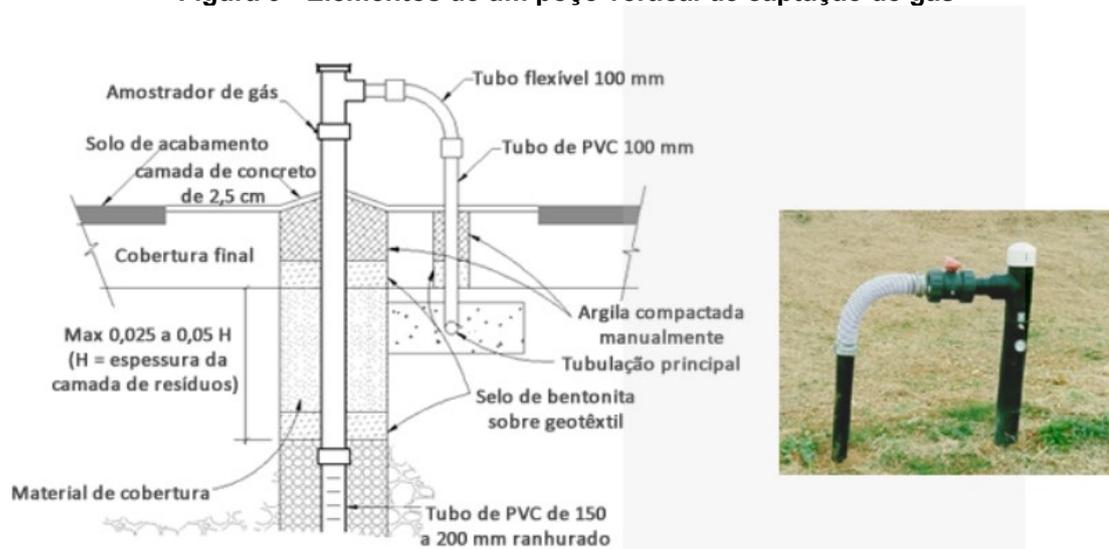


Fonte: Lima *et al.* (2017).

A tubulação de cloreto de polivinila (PVC) para construção dos drenos verticais é utilizada pelo material ser resistente ao calor e pressão nos locais mais profundos do aterro onde há maior compactação dos resíduos. Contudo, o material de PVC pode ressecar e tornar-se quebradiço com o tempo e desmoronar na estrutura da célula. Devido a isso, os tubos de polietileno de alta densidade (HDPE) são ótimas opções em poços verticais por sua resistência (DUDEK *et al.*, 2010; IBPG, 2012).

A parte superior do dreno é constituída por um tubo não perfurado equipado com um coletor contendo uma válvula de gás e uma saída conectada a uma mangueira que direciona o gás para o ponto de coleta. O sistema vertical de extração de gás é apresentado na Figura 9.

**Figura 9 - Elementos de um poço vertical de captação de gás**

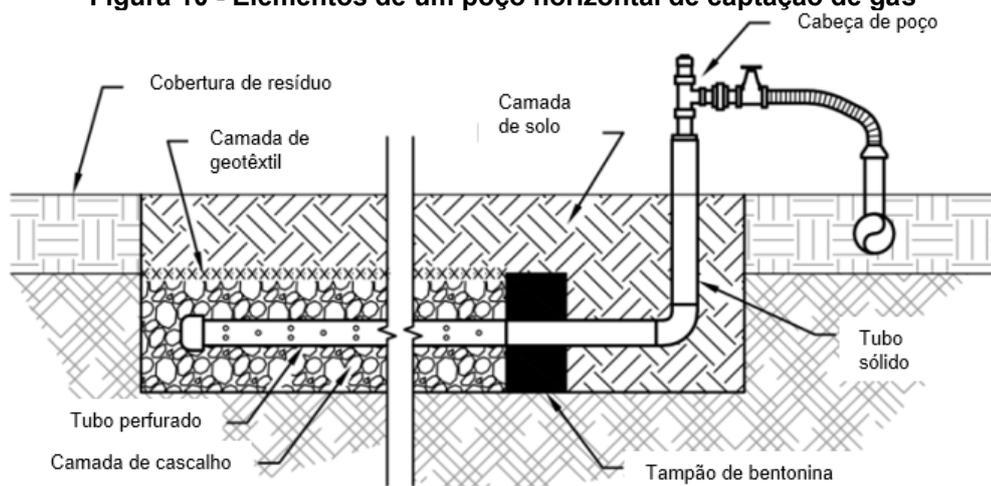


Fonte: IFSul (s/d).

### 3.4.2 Sistema horizontal de captação de gás

Os poços de extração horizontais são inseridos em uma vala dentro da célula do aterro e possuem espaçamentos de 30 a 40 metros. A vala é preenchida com cascalho e um tubo perfurado com cerca de 10 a 20 cm de diâmetro é instalado. No topo da vala pode ser inserido uma camada de geotêxtil para evitar que haja entupimento da tubulação ocasionado pelos resíduos (IBPG, 2012). O sistema horizontal de captação de gás é representado pela Figura 10.

**Figura 10 - Elementos de um poço horizontal de captação de gás**



Fonte: Adaptado de IBPG (2012).

### 3.4.3 Sistema vertical-horizontal de captação de gás

Outra forma comum de coletar gases em aterros que possuem camadas espessas de RSU é através da combinação de poços verticais e tubos horizontais perfurados. Neste método, os tubos horizontais são interligados em diferentes níveis dos poços verticais permitindo a coleta mais eficiente do gás. Esta técnica apresenta a vantagem econômica de não haver necessidade de muitos poços para a coleta de gases (DUDEK *et al.*, 2010).

### 3.4.4 Sistema de compressão

Para que o gás chegue até os pontos de coleta, é necessário um sistema de sucção através do uso de compressores. O uso desses equipamentos pode ser necessário para comprimir o gás antes de adentrar ao sistema de recuperação energética. A taxa do fluxo de gás e o nível de compressão desejado indicam a quantidade, tipo e tamanho dos compressores necessários para a captação de gases (IFSUL, s/d).

## 3.5 Conversão energética do biogás

O processo de conversão energética do biogás envolve a transformação da energia química das moléculas do biogás em energia mecânica por meio de

combustão controlada, que posteriormente é convertida em energia elétrica. As tecnologias convencionais utilizadas para o processo incluem motores de combustão interna, turbinas a vapor e microturbinas.

### 3.5.1 Motores de combustão

Devido ao seu baixo custo e alto rendimento elétrico em comparação com outras tecnologias, os motores de combustão interna (CI) são amplamente utilizados na conversão energética do biogás. Esses motores podem alcançar eficiências de 25% a 35%, que podem ser aumentadas ao aplicar sistemas de cogeração. O sistema envolve a recuperação do calor residual do sistema de arrefecimento do motor para aquecer água ou do sistema de exaustão para produzir vapor a baixa pressão. Por outro lado, os motores CI emitem taxas de óxido de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ) mais elevadas que as demais tecnologias, motivo pelo qual muitas vezes dificulta-se obter licença para projetos que exigem maior número de motores (ABRELPE, 2013). O motor de combustão interna é demonstrado pela Figura 11.

**Figura 11 - Motor de combustão interna**



Fonte: IFSul (s/d).

### 3.5.2 Turbinas a vapor

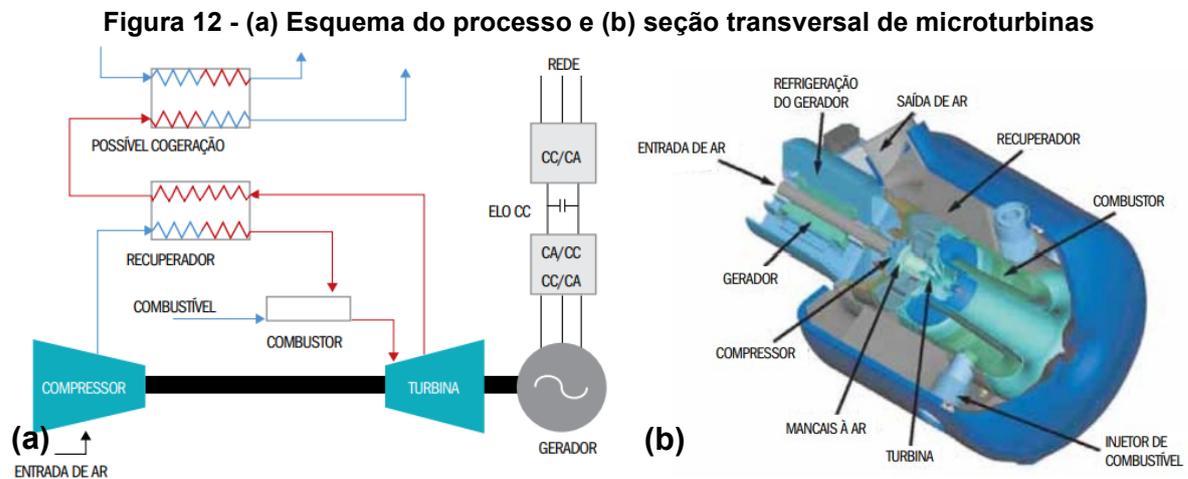
Esse sistema é dificilmente encontrado em aterros de grande porte devido seu alto custo e requisitos. O sistema envolve a produção de vapor por meio do aquecimento de água e sua expansão através de turbina que aciona um gerador para produzir eletricidade. Sua aplicação é ideal em aterros com pelo menos 15 milhões de toneladas de RSU dispostos, resultando em uma produção mínima de 10 MW de eletricidade. No entanto, para que a implantação do sistema seja vantajosa, é necessário ter disponibilidade de grandes áreas, o que pode ser um obstáculo para a maioria dos projetos de recuperação energética em aterros (ABRELPE, 2013).

### 3.5.3 Microturbinas

As primeiras unidades de microturbinas movidas a gás proveniente de aterros foram introduzidas no mercado em 2001. Essa opção de recuperação energética é especialmente adequada para aterros onde grandes usinas geradoras de energia não são viáveis. As microturbinas são frequentemente usadas em locais com necessidades de consumo de energia de até 1 MW, com modelos típicos gerando em torno de 30 a 100 kW de eletricidade. A base de funcionamento das microturbinas consiste em levar o combustível até o combustor da turbina com pressão de cerca de 4,8 a 5,5 bar. No combustor, o ar e o combustível são queimados e o calor é liberado, fazendo com que o gás de combustão se expanda. O gás expandido aciona a turbina a gás que conseqüentemente aciona o gerador produzindo eletricidade (IFSUL, s/d; ABRELPE, 2013).

Comparadas com as demais tecnologias no mercado, as microturbinas emitem taxas menores de  $\text{NO}_x$ , o tamanho é compactado e de fácil mobilidade e são capazes de queimar gases mesmo com teores baixos de  $\text{CH}_4$ . No entanto, a fim de utilizar esse gás, é necessário submetê-lo a um tratamento a fim de remover particulados e siloxanos para evitar contaminação do equipamento e a utilização de altas pressões no combustível, além da necessidade de equipamentos secundários para operação. Tais fatores, juntamente com a baixa eficiência de apenas 28%, explicam o alto custo associado à aplicação dessa tecnologia (IFSUL, s/d; ABRELPE,

2013). O esquema do processo de funcionamento das microturbinas e sua seção transversal são ilustrados na Figura 12.



Fonte: ABRELPE (2013).

### 3.6 Modelagem da produção de biogás em aterros sanitários

A estimativa de biogás produzido em aterros sanitários pode ser determinada através de metodologias que utilizam dados dos resíduos dispostos, como composição gravimétrica e quantidade disposta para estimar a produção de biogás no aterro até o fim de sua vida útil.

A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (U.S Environmental Protection Agency's-EPA) implementou no ano de 2005 o software LandGEM (Landfill Gas Emissions Model) a fim de quantificar emissões provenientes da degradação de RSU em aterros sanitários através da equação de decomposição de primeira ordem. O modelo é baseado nos aterros sanitários do país, contudo, permite estimar a produção de gases nas mais diversas regiões do mundo. A metodologia é capaz de prever as emissões de gases de aterros sanitários tendo base em parâmetros como tipo de resíduo, quantidade de resíduo depositado e condições climáticas locais. O software ainda permite inserir valores convencionais ou experimentais dos parâmetros referentes ao ano de abertura e encerramento do aterro sanitário, capacidade de geração de biogás ( $L_0$ ), sua taxa de geração ( $k$ ), teor de metano (%) e quais gases o usuário tem interesse em quantificar (Figura 13).

**Figura 13 - Dados do usuário no software LandGEM**

USER INPUTS Landfill Name or Identifier: Medianeira-PR

1: PROVIDE LANDFILL CHARACTERISTICS Clear ALL Non-Parameter Inputs/Selections

Landfill Open Year	2022
Landfill Closure Year	2042
Have Model Calculate Closure Year?	<input type="radio"/> Yes <input checked="" type="radio"/> No
Waste Design Capacity	<input type="text" value=""/> megagrams

2: DETERMINE MODEL PARAMETERS Restore Default Model Parameters

Methane Generation Rate, $k$ ( $\text{year}^{-1}$ )	CAA Conventional - 0.05
Potential Methane Generation Capacity, $L_0$ ( $\text{m}^3/\text{Mg}$ )	CAA Conventional - 170
NMOC Concentration ( $\text{ppmv as hexane}$ )	Inventory No or Unknown Co-disposal - 600
Methane Content (% by volume)	User-specified <input type="text" value="45"/> User-specified value: <input type="text" value="45"/>

3: SELECT GASES/POLLUTANTS Default pollutant parameters are currently being used by model.

Gas / Pollutant #1	Total landfill gas	<span>Edit Existing or Add New Pollutant Parameters</span>  <span>Restore Default Pollutant Parameters</span>
Gas / Pollutant #2	Methane	
Gas / Pollutant #3	Carbon dioxide	
Gas / Pollutant #4	NMOC	

Fonte: EPA (2005).

A constante  $k$  descreve o ritmo em que o resíduo disposto se decompõe e produz metano. Esse valor está relacionado com a meia-vida dos resíduos com base na Equação 1.

$$meia - vida = \frac{\ln(2)}{k} \quad (1)$$

Valores menores de  $k$  limitam a produção de metano devida à porção relativamente baixa de resíduos dispostos. Valores maiores de  $k$  resultam em aumento na geração de metano ao longo do tempo, mas também em um rápido decaimento após o encerramento do aterro, pois os resíduos continuam se decompondo sem que haja reabastecimento no local.

O parâmetro  $L_0$  indica a quantidade total de gás metano potencialmente produzido por tonelada métrica de resíduos à medida que se decompõem. Este valor depende da composição dos resíduos, ou seja, resíduos com alto teor de carbono resultarão em valores maiores de  $L_0$ . Embora o valor máximo de  $L_0$  não seja atingido em locais com climas muito secos, o parâmetro independe da umidade acima de um limite mínimo.

No ano de 2006, o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (Intergovernmental Panel on Climate Change- IPCC) publicou o Volume 5 das Diretrizes para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa, tendo Resíduo como tema da edição. A edição conta com o modelo para estimar as emissões de gases em aterros sanitários através também do decaimento de primeira ordem. Tal modelo assume que o componente orgânico dos resíduos decai ao longo dos anos durante as quais o gás metano (CH<sub>4</sub>) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) são formados. A planilha disponibilizada pelo órgão exige dados como composição do resíduo disposto no aterro a ser analisado como resíduos alimentares, madeira, têxtil, lodo e resíduos industriais (Figura 14).

**Figura 14 - Dados do usuário no software IPCC**

**Parameters**

Country

Region

Please enter parameters in the yellow cells. If no national data are available, copy the IPCC default value.  
Help on parameter selection can be found in the 2006 IPCC guidelines

	IPCC default value		Country-specific parameters	
			Value	Reference and remarks
<b>Starting year</b>		1950	1950	
<b>DOC (Degradable organic carbon)</b>	Waste by composition <input type="text" value=""/>			
<b>(weight fraction, wet basis)</b>	<b>Range</b>	<b>Default</b>		
Food waste	0.08-0.20	0,15	0,15	
Garden	0.18-0.22	0,2	0,2	
Paper	0.36-0.45	0,4	0,4	
Wood and straw	0.39-0.46	0,43	0,43	
Textiles	0.20-0.40	0,24	0,24	
Disposable nappies	0.18-0.32	0,24	0,24	
Sewage sludge	0.04-0.05	0,05	0,05	
Industrial waste	0-0.54	0,15	0,15	
<b>DOCf (fraction of DOC dissimilated)</b>		0,5	0,5	

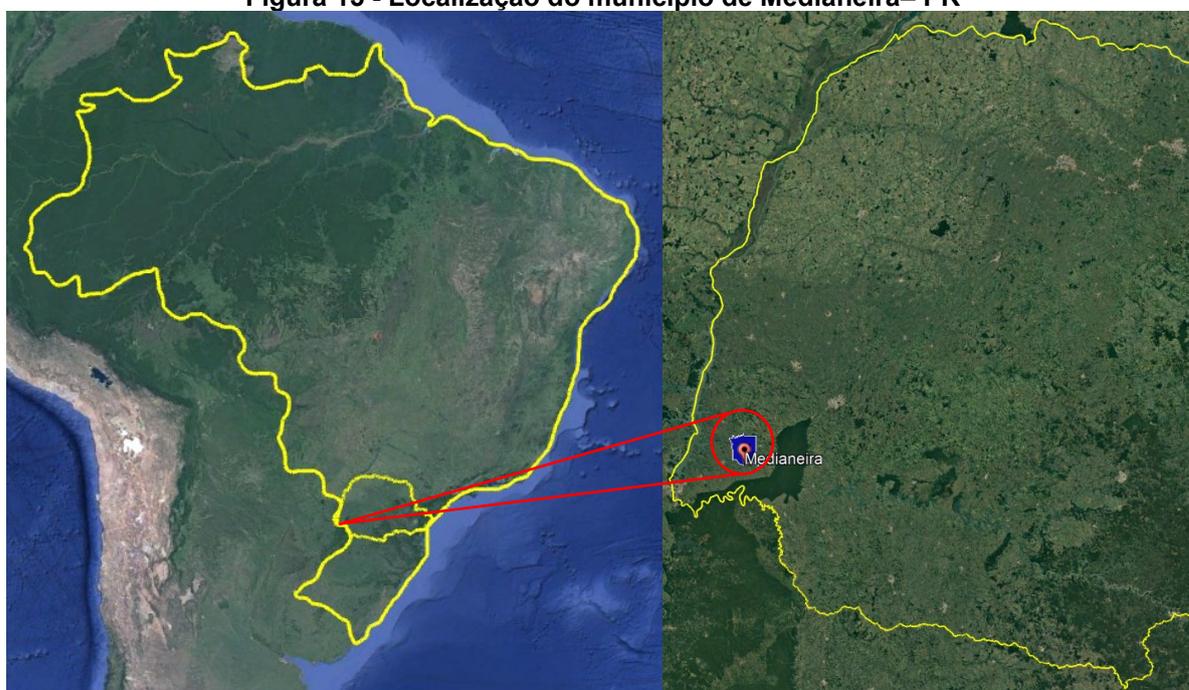
Fonte: IPCC (2006).

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Local de pesquisa

A cidade de Medianeira foi definida como local sede da pesquisa. O município localiza-se na região oeste do Estado do Paraná e conta com 328.732 km<sup>2</sup> de área e uma população de 46.940 habitantes com PIB local de R\$ 44,4 mil, sendo que 52% advém de serviços, seguido por 27,6% proveniente de indústrias, 12% de administração pública e 8,5% da agropecuária (IBGE CIDADES, 2021; CARAVELA, 2023). De acordo com o Plano Municipal de Saneamento Básico da cidade (PMSB MEDIANEIRA– PR, 2018), o clima predominante na região é o subtropical úmido mesotérmico e a precipitação média anual de 2000 mm. As temperaturas médias nos meses mais quentes, de dezembro a março, é de 24 °C e nos meses mais frios, junho e julho, de 17 °C. O solo da região possui textura argilosa, derivada das rochas eruptivas originadas pelas ações vulcânicas da Bacia do Paraná (EMBRAPA, 2020). A Figura 15 apresenta a localização do município de Medianeira no Estado do Paraná.

**Figura 15 - Localização do município de Medianeira– PR**



Fonte: Google Earth Pro (2023).

Foram selecionados 13 municípios do oeste paranaense com distâncias limiars de 70 km do local sede da pesquisa. O estudo buscou selecionar estes municípios a fim de aumentar a disposição de RSU no aterro sanitário de Medianeira– PR em busca de viabilizar a recuperação energética no local através de consórcios municipais. Além disso, foram realizados três cenários englobando os municípios conforme as distâncias limiars de 20, 40 e 70 km como apresenta o Quadro 2.

**Quadro 2 - Cenários com os municípios integrantes**

<b>Cenários</b>	<b>Municípios</b>	<b>Distância (km)</b>
<b>1</b>	Medianeira	NA
<b>2 (Distância &lt;20 km)</b>	Medianeira	NA
	São Miguel do Iguaçu	16
	Serranópolis do Iguaçu	15
	Matelândia	17
<b>3 (Distância &lt;40 km)</b>	Medianeira	NA
	São Miguel do Iguaçu	16
	Serranópolis do Iguaçu	15
	Matelândia	17
	Santa Terezinha de Itaipu	37
	Itaipulândia	33
	Missal	32
	Céu Azul	38
	Ramilândia	38
<b>4 (Distância &lt;70 km)</b>	Medianeira	NA
	São Miguel do Iguaçu	16
	Serranópolis do Iguaçu	15
	Matelândia	17
	Santa Terezinha de Itaipu	37
	Itaipulândia	33
	Missal	32
	Céu Azul	38
	Ramilândia	38
	Vera Cruz do Oeste	52
	Santa Tereza do Oeste	64
	Santa Helena	66
	São Pedro do Iguaçu	68

NA: Não se aplica.

**Fonte: Autoria própria (2023).**

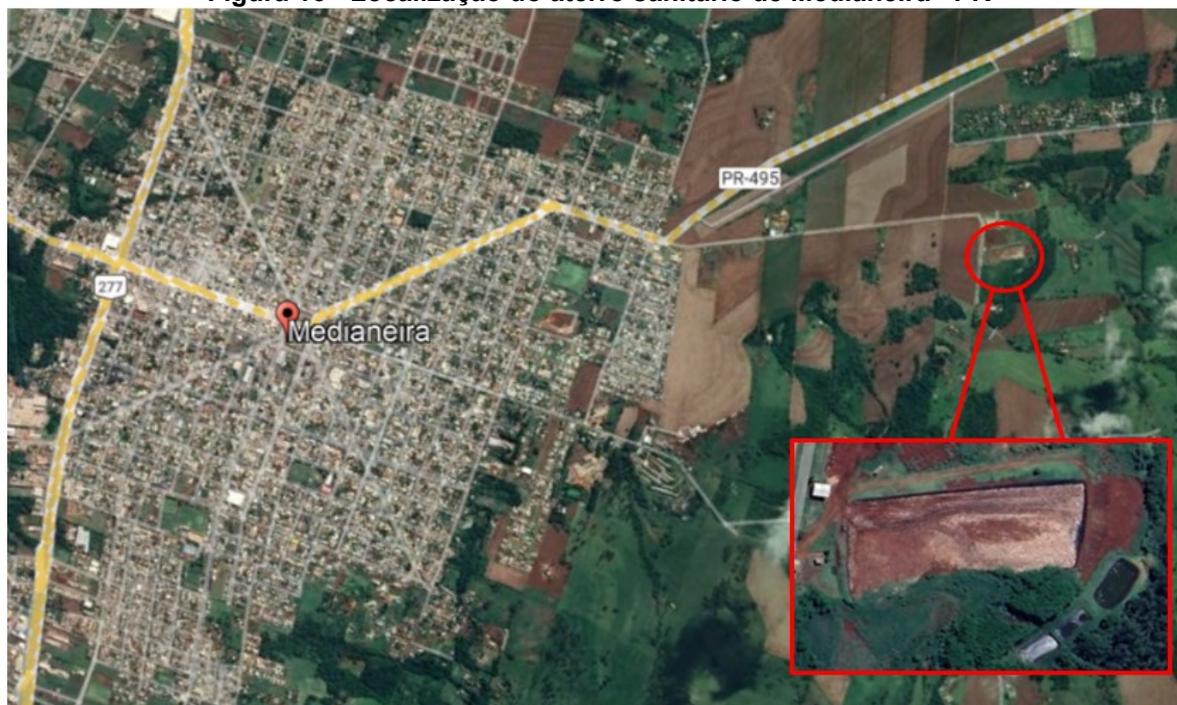
#### 4.1.2 Características do Aterro Sanitário de Medianeira– PR

Anterior à implantação do aterro sanitário do município de Medianeira– PR, os resíduos sólidos urbanos eram dispostos em lixão a céu aberto, gerando impactos ambientais como poluição de águas subterrâneas e contaminação do solo. Desde 2005, a cidade conta com uma área destinada a disposição final dos RSU situada a

aproximadamente 1,5 km de distância do perímetro urbano tendo acesso pela PR-495 sentido Serranópolis do Iguçu-PR. A área ocupada possui o equivalente a 5,2 hectares e é de posse da Prefeitura. Na área possui 3 células finalizadas que operaram por 10 anos, a célula atual que deve operar até o ano de 2025 e uma nova célula em construção. No projeto da nova célula está contido o processo de terraplanagem, impermeabilização reforçada da célula, sistema de drenagem de chorume e de saída de gás e lagoas para armazenamento de chorume (PMSB MEDIANEIRA– PR, 2018).

No entanto, a coleta de RSU destinados ao aterro ainda é terceirizada, acarretando em custos adicionais à prefeitura do município. A quantidade de RSU coletada é contabilizada por meio de balança, que registra o peso total do caminhão no momento em que adentra no aterro. O antigo lixão foi desativado e possui Projeto de Recuperação de Área Degradada (PRAD) desde então (PMSB MEDIANEIRA– PR, 2018). A Figura 16 apresenta a localização do aterro sanitário no município de Medianeira– PR.

**Figura 16 - Localização do aterro sanitário de Medianeira– PR**



Fonte: Adaptado de Google Earth (2023).

## 4.2 Projeção de geração de RSU

Para a projeção de geração de RSU dos municípios utilizou-se dados populacionais dos dois últimos Censos Demográficos realizados pelo IBGE no ano de 2000 e 2010 e a estimativa da população para o ano de 2021 para obter a projeção de crescimento populacional pelos próximos 20 anos.

Para a projeção em Progressão Aritmética (P.A.) foram obtidos dois valores de razão R e realizado a média entre eles, sendo R<sub>1</sub> relacionado com o ano de 2000 e 2010 e R<sub>2</sub> relacionado com o ano de 2010 e 2021. O cálculo da razão R<sub>1</sub> foi realizado conforme a Equação 2.

$$R_1 = \frac{\text{população futura} - \text{população atual}}{\text{tempo futuro} - \text{tempo atual}} \quad (2)$$

Onde:

R<sub>1</sub> = razão;

População atual= população referente ao ano de 2000;

População futura= população referente ao ano de 2010;

Tempo atual= ano de 2000;

Tempo futuro= ano de 2010.

Já para R<sub>2</sub> foi realizado o mesmo cálculo, mas relacionando o ano de 2010 e 2021 com seus respectivos dados populacionais. Assim, para se obter a estimativa populacional dos anos seguintes a 2021 de forma linear, o valor de R<sub>médio</sub> foi fixado e somado ao dado anterior da população referente ao ano. Já para a projeção em Progressão Geométrica (P.G.), foram obtidos dois valores de razão Q e realizado a média entre eles, tendo Q<sub>1</sub> e Q<sub>2</sub> relacionados com os mesmos anos da P.A. O cálculo das razões foi realizado conforme a Equação 3.

$$Q_1 = \left( \frac{\text{população futura}}{\text{população atual}} \right)^{\left( \frac{1}{\text{tempo futuro} - \text{tempo atual}} \right)} \quad (3)$$

Onde:

$Q_1$  = razão;

População atual= população referente ao ano de 2000;

População futura= população referente ao ano de 2010;

Tempo atual= ano de 2000;

Tempo futuro= ano de 2010.

Para obter o valor de  $Q_2$  foi realizado o mesmo cálculo relacionando o ano de 2010 e 2021 com seus respectivos dados populacionais. Dessa forma, para se obter a estimativa de crescimento da população dos anos seguintes a 2021, a razão  $Q_{\text{médio}}$  foi fixada e multiplicada ao dado anterior da população referente ao ano de interesse. Com base no número de habitantes obtido pelas projeções em P.A. e P.G. realizou-se a média entre eles de forma a obter a população média dos anos compreendidos entre 2022 e 2042.

Com esses dados, foi obtido a geração per capita total (GPC) por dia expressa pela Equação 4.

$$GPC = 0,1176 \times (pop\ média_{ano\ n})^{0,1581} \quad (4)$$

Os valores obtidos da GPC em kg/hab.d. foram multiplicados por 365 a fim de obter a GPC anual dos anos compreendidos entre 2022 e 2042. A partir disso, considerando a taxa de coleta como 100% em todos os municípios, exceto por São Pedro do Iguaçu onde a taxa é de 99%, foi obtida a massa de resíduos por meio do cálculo apresentado pela Equação 5.

$$Massa\ de\ resíduos = \frac{(pop\ média_{ano\ n} \times GPC\ total \times taxa\ coleta)}{1000} \quad (5)$$

Com a massa de resíduos diária obtida, os valores foram multiplicados por 365 a fim de se obter a massa de resíduos gerada anualmente entre os anos de 2022 e 2042. Para determinar o volume de resíduos em  $m^3$ /dia foram utilizados os valores correspondentes à massa diária de resíduos e divididos pela densidade permissível de  $0,75\ ton/m^3$  dos resíduos quando dispostos em aterros sanitários. Por fim, os novos

valores foram multiplicados por 365 para obter o volume anual de resíduos referentes aos anos entre 2022 e 2042, que serão utilizados para estimar a produção anual de gás metano no aterro.

#### 4.4 Análise da modelagem de biogás

Para estimar a geração anual de metano, o software LangGEM utiliza a equação de decaimento de primeira ordem com parâmetros convencionais pré-estabelecidos (Equação 6).

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 kL_0 \left( \frac{M_i}{10} \right) e^{-kt_{ij}} \quad (6)$$

Onde:

$Q_{CH_4}$  = geração anual de metano no ano do cálculo ( $m^3$ /ano);

$i = 1$  - incremento de tempo do ano;

$n$  = ano do cálculo – ano inicial de recebimento de resíduo;

$j = 0,1$  – incremento de tempo do ano;

$k$  = taxa de geração de metano ( $0,05 \text{ ano}^{-1}$ );

$L_0$  = capacidade de potencial de geração de metano ( $170 \text{ m}^3/\text{ton}$ );

$M_i$  = massa de recebimento de resíduo no ano  $i$  (ton);

$t_{ij}$  = idade da seção  $j$  da massa de resíduo  $M_i$  aceita no ano  $i$  (3,2 anos).

Além disso, foi estabelecido o ano de abertura (2022) e de encerramento (2042) do aterro sanitário para que fosse projetada a produção de biogás e o teor de metano definido como 50% do volume total do biogás gerado. Com os parâmetros definidos, foi utilizada a massa de resíduos em ton/ano da planilha de projeção de RSU para calcular os novos valores nas unidades estabelecidas pelo software (Figura 17).

**Figura 17 - Massa de resíduos em ton/ano no software LandGEM**

USER INPUTS Landfill Name or Identifier: Medianeira-PR

1: PROVIDE LANDFILL CHARACTERISTICS

Landfill Open Year: 2022  
 Landfill Closure Year: 2042  
 Have Model Calculate Closure Year?  Yes  No  
 Waste Design Capacity: megagrams

2: DETERMINE MODEL PARAMETERS

Methane Generation Rate,  $k$  ( $\text{year}^{-1}$ ): CAA Conventional - 0.05  
 Potential Methane Generation Capacity,  $L_0$  ( $\text{m}^3/\text{Mg}$ ): CAA Conventional - 170  
 NMOC Concentration (ppmv as hexane): Inventory No or Unknown Co-disposal - 600  
 Methane Content (% by volume): User-specified value: 50

3: SELECT GASES/POLLUTANTS

Gas / Pollutant #1: Total landfill gas (Default pollutant parameters are currently being used by model.)  
 Gas / Pollutant #2: Methane  
 Gas / Pollutant #3: Carbon dioxide  
 Gas / Pollutant #4: NMOC

4: ENTER WASTE ACCEPTANCE RATES

Input Units: Mg/year

Year	Input Units (Mg/year)	Calculated Units (short tons/year)
2022	11.161	12.277
2023	11.287	12.419
2024	11.413	12.559
2025	11.541	12.699
2026	11.669	12.836
2027	11.799	12.979
2028	11.929	13.122
2029	12.060	13.266
2030	12.192	13.412
2031	12.326	13.558
2032	12.460	13.706
2033	12.595	13.854
2034	12.731	14.004
2035	12.868	14.154
2036	13.005	14.306
2037	13.144	14.459
2038	13.284	14.613
2039	13.425	14.768
2040	13.568	14.924
2041	13.711	15.082
2042	13.855	15.240
2043		
2044		
2045		

Fonte: EPA (2005).

#### 4.5 Estimativa preliminar do potencial energético e custos de implantação

Para converter o volume de biogás em energia elétrica considerando 50% de metano, utilizou-se a fórmula adaptada de acordo com Sillero *et al.* (2023), como apresenta a Equação 7.

$$EE = \frac{Q_{\text{biogás}} \times PCI_{\text{CH}_4} \times E_c \times f_{\text{CH}_4} \times n_e}{F_c} \quad (7)$$

Onde:

EE = Energia elétrica;

$Q_{\text{biogás}}$  = vazão de biogás ( $\text{m}^3$ );

$PCI_{\text{CH}_4}$  = poder calorífico do metano ( $35,59 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$ );

$E_c$  = eficiência de coleta de gás (50%);

$f_{\text{CH}_4}$  = porcentagem de metano no biogás (50%);

$n_e$  = eficiência do equipamento;

$F_c$  = fator de conversão de MJ para MWh (1 MWh = 3.600 MJ).

Para avaliar a capacidade de abastecimento de energia elétrica na zona urbana foi utilizado o cálculo expresso pela Equação 8.

$$P = \frac{EE_{ano\ n} \times F_c}{CE} \quad (8)$$

Onde:

P= população atendida pela energia elétrica proveniente do biogás (hab.);

EE<sub>ano n</sub>= potencial de energia elétrica no ano n;

F<sub>c</sub>= fator de conversão de MWh para kWh (1 MWh = 1.000 kWh);

CE= consumo médio de energia elétrica per capita (714 kWh/hab.ano).

Quanto ao cenário econômico, foi considerado os valores de tarifas aplicadas ao grupo B pela Companhia Paranaense de Energia– COPEL, como demonstra a Figura 18.

**Figura 18 - Tarifas aplicadas ao grupo B pela COPEL**

**B1 - Residencial**  
Residencial

Classe - Subclasse				TE	TUSD
B1 - Residencial	B3 - Comercial	<b>Convencional (R\$/kWh)</b>	Sem imposto	R\$ 0,25894	R\$ 0,31080
B2 - Rural	B4 - Iluminação Pública		Com imposto	R\$ 0,33090	R\$ 0,39717
Subclasse		<b>Branca</b>	<b>Fora de Ponta</b>		
Baixa Renda - até 30 kWh	Baixa Renda - superior a 220kWh		Sem imposto	R\$ 0,24720	R\$ 0,23605
Baixa Renda - entre 101 e 220kWh	<b>Residencial</b>		Com imposto	R\$ 0,31590	R\$ 0,30165
<b>Intermediário</b>					
Baixa Renda - entre 31 e 100kWh			Sem imposto	R\$ 0,24720	R\$ 0,42633
			Com imposto	R\$ 0,31590	R\$ 0,54481
<b>Ponta</b>					
			Sem imposto	R\$ 0,38808	R\$ 0,61661
		Com imposto	R\$ 0,49593	R\$ 0,78797	

Fonte: COPEL (2023).

O grupo B representa os consumidores que recebem energia em tensão menor que 2,3 kV como residências. Dessa forma optou-se pela classe B1-

Residencial e subclasse Residencial no site da COPEL para definir a tarifa aplicada. A tarifa utilizada para os cálculos é referente ao valor convencional em R\$/kWh com imposto somando o valor da Tarifa de Energia (TE) com a Tarifa de Uso de Sistema de Distribuição (TUSD), totalizando R\$ 0,72807 por kWh. Desse modo, o cálculo para estimar o custo da eletricidade proveniente do biogás de acordo com as tarifas da COPEL é apresentado pela Equação 9.

$$\frac{\text{R\$}}{\text{kWh}} = (EE_{\text{ano } n} \times F_c) \times TA \quad (9)$$

Onde:

$EE_{\text{ano } n}$  = energia elétrica no ano n;

$F_c$  = fator de conversão de MWh para kWh (1MWh = 1.000kWh)

TA = tarifa aplicada pela COPEL (R\$0,72807).

Os valores considerados para estimar o custo de eletricidade condizem com o consumo de energia na própria unidade consumidora. Além disso, no cálculo não foram considerados os custos de manutenção e operação do sistema de conversão e distribuição energética.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

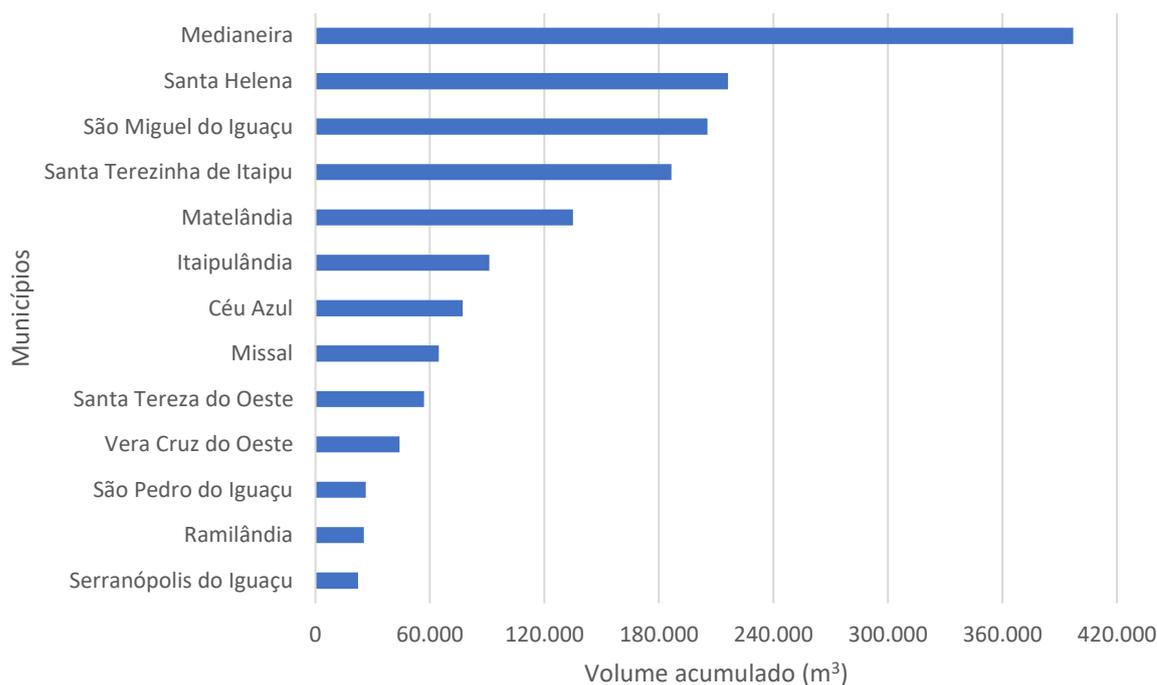
### 5.1 Projeção de RSU ao longo do tempo

Dentre os municípios analisados, apenas a população de São Pedro do Iguaçu não é 100% atendida pelo serviço de coleta de RSU, tendo percentual de 99,26% de cobertura de coleta, indicando que o Oeste do Estado se atenta quanto ao manejo e gestão de RSU.

Durante a estimativa de crescimento populacional, foi constatado que o município de Medianeira terá o maior volume acumulado de RSU nos próximos 20 anos, correspondente a 397.069 m<sup>3</sup>. Essa quantidade é justificada pelo fato de que Medianeira possui uma população maior que os demais municípios (46.940 hab.) e 100% dos seus habitantes são atendidos pelo serviço de coleta de resíduos sólidos. Em seguida, a cidade de Santa Helena apresenta o segundo maior volume acumulado de CH<sub>4</sub>, correspondendo a 216.255 m<sup>3</sup>. Apesar de Santa Helena ter uma população menor do que São Miguel do Iguaçu, as razões de crescimento populacional (P.A. e P.G.) foram maiores durante o período do Censo Demográfico, o que resultou em um maior volume acumulado de resíduos ao longo dos anos de projeção.

Os municípios de Ramilândia e Serranópolis do Iguaçu apresentam os menores valores de volume acumulado de RSU durante o mesmo período, totalizando 25.409 m<sup>3</sup> e 22.300 m<sup>3</sup>, respectivamente. Isso se deve ao fato de que ambos possuem populações menores do que os demais municípios, sendo equivalente a 4.500 hab. e 4.460 hab. na mesma ordem, como demonstra a Figura 19.

**Figura 19 - Comparativo do volume acumulado de RSU pelos próximos 20 anos**

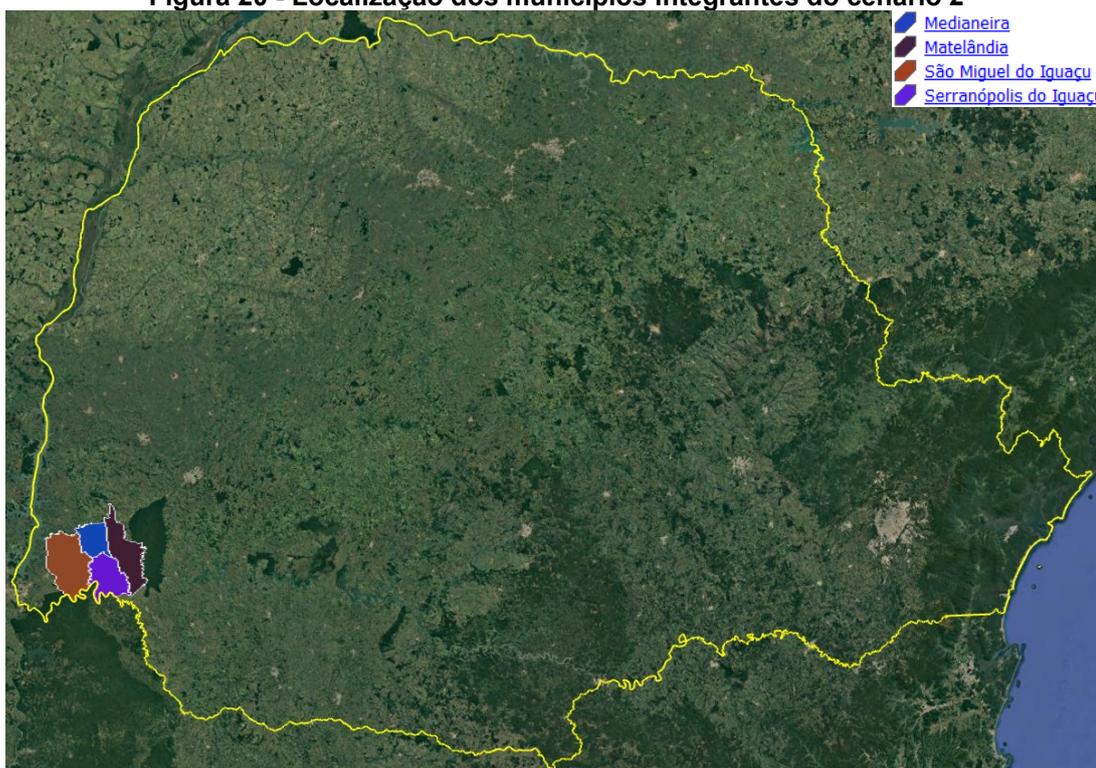


**Fonte: Autoria própria (2023).**

## 5.2 Municípios integrantes dos cenários

O primeiro cenário é composto apenas por Medianeira de forma a compará-lo com os demais. O segundo cenário conta com os municípios de distância limiar de 20 km compreendendo com Medianeira, São Miguel do Iguaçu, Serranópolis do Iguaçu e Matelândia (Figura 20).

**Figura 20 - Localização dos municípios integrantes do cenário 2**



Fonte: Google Earth Pro (2023).

A população estimada em São Miguel do Iguaçu é de 27.696 hab. Ainda, de acordo com a Prefeitura de São Miguel do Iguaçu (s/d), o município possui destaque regional na produção de gado leiteiro e economia baseada no ramo da agricultura, pecuária e industrial. Já Serranópolis do Iguaçu possui 4.460 hab. e 61% do valor total de R\$ 245 milhões do PIB do município advém da agropecuária. O município de Matelândia, por sua vez, conta com 18.266 hab. e 33,16% do valor adicionado no PIB local de R\$ 990,8 milhões é proveniente da indústria (IBGE CIDADES, 2021; CARAVELA, 2023). As respectivas distâncias e populações dos municípios são apresentadas na Tabela 1.

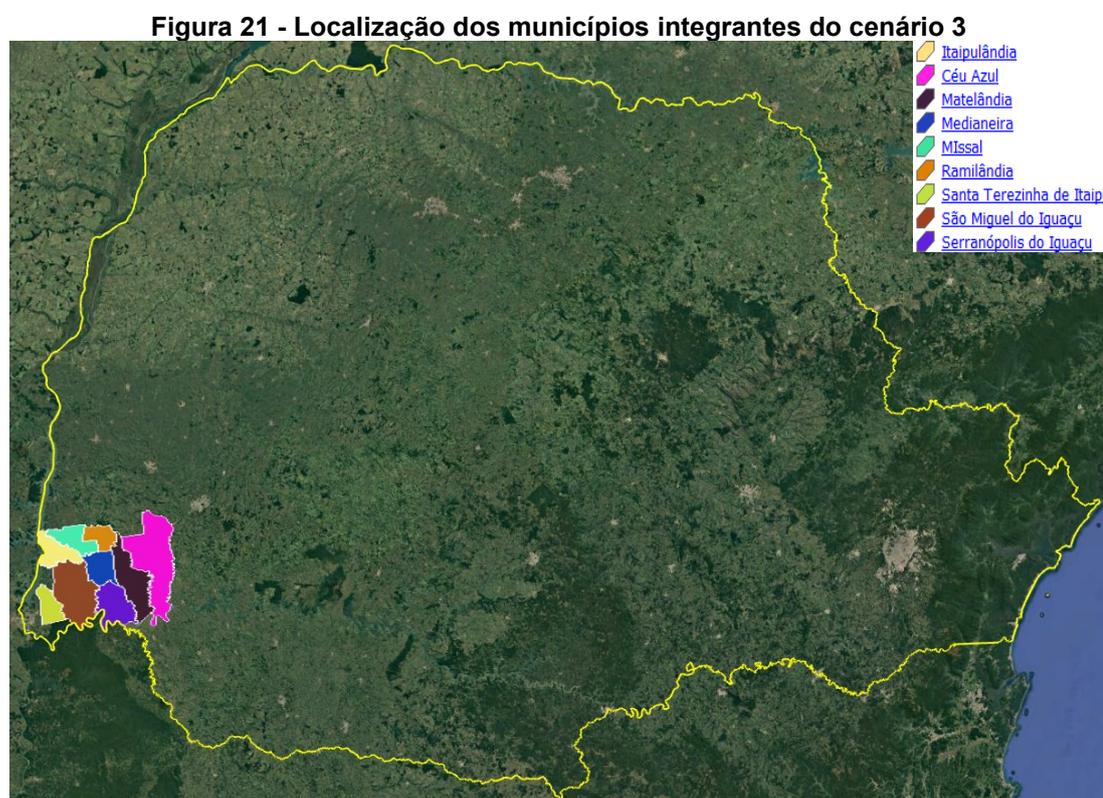
**Tabela 1 - Municípios integrantes do cenário 2**

Municípios	Distância (km)	População (hab.)
Medianeira	NA	46.940
São Miguel do Iguaçu	16	27.696
Serranópolis do Iguaçu	15	4.460
Matelândia	17	18.266
<b>Total</b>	<b>NA</b>	<b>97.362</b>

NA: Não se aplica.

Fonte: Autoria própria (2023).

O terceiro cenário é composto pelos municípios com distância de 40 km sendo eles Santa Terezinha de Itaipu, Itaipulândia, Missal, Céu Azul e Ramilândia e os municípios do cenário 2 (Figura 21).



Fonte: Google Earth Pro (2023).

A população estimada de Santa Terezinha de Itaipu é de 23.927 hab. e a economia do município está concentrada no setor de serviços, o qual é responsável por metade do PIB local de R\$ 592,2 milhões. A administração pública, a agropecuária e a indústria também possuem participação significativa na economia da cidade. Por outro lado, Itaipulândia conta com 11.588 hab. e, assim como Santa Terezinha de Itaipu, possui uma economia diversificada. Cerca de 24,2% do PIB de R\$ 452,6 milhões do município provém do setor de serviços, seguido pela indústria, administração pública e pecuária. Além disso, durante a temporada de verão, Itaipulândia recebe visitantes da região devido à presença do Balneário Jacutinga, formado pelo alagamento do lago de Itaipu (IBGE CIDADES, 2021; CARAVELA, 2023).

Ainda no cenário 3, o município de Missal conta com 10.706 hab. e atrai a maior parte dos visitantes pelos esportes, uma vez que não há pontos turísticos de

grande destaque na região. Adicionalmente, cabe salientar que sua economia tem a agropecuária como destaque, a qual representa 41,1% do PIB local de R\$ 387,5 milhões devido à sua localização no interior do estado do Paraná. O município de Céu Azul possui uma população estimada de 11.872 hab. Assim como Missal e Itaipulândia, a agropecuária é o setor que mais contribui para o PIB local de R\$ 806 milhões representando cerca de 34,2%. Em seguida, tem-se a participação dos setores de serviços e indústria, enquanto a administração pública apresenta a menor contribuição no PIB (IBGE CIDADES, 2021; CARAVELA, 2023).

O município de Ramilândia é o último constituinte do cenário 3, com uma população estimada de 4.500 hab. De acordo com as mesmas referências anteriores, a cidade apresenta PIB local de R\$ 94 milhões, sendo que 43,2% do valor adicionado é proveniente da agropecuária (IBGE CIDADES, 2021; CARAVELA, 2023). As distâncias dos municípios em relação a Medianeira e suas respectivas populações são apresentadas na Tabela 2.

**Tabela 2 - Municípios integrantes do cenário 3**

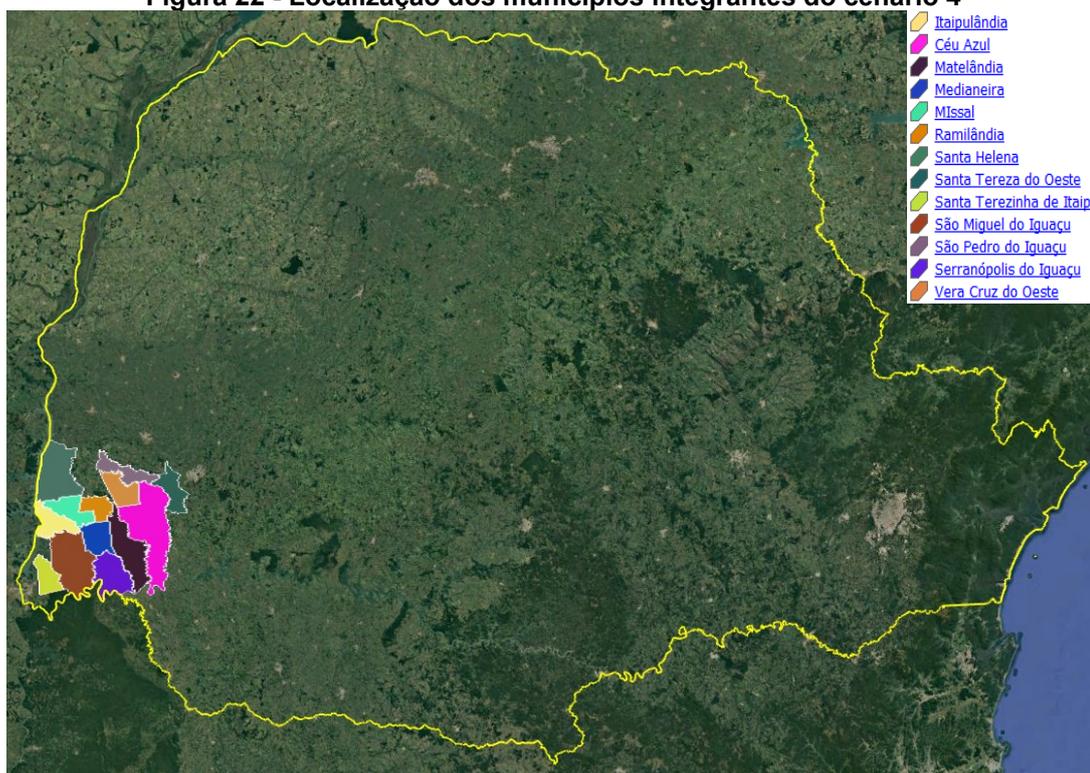
<b>Municípios</b>	<b>Distância (km)</b>	<b>População (hab.)</b>
Medianeira	NA	46.940
São Miguel do Iguaçu	16	27.696
Serranópolis do Iguaçu	15	4.460
Matelândia	17	18.266
Santa Terezinha de Itaipu	37	23.927
Itaipulândia	33	11.588
Missal	32	10.706
Céu Azul	38	11.872
Ramilândia	38	4.500
<b>Total</b>	<b>NA</b>	<b>159.955</b>

NA: Não se aplica.

**Fonte: Autoria própria (2023).**

O quarto e último cenário inclui municípios com distâncias de até 70 km, os quais são Vera Cruz do Oeste, Santa Tereza do Oeste, Santa Helena e São Pedro do Iguaçu (Figura 22).

**Figura 22 - Localização dos municípios integrantes do cenário 4**



Fonte: Google Earth Pro (2023).

O município de Vera Cruz do Oeste possui uma população estimada de 8.389 hab. e um PIB local de R\$ 334,3 milhões, sendo que 53,3% provém da agropecuária, seguido pela participação dos serviços, administração pública e indústria. Em relação a Santa Tereza do Oeste, a população estimada é de 10.055 hab. e 33,3% do PIB local de R\$ 527,1 milhões é proveniente da agropecuária, seguido pela participação de serviços, indústria e administração pública. O município de Santa Helena, por sua vez, conta com 27.036 hab. e o PIB de R\$ 1,2 bilhão possui participação de 34,3% proveniente de serviços, seguido pelo ramo da agropecuária, indústria e administração pública. Por fim, o município de São Pedro do Iguaçu possui uma população de 5.745 hab. e 56,6% do PIB total de R\$ 253,1 milhões provém da agropecuária e segue a mesma ordem de Vera Cruz para os demais setores participantes do PIB. A distância dos municípios em relação a Medianeira e suas populações são apresentadas na Tabela 3.

**Tabela 3 - Municípios integrantes do cenário 4**

<b>Municípios</b>	<b>Distância (km)</b>	<b>População (hab.)</b>
Medianeira	NA	46.940
São Miguel do Iguaçu	16	27.696
Serranópolis do Iguaçu	15	4.460
Matelândia	17	18.266
Santa Terezinha de Itaipu	37	23.927
Itaipulândia	33	11.588
Missal	32	10.706
Céu Azul	38	11.872
Ramilândia	38	4.500
Vera Cruz do Oeste	52	8.389
Santa Tereza do Oeste	64	10.055
Santa Helena	66	27.036
São Pedro do Iguaçu	68	5.745
<b>Total</b>	<b>NA</b>	<b>211.180</b>

NA: Não se aplica.

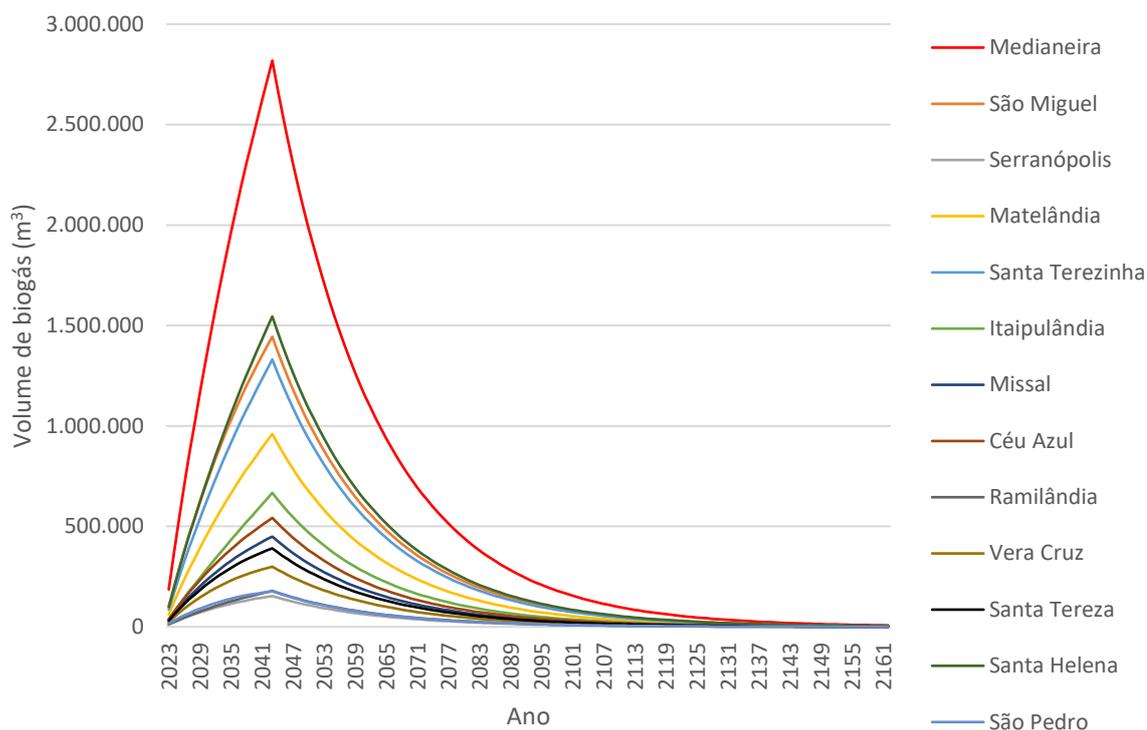
**Fonte: Autoria própria (2023).**

Os municípios em que o PIB local é predominantemente gerado pelo setor de serviços tendem a produzir mais resíduos devido às atividades comerciais que geram quantidades significantes. Por outro lado, nos municípios em que a maior parte do PIB provém da agropecuária, a quantidade de resíduos não é contabilizada de forma precisa, uma vez que as propriedades mais afastadas dos centros urbanos não contam com serviços de coleta de resíduos orgânicos. Assim, os proprietários dessas áreas costumam realizar a disposição do resíduo em trincheiras individuais, sem levar em consideração as precauções necessárias para evitar a contaminação do solo e dos lençóis freáticos.

### **5.3 Projeção de geração de biogás e metano**

O pico de produção de biogás e metano nos aterros sanitários dos municípios ocorreu no ano seguinte ao previsto para o encerramento das atividades, ou seja, em 2043, quando todo o resíduo disposto até o ano anterior foi quantificado pelo LandGEM. A Figura 23 apresenta o volume acumulado de biogás em  $m^3 \cdot ano^{-1}$  de cada município estudado.

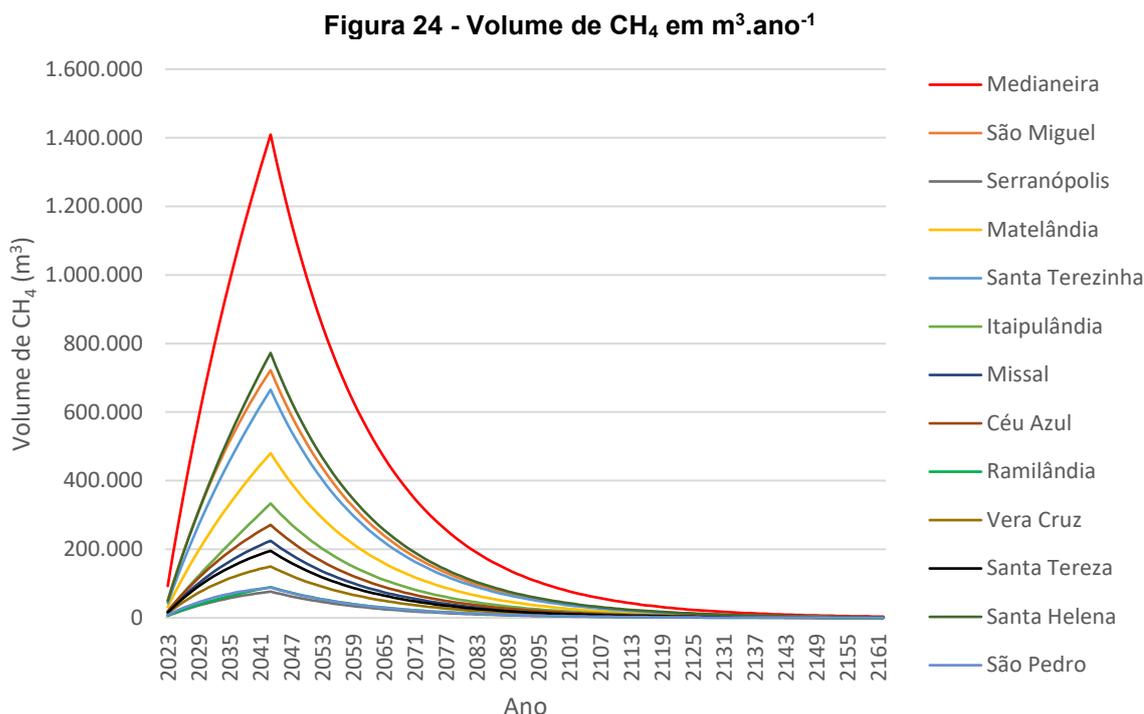
**Figura 23 - Volume de biogás em m<sup>3</sup>.ano<sup>-1</sup>**



**Fonte: Autoria própria (2023).**

A produção de biogás diminuiu gradativamente após o ano de 2042 devido ao encerramento da disposição de RSU nos aterros sanitários. Contudo, houve produção de biogás até o ano de 2162 tendo volume máximo de biogás produzido equivalente a 7.345 m<sup>3</sup>.

A projeção de geração de biogás nos aterros sanitários está diretamente relacionada à quantidade de resíduos acumulados em toneladas por ano. Em virtude disso, o município de Medianeira atingiu produção máxima de 2.818.489 m<sup>3</sup> de biogás em 2043. Por outro lado, os municípios de Ramilândia, São Pedro do Iguaçu e Serranópolis do Iguaçu apresentaram os menores picos no mesmo ano, correspondente a 179.109 m<sup>3</sup>, 176.737 m<sup>3</sup> e 153.169 m<sup>3</sup> de biogás, respectivamente. Os demais municípios atingiram produção entre 299.670 m<sup>3</sup> e 1.544.885 m<sup>3</sup> de biogás. A Figura 24 apresenta o volume acumulado de metano em m<sup>3</sup>.ano<sup>-1</sup>.



**Fonte: Autoria própria (2023).**

Assim como o biogás, a produção de CH<sub>4</sub> diminuiu gradualmente, uma vez que não havia mais disposição de resíduos nos aterros. Apesar disso, a produção de CH<sub>4</sub> continuou significativa e ainda gerou energia para as populações locais até 2162, quando o volume total de CH<sub>4</sub> produzido pelos 13 municípios não ultrapassou 3.700 m<sup>3</sup>.

O município de Medianeira alcançou o maior pico de produção de CH<sub>4</sub>, correspondente a 1.409.245 m<sup>3</sup> no ano de 2043. Em contrapartida, Santa Helena atingiu uma produção máxima de CH<sub>4</sub> equivalente a 772.443 m<sup>3</sup>. Os municípios de Ramilândia, São Pedro do Iguaçu e Serranópolis do Iguaçu apresentaram os menores picos de CH<sub>4</sub> no ano seguinte ao encerramento das atividades dos aterros sanitários, correspondendo à 89.555 m<sup>3</sup>, 88.369 m<sup>3</sup> e 76.585 m<sup>3</sup> respectivamente. Os demais municípios resultaram em produções de CH<sub>4</sub> entre 150.000 m<sup>3</sup> e 725.000 m<sup>3</sup>.

#### 5.4 Comparação de cenários

Para estimar o volume acumulado de CH<sub>4</sub> dos cenários realizados, somou-se a massa de resíduo acumulado em toneladas por ano de cada município em seus respectivos cenários, como demonstra o Quadro 3.

**Quadro 3 - Massa de resíduos gerada pelos diferentes cenários propostos**

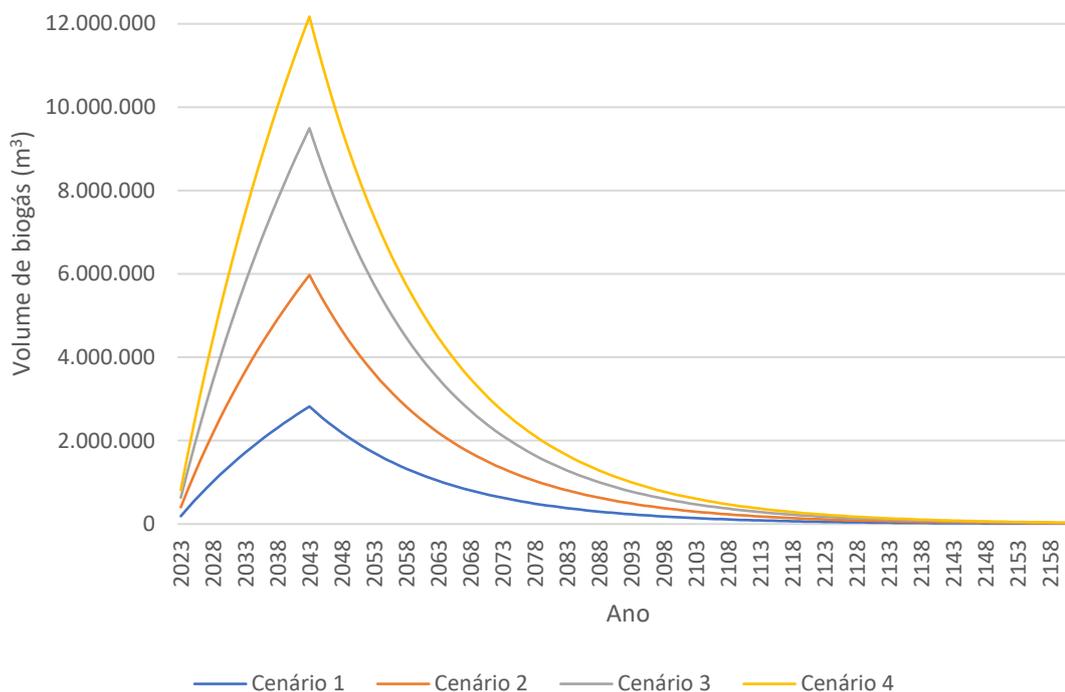
Ano	Massa total de resíduos em ton/ano			
	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
2022	11.161	21.658	34.011	44.202
2023	11.287	21.868	34.373	44.617
2024	11.413	22.080	34.739	45.035
2025	11.541	22.293	35.107	45.458
2026	11.669	22.508	35.479	45.885
2027	11.799	22.725	35.855	46.316
2028	11.929	22.942	36.233	46.752
2029	12.060	23.162	36.615	47.192
2030	12.192	23.382	37.001	47.636
2031	12.326	23.605	37.390	48.085
2032	12.460	23.828	37.783	48.539
2033	12.595	24.054	38.179	48.997
2034	12.731	24.281	38.579	49.460
2035	12.868	24.509	38.983	49.928
2036	13.005	24.739	39.390	50.401
2037	13.144	24.971	39.802	50.878
2038	13.284	25.204	40.217	51.361
2039	13.425	25.439	40.637	51.849
2040	13.568	25.676	41.060	52.341
2041	13.711	25.914	41.488	52.840
2042	13.855	26.154	41.920	53.343

Fonte: Autoria própria (2023).

No que diz a respeito ao primeiro cenário, composto exclusivamente por Medianeira, o segundo cenário apresentou aumento de 89% a 94% na massa total de resíduos. Em contrapartida, o terceiro cenário apresentou aumento de 203% a 205% na massa total de resíduos, o que pode ser explicado pelo aumento no número de municípios participantes. O mesmo acontece com o quarto cenário que apresentou aumento de 285% a 296% em relação ao Cenário 1 devido à participação de todos os municípios analisados na pesquisa.

Os volumes acumulados de biogás e metano dos cenários foram compilados de forma a realizar o comparativo entre eles. A comparação dos cenários em relação ao volume acumulado de biogás é demonstrada pela Figura 25.

**Figura 25 - Volume acumulado de biogás em m<sup>3</sup>.ano<sup>-1</sup>**

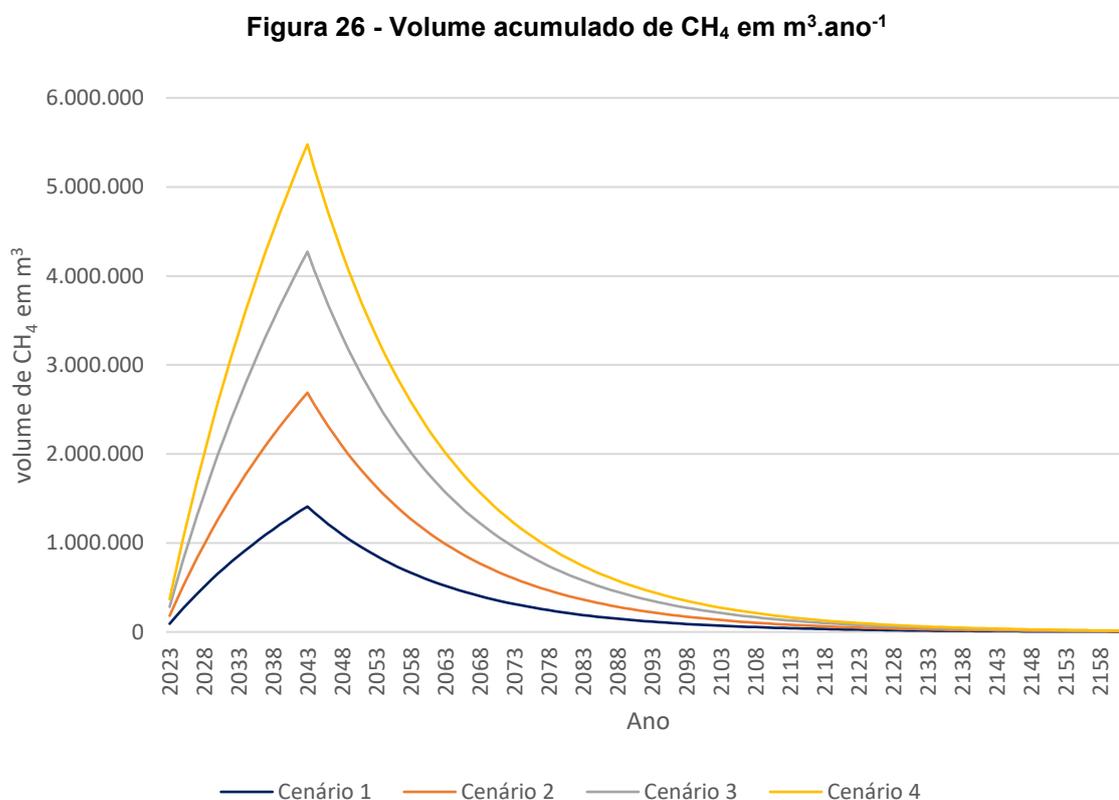


**Fonte: Autoria própria (2023).**

Como mencionado anteriormente, os picos na produção de biogás e metano se deu em 2043 devido ao encerramento das atividades do aterro quantificando todo resíduo disposto até o ano anterior. Perante a isso, o cenário 1 atingiu a produção máxima de biogás em 2.818.489 m<sup>3</sup> no ano de 2043. Já o cenário 2, composta por mais três municípios além de Medianeira, obteve produção máxima de 5.973.239 m<sup>3</sup> de biogás apresentando discrepância significativa com o primeiro cenário pela baixa quantidade de resíduo disposto nos municípios. O cenário 3 produziu 3.520.838 m<sup>3</sup> a mais que o segundo cenário, totalizando 9.494.077 m<sup>3</sup> de biogás, fato justificado pela composição de nove municípios neste cenário. Por fim, o cenário 4 obteve produção máxima de 12.174.222 m<sup>3</sup> de biogás, sendo composto pelos 13 municípios.

No entanto, a diferença de 2.680.145 m<sup>3</sup> de biogás entre o terceiro e quarto cenário revela que a inclusão dos municípios de Vera Cruz do Oeste, Santa Tereza do Oeste, Santa Helena e São Pedro do Iguaçu no último cenário não possui impacto significativo quanto a produção de biogás. Isso ocorre devido aos volumes relativamente baixos de RSU dispostos nestes municípios, o que inviabilizaria essa

opção devido à distância. A Figura 26 demonstra o comparativo dos cenários em relação ao volume acumulado de metano.



**Fonte: Autoria própria (2023).**

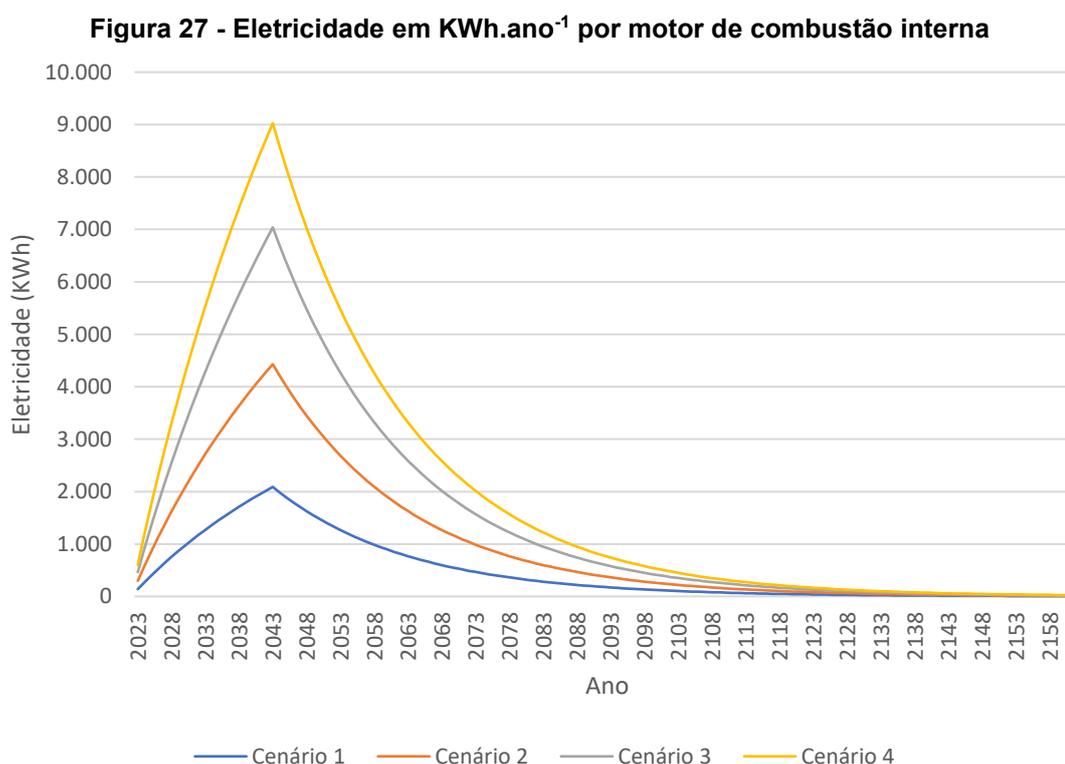
O cenário 1, composto apenas pelo município de Medianeira, obteve um volume acumulado máximo de 1.409.245 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> ano<sup>-1</sup>. No que se refere ao cenário 2, foi registrado um acúmulo de 2.687.958 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> ano<sup>-1</sup>, representando um aumento de 91% na produção de CH<sub>4</sub> em comparação com o cenário 1. O aumento pode ser explicado pelo fato de que a massa total de resíduos no segundo cenário é praticamente o dobro do primeiro.

Já o cenário 3 apresentou volume acumulado máximo de 4.272.335 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> ano<sup>-1</sup> indicando aumento de 203% do volume em relação ao Cenário 1 no ano de 2043. Esse aumento significativo se deve à inclusão de mais municípios no cenário, resultando em uma maior quantidade de resíduos dispostos e, conseqüentemente, maior acúmulo de metano. Enquanto ao Cenário 4, o volume acumulado de CH<sub>4</sub> foi de 5.478.400 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> ano<sup>-1</sup>, o que representa aumento de 289% em relação ao Cenário 1. O aumento significativo no volume acumulado de metano no quarto cenário se deve pela participação de todos os municípios analisados na pesquisa. Por outro

lado, o incremento dos novos municípios neste cenário (Santa Helena, Santa Tereza do Oeste, Vera Cruz do Oeste e São Pedro do Iguçu) pode ser inviável economicamente, pois são municípios com pouca geração de RSU e mais distantes de Medianeira.

### 5.5 Estimativa preliminar do potencial energético e custos de implantação

Para converter o biogás em energia, foi optado pelo motor a combustão devido a sua alta eficiência e baixo custo. Sendo assim, considerando 30% de eficiência do equipamento, foi obtida a energia elétrica de cada ano em MWh, representada pela Figura 27.

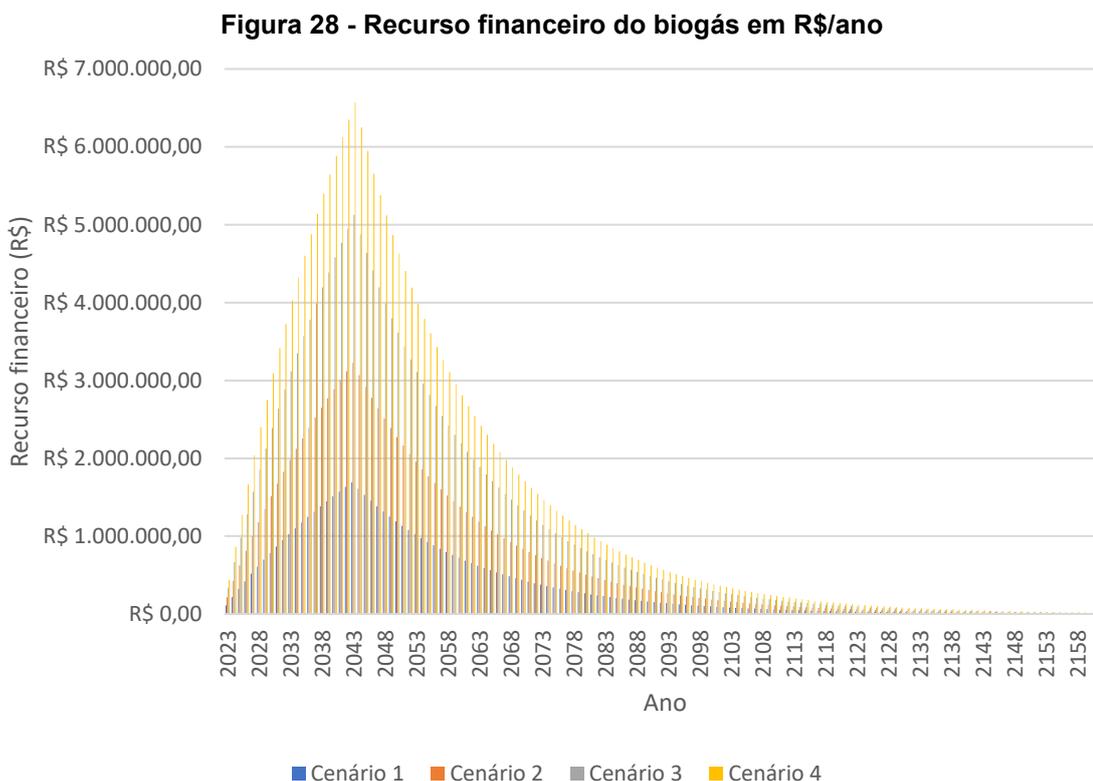


Fonte: Autoria própria (2023).

Como esperado, o cenário 4 apresentou maior pico de energia elétrica resultante em 9.027 MWh no ano de 2043 seguido pelos cenários 3, 2 e 1 com pico de 7.039, 4.429 e 2.322 MWh respectivamente. Neste mesmo ano, o cenário 1 pode abastecer até 3.252 habitantes do município de Medianeira, enquanto o cenário 2 duplica essa quantidade, atingindo 6.203 habitantes com a eletricidade gerada a partir

do biogás e indicando aumento de 212% em relação ao primeiro cenário. Já o cenário 3 possui a capacidade de fornecer eletricidade para 9.859 habitantes do município, ou seja, três vezes mais habitantes em relação ao cenário 1, indicando aumento de 337%. Quanto ao cenário 4, de maior potencial, pode fornecer energia à 12.642 habitantes, superando 432% em relação ao cenário 1.

A partir do ano de 2044, a quantidade de eletricidade gerada diminuiu gradativamente com consequência da diminuição do biogás gerado pelo aterro. Contudo, no ano de 2162, limite anual da estimativa pelo software LandGEM, os cenários tem geração de biogás que varia de 6 a 24 MWh, podendo fornecer energia para 8 a 33 habitantes do município de Medianeira. O recurso financeiro do biogás considerando as tarifas aplicadas pela COPEL é expresso pela Figura 28.



**Fonte: Autoria própria (2023).**

No ano de 2023, início da produção de biogás, o cenário 1 possui recurso financeiro de R\$ 100,1 mil seguido pelo cenário 2 com R\$ 215,9 mil o cenário 3 com R\$ 339,1 mil e o quarto cenário com R\$ 440,7 mil. No ano em que os cenários possuem pico de recurso financeiro, o primeiro cenário atinge o valor de R\$ 1,5 mi totalizando um valor acumulado de R\$ 18,5 mi nos primeiros vinte anos de operação.

O cenário 2, por outro lado, atinge um valor máximo de R\$ 3,2 mi tendo um valor acumulado de R\$ 39,5 mi entre 2023 e 2043. Já o cenário 3 praticamente triplicou o valor obtido no primeiro cenário em 2043, atingindo o valor de R\$ 5,1 mi e um valor acumulado de R\$ 62,5 mi. Por fim, o quarto cenário obteve o maior recurso financeiro em 2023 quadruplicando o valor do primeiro cenário, correspondendo a R\$ 6,5 mi e totalizando um valor acumulado de R\$ 80,5 mi.

Com isso, pode ser observado que apesar do retorno considerável proporcionado pelos cenários 3 e 4, as distâncias dos municípios integrantes em relação à Medianeira torna os projetos inviáveis, uma vez que há custos com transporte, empresas terceirizadas para coleta e manutenção de veículos, por exemplo. Tais justificativas tornam o projeto com os municípios a 20 km de distância de Medianeira mais viável pelo fato de gerar lucro em dobro em relação ao primeiro cenário e englobar cidades próximas ao local sede da pesquisa.

## 6 CONCLUSÕES

O município de Medianeira– PR foi escolhido como local sede da pesquisa a fim de criar cenários com os municípios vizinhos para viabilizar o projeto de recuperação energética. O município sede apresentou volume acumulado de RSU correspondente a 397.069 m<sup>3</sup> pelo fato de a cidade ser mais populosa em relação as demais, enquanto o município de Serranópolis do Iguaçu conta com o menor volume acumulado de RSU sendo correspondente a 22.300 m<sup>3</sup>.

Os cenários realizados para a pesquisa seguiram o critério de distância, onde o cenário 2, 3 e 4 eram formados por municípios a uma distância de 20, 40 e 70 km de Medianeira respectivamente. Dentre os cenários analisados, o cenário 2 que conta com os municípios de Medianeira, São Miguel do Iguaçu, Serranópolis do Iguaçu e Matelândia foi o mais viável economicamente.

Perante a isso, o cenário 2 obteve volume acumulado máximo de biogás de 5.973.239 m<sup>3</sup> de biogás, o que correspondeu em termos de energia a 4.429 MWh no ano de 2043 com a utilização de motor de combustão interna. A quantidade máxima de energia gerada por este cenário poderia atingir cerca de 6.200 habitantes, o que corresponde ao dobro de habitantes do cenário composto apenas por Medianeira. O recurso financeiro acumulado deste cenário refere-se a R\$ 39,5 mi entre 2023 e 2043, tendo valor máximo de R\$ 3,2 mi no ano seguinte ao encerramento das atividades do aterro sanitário.

A viabilidade do cenário 2 se encontra nos resultados serem o dobro do município de Medianeira à uma distância menor que os demais cenários compostos por um número maior de cidades. Com isso, estudos de viabilidade técnica, econômica e ambiental aplicados sobre o cenário em questão podem agregar à pesquisa e oportunizar consórcios entre os municípios.

## REFERÊNCIAS

ABRELPE: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**, 2022.

ADEKUNLE, K. F.; OKOLIE, J. A. A review of biochemical process of anaerobic digestion. **Advances in bioscience and biotechnology**, v. 06, n. 03, p. 205–212, 2015.

ALMEIDA, et al. A problemática dos resíduos sólidos urbanos. **Interfaces Científicas - Saúde e Ambiente**, v. 02, n. 01, p. 25–36, 2013.

APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21st ed.; APHA: Washington, DC, USA, 2005. **American Water Works Association/American Public Works Association/Water Environment Federation**, v. 51, n. 6, p. 940, 2005.

ASSIS, J. M. M. **A mão e a luva**. Brasil: Luis Tedeschi, 2012. Disponível em <[https://www.google.com.br/books/edition/A\\_m%C3%A3o\\_e\\_a\\_luva/qZFcAAAQBAJ?hl=pt-BR&gbpv=0](https://www.google.com.br/books/edition/A_m%C3%A3o_e_a_luva/qZFcAAAQBAJ?hl=pt-BR&gbpv=0)> Acesso em 29 mai. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10007**: Amostragem de Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro: **ABNT**, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13896**: Aterros de Resíduos Não Perigosos- Critérios para Projeto, Implantação e Operação. Rio de Janeiro: **ABNT**, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004**: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: **ABNT**, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8419**: Apresentação de Projetos de Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos. Rio de Janeiro: **ABNT**, 1992.

BRASIL, **Lei N° 11.445 de 05 de janeiro de 2007**. estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico e para a política federal de saneamento básico. Disponível em <[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm)> Acesso em 09 out.2022.

BRASIL, **Lei N° 12.305 de 02 de agosto de 2010**. Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Disponível em <[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm)> Acesso em 22 out. 2022.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente – MMA. **O que é recuperação energética?** Disponível em < <https://sinir.gov.br/suplementares/o-que-e-recuperacao-energetica/>> Acesso em 06 dez, 2022.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente – MMA. **Painel de destinação**. Disponível em <<https://www.sinir.gov.br/paineis/destinacao/>> Acesso em: 09 dez, 2022.

CAVALEIRO, A. J.; ALVES, M. M. Digestão anaeróbia. **Revista de Ciência Elementar**. v.8 (01), 2009.

CONDE, T., T.; STACHIW, R.; FERREIRA, E. Aterro sanitário como alternativa para a preservação ambiental. **Revista Brasileira de Ciências da Amazônia**, v. 3, n. 1, p. 69-80, 2014.

DUDEK, *et al.* Landfill Gas Energy Technologies. **Instytut Nafty i Gazu**. Kraków, 2010.

EDWIGES, *et al.* Comparison of various pretreatment techniques to enhance biodegradability of lignocellulosic biomass for methane production. **Journal of environmental chemical engineering**, v. 07, n. 06, 2019.

EPA: United States Environmental Protection Agency. **Landfill Gas Emission Model (LandGEM)**, 2005. Manual de Referência, v. 3. Disponível em <<https://www.epa.gov/catc/clean-air-technology-center-products#software>> Acesso em 23 nov. 2022.

EPA: United States Environmental Protection Agency. **Landfill Gas Energy Project Development Handbook**, 2021. Disponível em <<https://www.epa.gov/lmop/landfill-gas-energy-project-development-handbook>> Acesso em 11 mai. 2023.

GOMES, *et al.* Municípios formadores da Bacia do Paraná 3 e Palotina: estudos de clima, solos e aptidão das terras para o cultivo do eucalipto. Brasília, DF: Embrapa, **E-book**. Cap. 1, p. 11-16, 2020.

GOUVEIA, N. Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social. **Ciência & saúde coletiva**, v. 17, n. 06, p. 1503–1510, 2012.

GUERI, *et al.* Digestão anaeróbia de resíduos alimentares utilizando ensaios bmp. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 03, n. 01, p. 08, 2017.

HASAN, *et al.* Produção de biogás a partir de resíduos agroindustriais: análise dos teores de sólidos totais, voláteis e fixos em amostras pré e pós digestão anaeróbia. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 08, n. 01, 2019.

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**, 2006. Manual de Referência, v. 5. Disponível em <<https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol5.html>> Acesso em: 23 nov. 2022.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. DO. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. [s.l.] Airton Kunz, Ricardo Luis Radis Steinmetz, André Cestonaro do Amaral (editores Técnicos), 2019.

LOUZADA, A. B.; GIROTTO, S. B. F.; BRAATZ, K. V. Levantamento logístico da destinação de resíduos sólidos urbanos dos municípios da Amures, SC. **Open Science Research V**. [s.l.] Editora Científica Digital, 2022. p. 1030–1043.

MALAVOLTA, E. **ABC da adubação**. 5. ed. São Paulo: Ed. Agronômica Ceres, 1989.

MARCA AMBIENTAL. **Geração de energia – Biogás de aterro sanitário**, 2019. Disponível em <<https://marcaambiental.com.br/geracao-de-energia-biogas-de-aterro-sanitario/>> Acesso em 03 mai. 2023.

MORAES, B. S.; ZAIAT, M.; BONOMI, A. Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane ethanol production in Brazil: Challenges and perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 44, p. 888–903, 2015.

NADALETTI, et al. Potential use of landfill biogas in urban bus fleet in the Brazilian states: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** V 41, p. 277-283, 2015.

OLIVEIRA, C., C. Aproveitamento de Biogás de Aterro Sanitário para a Produção de Energia. **CONIC-SEMESP – 16º Congresso Nacional de Iniciação Científica**. Disponível em < <https://silo.tips/download/titulo-aproveitamento-de-biogas-de-aterro-sanitario-para-a-producao-de-energia-al>> Acesso em 04 jun. 2023.

PADILHA, L., J.; MESQUITA, L., A. Waste-to-energy effect in municipal solid waste treatment for small cities in Brazil. **Energy conversion and management**, v. 265, 2022.

PECORA, et al. **Aproveitamento do biogás proveniente dos resíduos sólidos urbanos para geração de energia elétrica: estudo de caso em São Paulo**. [s.l.] Universidade de São Paulo., s/d.

PIÑAS, et al. 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**, Rio de Janeiro, v.33, n.01, p.175-188, 2016.

PMSB: **PLANO MUNICIPAL DE SANEAMENTO BÁSICO**. Município de Medianeira-PR, 2018. Disponível em <<https://www.medianeira.pr.gov.br/Leis/pmsb.html>> Acesso em 04 out. 2022.

PORTAL RESÍDUOS SÓLIDOS. **Corte da seção de um aterro sanitário**. Disponível em <<https://portalresiduossolidos.com/aterro-sanitario/corte-da-secao-de-um-aterro-sanitario/>> Acesso em 03 mai. 2023.

RUOSO, et al. The impact of landfill operation factors on improving biogas generation in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 154, 2022.

SILLERO, et al. Techno-economic analysis of single-stage and temperature-phase anaerobic co-digestion of sewage sludge, wine vinasse, and poultry manure. **Journal of Environmental Management**. v 325, 2023.

SILVA, et al. Impactos ambientais referentes à não coleta de lixo e reciclagem. **Ciências exatas e tecnológicas**, Maceió, v. 02, n. 03, p. 63 -76. Disponível em < [periodicos.set.edu.br](http://periodicos.set.edu.br)> Acesso em 05 dez, 2022.

SINGH, et al. Factors affecting anaerobic digestion of organic waste. **International Journal of Engineering Research in Mechanical and Civil Engineering (IJERMCE)**, v. 03, n. 02, 2018.

SOARES, C. M. T.; FEIDEN, A.; TAVARES, S. G. Fatores que influenciam o processo de digestão anaeróbia na produção de biogás. **Nativa**, v. 5, 2017.

VANESSA PECORA, SÍLVIA MARIA STORTINI GONZÁLEZ VELÁZQUEZ, SUANI TEIXEIRA COELHO. **APROVEITAMENTO DO BIOGÁS PROVENIENTE DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA: ESTUDO DE CASO EM SÃO PAULO**. [s.l: s.n.].

VIEIRA, et al. Produção de biogás em áreas de aterros sanitários: uma revisão. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v. 16, n. 26, p. 101-220, 2015.

YAASHIKA, et al. A review on landfill system for municipal solid wastes: Insight into leachate, gas emissions, environmental and economic analysis. **Chemosphere**, v. 309 (01), 2022.