

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO RIO GRANDE DO SUL
UNIDADE HORTÊNSIAS
MESTRADO PROFISSIONAL EM AMBIENTE E SUSTENTABILIDADE**

Ricardo de Carly Luz Andrezza

**A GERAÇÃO QUALI-QUANTITATIVA DE METANO ATRAVÉS DA DISPOSIÇÃO
FINAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS EM ATERRO SANITÁRIO NO ESTADO DO RIO
GRANDE DO SUL**

SÃO FRANCISCO DE PAULA

2023



uergs

Universidade Estadual do Rio Grande do Sul

Hortênsias

RICARDO DE CARLY LUZ ANDREAZZA

**A GERAÇÃO QUALI-QUANTITATIVA DE METANO ATRAVÉS DA DISPOSIÇÃO
FINAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS EM ATERRO SANITÁRIO NO ESTADO DO RIO
GRANDE DO SUL**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Profissional em Ambiente e Sustentabilidade da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, Unidade Hortênsias, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ambiente e Sustentabilidade.

Orientador: Prof. Dr. Marc François Richter

Coorientadora: Prof^a. Dra. Daniela Mueller de Lara.

SÃO FRANCISCO DE PAULA - RS

2023

Catalogação de publicação na fonte (CIP)

A557g Andreazza, Ricardo de Carly Luz

Geração quali-quantitativa de metano através da disposição final de resíduos sólidos em aterro sanitário no estado do Rio Grande do Sul, A/ Ricardo de Carly Luz Andreazza. – São Francisco de Paula: Uergs, 2023.

135 f. il.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, Mestrado Profissional em Ambiente e Sustentabilidade, Unidade Hortênsias, 2023.

Orientador: Prof. Dr. Marc François Richter

Coorientadora: Prof.^a Dra. Daniela Mueller de Lara

1. Gases de Efeito Estufa. 2. Aterro Sanitário. 3. Metano. 4. Dissertação. I. Richter, Marc François. II. Lara, Daniela Mueller de. III. Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, Mestrado Profissional em Ambiente e Sustentabilidade, Unidade Hortênsias. IV. Título.

RICARDO DE CARLY LUZ ANDREAZZA

**A GERAÇÃO QUALI-QUANTITATIVA DE METANO ATRAVÉS DA DISPOSIÇÃO
FINAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS EM ATERRO SANITÁRIO NO ESTADO DO RIO
GRANDE DO SUL**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Profissional em Ambiente e Sustentabilidade da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, Unidade Hortênsias, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ambiente e Sustentabilidade.

Orientador: Prof. Dr. Marc François Richter

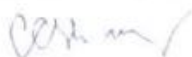
Coorientadora: Prof^a. Dra. Daniela Mueller de Lara.

Aprovada em: 10/07/2023.

BANCA EXAMINADORA:



Orientador Prof. Dr. Marc François Richter
Universidade Estadual do Rio Grande do Sul – UERGS



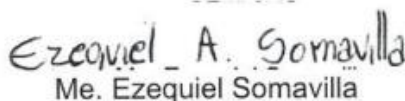
Prof. Dr. Celmar Corrêa de Oliveira
Universidade Estadual do Rio Grande do Sul - UERGS



Dra. Marjorie Kauffmann
Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura do Estado do Rio Grande do Sul –
SEMA/RS



Dra. Isa Carla Osterkamp
Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura do Estado do Rio Grande do Sul –
SEMA/RS



Me. Ezequiel Somavilla
Companhia Riograndense de Valorização de Resíduos – CRVR

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por conceder a vida, saúde e a oportunidade de desenvolver o presente estudo.

Agradeço aos meus orientadores Prof. Dr. Marc François Richter e Prof^a. Dra. Daniela Mueller de Lara, pela colaboração, atenção e apoio. Minha gratidão. Nunca esquecerei de vocês.

A minha Vózinha querida, mãe, pai e meus irmãos. Amo vocês.

A minha esposa pelo apoio e paciência nas horas mais difíceis.

Aos demais familiares e amigos pelas palavras de apoio.

Aos meus colegas, mesmo durante a Covid-19 conseguimos vencer.

Aos professores do PPGAS/UERGS-Unidade Hortênsias que pude conhecer e absorver distintos conhecimentos das disciplinas realizadas.

Ao grupo de pesquisa CNPq/PGPD, por permitir ações de pesquisa e produção científica.

Agradeço à FEPAM/SEMA em especial a Dr^a. Marjorie Kauffmann e a Dr^a. Isa Carla Osterkamp, por oportunizar e confiar na realização deste estudo. Minha gratidão a vocês.

Agradeço a CRVR e toda sua equipe, em especial ao colaborador Me. Ezequiel Somavilla, pelo suporte necessário durante a coleta de dados.

Ao especialista e pesquisador Me. Thiago Pimenta Viana, que compartilhou conhecimento das metodologias e quantificação de GEE. Minha gratidão.

A UERGS/Unidade Guaíba ao Prof. Dr. Celso Maciel da Costa e discente de graduação Natan Teixeira Manique, pela colaboração durante o desenvolvimento do software. Meus sinceros agradecimentos.

Saliento a minha realização com este objetivo alcançado, que desencadeou diversas oportunidades, crescimento pessoal e profissional. Obrigado a cada um que contribuiu para que este objetivo fosse alcançado!

RESUMO

O estudo buscou observar a presença do metano enquanto Gás de Efeito Estufa (GEE), no contexto das mudanças climáticas inserido em aspectos conceituais, regulatórios, setores econômicos, e método de cálculo, sendo o biogás oriundo da atividade de um aterro sanitário localizada no município de Minas de Leão/RS – Brasil. A dissertação se divide em 3 artigos científicos e 4 produtos. O artigo 1 relata a abordagem da educação ambiental e do gás metano, um dos gases de efeito estufa, no atual cenário na busca da sensibilização e transformação do comportamento para a redução dos impactos ambientais. O artigo 2 apresenta os resultados obtidos por meio do uso aplicado da Metodologia ACM0001: Queima ou uso de gás de aterro Versão 19.0 – Ferramenta 04 de Emissões de Disposição final de resíduos sólidos - Versão 08.0, elaborado pelo Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). Essa aplicação resultou na estimativa do gás metano e seus complementos gerado nas condições estabelecidas pela atividade de aterro sanitário entre os anos de 2001 e 2021, utilizando como referência, o aterro sanitário central de resíduos do recreio, localizado no referido município de Minas do Leão. O terceiro capítulo trata da compilação dos resultados produzidos no artigo 2 e da metodologia e equação de decaimento de primeira ordem utilizada, ACM0001: Queima ou uso de gás de aterro Versão 19.0 – Ferramenta 04 do MDL, por meio da elaboração do objeto tecnológico de um software que permite obter valores de GEE de forma facilitadora. Por fim, quatro produtos tecnológicos resultantes desta dissertação foram entregues. O primeiro, um produto tecnológico sobre o software citado no terceiro artigo, para estimativa do gás metano em aterro sanitário. Já o segundo produto trata-se de um manual para uso do software e da metodologia utilizada para produção dos resultados de metano, como recomendação de uso ao poder público. O terceiro envolve um relatório técnico em parceria com o poder público sendo uma compilação dos dados sobre quantidades de metano obtidos no aterro sanitário no município de Minas do Leão/RS. O quarto, é um produto tecnológico, sendo um aplicativo de celular. Ambos os produtos, entregues para FEPAM/SEMA do Estado do Rio Grande do Sul, devem ser vistos como produtos que facilitam um desempenho futuro no assunto do metano, como GEE.

Palavra-Chave: Gases de Efeito Estufa. Metano. Resíduos. Aterro Sanitário. ACM0001.

ABSTRACT

The present study sought to observe the presence of methane as a Greenhouse Gas (GHG), in the context of climate change inserted in conceptual aspects, regulatory, economic sectors, and calculation method, being the biogas from the activity of a landfill located in the municipality of Minas de Leão/RS - Brazil. The dissertation is divided into 3 scientific articles and 4 products. Article 1 reports the approach of environmental education and methane gas, one of the greenhouse gases, in the current scenario in the search for awareness and transformation of behavior to reduce environmental impacts. Article 2 presents the results obtained through the applied use of the Methodology ACM0001: Landfill gas flaring or use – version 19.0 – Solid Waste Final Disposal Emissions Tool 04 - Version 08.0, prepared by the Clean Development Mechanism (CDM). This application resulted in the estimation of methane gas and its complements generated in the conditions established by the landfill activity between the years 2001 and 2021, using as reference, the central landfill of recreational waste, located in the referred municipality of Minas do Leão. The third chapter deals with the compilation of the results produced in article 2 and the methodology and first order decay equation used, ACM0001: Landfill gas flaring or use Version 19.0 – CDM Tool 04, through the elaboration of the technological object of a software that allows obtaining GHG values in a facilitating way. Finally, four technological products resulting from this dissertation were delivered. The first one, a technological product about the software mentioned in the third article, for methane gas estimation in landfill. The second product is a manual for the use of the software and the methodology used to produce the methane results, as a recommendation for use by the public authorities. The third one involves a technical report in partnership with the public power being a compilation of the data on the amount of methane obtained in the landfill in the municipality of Minas do Leão/RS. The fourth one is a technological product, being a mobile phone application. Both products, delivered to FEPAM/SEMA of Rio Grande do Sul State, must be seen as products that facilitate a future performance on the subject of methane, as GHG.

Keywords: Greenhouse Gases. Methane. Waste. Landfill. ACM0001.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Estrutura da dissertação ...	21
Figura 2 - Mapa geopolítico da localização do estudo	24
Figura 3 - Composição gravimétrica dos resíduos sólidos no Brasil.	26
Figura 4 - Equação do MDL-ACM0001/Tool 04 empregada na pesquisa	32
Figura 5 - Vista aérea do local da área do Aterro Sanitário CR do Recreio	
Erro! Indicador não definido.	
Figura 6 - Total de Metano produzido em toneladas entre 2001 a 2021 no Aterro Sanitário Central de Resíduos do Recreio	68
Figura 7 - Quantidade produzida e capturada de metano em toneladas entre 2001 a 2021 no Aterro Sanitário Central de Resíduos do Recreio.....	70
Figura 8 - Total de carbono equivalente (CO _{2e}) em toneladas entre 2001 a 2021 no Aterro Sanitário Central de Resíduos do Recreio.....	71
Figura 9 - Comparação da estimativa de CH ₄ com as RCE's no Aterro Sanitário da Central de Resíduos do Recreio.	72
Figura 10 - Projeção de metano em toneladas entre 2022 e 2030 no Aterro Sanitário da Central de Resíduos do Recreio.	74
Figura 11 - Projeção de carbono equivalente entre 2022 e 2030 no Aterro Sanitário da Central de Resíduos do Recreio.	74
Figura 12 - Estimativa por Tipo de Resíduo (j) em toneladas entre 2001 a 2021 disposto no aterro sanitário.	76
Figura 13 - Estimativa j de Alimentos em toneladas entre 2001 a 2021 disposto no aterro sanitário.	77
Figura 14 - Estimativa de j Papéis em toneladas entre 2001 a 2021 disposto no aterro sanitário.....	78
Figura 15 - Estimativa de j Jardins em toneladas entre 2001 a 2021 disposto no aterro sanitário.....	79
Figura 16 - Estimativa de j Têxteis em toneladas entre 2001 a 2021 disposto no aterro sanitário.....	80
Figura 17 - Estimativa de j Madeiras e derivados em toneladas entre 2001 a 2021 disposto no aterro sanitário.	81
Figura 18 - Esquema modelo cliente/servidor.....	93

Figura 19 - Gráfico dos Resíduos Sólidos Urbanos por tipologia e escala temporal.	95
Figura 20 - Gráfico Metano (t) com cenários Recomendado e Conservador.....	96
Figura 21 - Gráfico Biogás (Nm ³) com os cenários Biogás e Metano.....	96
Figura 22 - Exemplo somatório por ano e por resíduo depositado.....	97
Figura 23 - Somatório por ano e unidade de gás estufa.....	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Quantidade recebida de Resíduos Sólidos Urbanos no Aterro Sanitário da Central de Resíduos do Recreio, Minas de Leão/RS, Brasil.	24
Tabela 2 - Conjunto de ferramentas inseridas na metodologia ACM0001.	30
Tabela 3 - Valores das estimativas de metano em t e Nm ³ no aterro sanitário.	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CH ₄	Gás Metano
CO ₂	Dióxido de carbono
CO _{2e}	Gás Carbônico Equivalente
CIMGC	Comitê Interministerial sobre Mudança do Clima
CRR	Central de Resíduos do Recreio
CRVR	Companhia Riograndense de Valorização de Resíduos
FEPAM	Fundação Estadual de Proteção Ambiental
FORSU	Fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos
GEE	Gases de Efeito Estufa
Gt	Giga Toneladas
H ₂	Hidrogênio
H ₂ S	Gás sulfídrico
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
Mt	Milhões de Toneladas
N ₂	Nitrogênio
N ₂ O	Óxido nitroso
NH ₃	Amoníaco
O ₂	Oxigênio
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PIUP	Produção Industrial e Uso de Produtos
PLANARES	Plano Nacional de Resíduos Sólidos
PNMC	Política Gaúcha sobre Mudanças Climáticas
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RCE's	Reduções Certificadas de Emissões

RS	Rio Grande do Sul
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SEEG	Sistemas de Estimativa de Emissão de Gases
SGA	Sistema de Gestão Ambiental
SNIS	Sistema Nacional de Saneamento
TAPC	Termo de Autorização de Pesquisa Científica
UERGS	Universidade Estadual do Rio Grande do Sul
UNFCCC	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas
SWDS	Locais de Disposição de Resíduos Sólidos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 OBJETIVOS	22
2.1 OBJETIVO GERAL.....	22
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	22
3 METODOLOGIA	23
3.1 DETALHAMENTO METODOLÓGICO.....	23
3.1.1 Coleta de dados do aterro sanitário	23
3.1.2 Coleta de dados do índice gravimétrico	25
3.1.3 Coleta de dados da média pluviométrica	26
3.1.4 Coleta de dados da média de temperatura	27
3.1.5 Coleta de dados do índice de aridez	27
3.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS.....	27
3.2.1 Metodologia ACM0001 - Queima e/ou uso de gás de aterro	29
3.2.2 Modelo CDM Tool 04 para estimativa de metano	31
4 RESULTADOS	40
4.1 ARTIGO 1 - EDUCAÇÃO AMBIENTAL E GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE): UMA ABORDAGEM DO PAPEL DO METANO PARA EDUCAÇÃO BÁSICA.....	40
4.1.1 Introdução	41
4.1.2 Efeito Estufa: aspectos históricos e natural	42
4.1.3 Efeito Estufa: aspectos históricos e antrópico	43
4.1.4 Metano: sua química	48
4.1.5 Metano como gás do efeito estufa	48
4.1.6 Metano, ozônio e a saúde humana	49
4.1.7 Desafios de aproveitar o metano produzido por ação antrópica	51
4.1.8 Considerações finais	52
REFERÊNCIAS	55
4.2 ARTIGO 2 - ESTIMATIVA DO CH ₄ GERADO EM ATERRO SANITÁRIO COM O USO DA METODOLOGIA ACM0001.....	61
4.2.1 Introdução	61
4.2.2 Passos metodológicos	63
4.2.3 Resultados e Discussão	64

4.2.3.1 Projeto de MDL: Aterro Sanitário da Central de Resíduos do Recreio.....	66
4.2.3.2 Projeção de Metano (CH ₄)	67
4.2.3.3 Projeção de Dióxido De Carbono Equivalente (CO _{2e}).....	71
4.2.3.4 Projeção de Metano até 2030	73
4.2.3.5 Projeção por Índice de Tipo de Resíduo (j)	75
4.2.3.5.1 Resíduos de Alimentos.....	77
4.2.3.5.2 Resíduos de Papéis	77
4.2.3.5.3 Resíduos de Jardins.....	78
4.2.3.5.4 Resíduos de Têxteis.....	79
4.2.3.5.5 Resíduos de Madeiras.....	80
4.2.3.6 Estimativa de Biogás a partir do Metano.....	81
4.2.4 Considerações finais	84
REFERÊNCIAS.....	84
4.3 ARTIGO 3 - DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA COMPUTACIONAL PARA CÁLCULO DA ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE CH ₄ E DEMAIS UNIDADES DE GEE A PARTIR DE GASES GERADOS NOS ATERROS SANITÁRIOS DE RESÍDUOS SÓLIDOS	88
4.3.1 Introdução.....	92
4.3.2 Metodologia.....	92
4.3.2.1 Metodologia ACM0001:Queima e/ou uso de gás de aterro.....	92
4.3.2.2 CDM Tool 04.....	93
4.3.2.3 Software EstimaGas.....	94
4.3.3 Resultados.....	95
4.3.4 Conclusões.....	99
REFERÊNCIAS.....	100
5 PRODUTOS TÉCNICOS.....	104
5.1 PRODUTO 1 – SOFTWARE DE MEDIÇÃO DE GÁS METANO ESTIMAGÁS ...	105
5.2 PRODUTO 2 – MANUAL TÉCNICO PARA USO DO SOFTWARE VOLTADO A FERRAMENTA EMISSÕES DE LOCAIS DE DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DO MDL.....	108
5.3 PRODUTO 3 - RELATÓRIO TÉCNICO SOBRE AS PROJEÇÕES METANO..	109
5.4 PRODUTO 4 - APLICATIVO PARA SMARTPHONE SOBRE GÁS METANO..	110
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	112

REFERÊNCIAS.....	114
ANEXOS	117
ANEXO I - Perguntas norteadoras.	117
ANEXO II - Manual técnico para uso do Software EstimaGas.	118
ANEXO III - Relatório de dados das Projeções de Metano.....	131

1 INTRODUÇÃO

Os índices do Brasil vêm aumentando em termos de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) e, em 2020, as taxas cresceram 9,5%, em relação a 2019. Dados ressaltam que durante a pandemia Covid-19 houve redução de aproximadamente de 7%, tal fato refere-se à redução de atividades produtivas, a circulação de pessoas e mercadorias. Estima-se que em 2020 o país emitiu cerca de 2,16 bilhões de toneladas de Gás Carbônico Equivalente (Gt CO_{2e}) no ambiente, o maior nível desde 2006 segundo o Observatório do Clima (RELATÓRIO LUZ, 2022).

Da mesma forma, este reflexo pode ser apurado no aumento na geração de resíduos, sobretudo os descartáveis, com máscaras, frascos de álcool e embalagens de isopor de refeições despejados nos depósitos. Apesar da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída desde 2010, entre 2019 e 2020 houve redução dos municípios com coleta seletiva de 38,7% para 36,3%, respectivamente, e aumento da geração de Resíduo Sólido Urbano (RSU) de 390 kg⁻¹/hab⁻¹/ano⁻¹ em 2020 contra 379,2 kg⁻¹/hab⁻¹/ano⁻¹ em 2019. Tampouco foi instituída nem incentivada, em larga escala, a coleta de resíduos recicláveis, compostáveis e rejeitos, em afronta à PNRS, que prevê que só o rejeito poderia ser destinado aos aterros sanitários (RELATÓRIO LUZ, 2022).

Tais fatos acima elencados estão diretamente ligados as emissões de metano (CH₄) e de acordo com o SEEG (2022), o setor de resíduos deve subir 25,8% até 2030 as emissões de GEE ligadas as atividades do setor. No entanto, ao adotar medidas condizentes com o arcabouço legislativo nacional para resíduos, pode-se alcançar uma redução de 6,5%, podendo-se alcançar o potencial de redução de cerca 36% (2022-2030) com mais ambição nas estratégias de mitigação propostas. Ademais, a produção de RSU pela população das cidades tende a aumentar com o passar dos anos, uma vez que o perfil de consumo das pessoas tende a gerar maior quantidade de resíduos e a própria população tem uma projeção de crescimento (ABRELPE, 2019).

Efetivamente a falta de planejamento para enfrentar as mudanças climáticas aumenta as desigualdades entre países e pessoas, afetando a qualidade de vida, principalmente em áreas já marcadas pela vulnerabilidade social (RELATÓRIO LUZ, 2022). Ao menos que o comportamento de cada atividade visto a necessidade de adaptação e mitigação, estabeleça um planejamento estratégico que corrobora na

melhoria dos processos ao executar procedimentos de verificação para ações em seu entorno.

Em cada setor econômico existe uma parcela de cada tipo de GEE contendo o fracionamento desses gases por categoria, resultantes de atividades comerciais responsáveis pela geração destes gases. De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC), que fornece diretrizes para inventários nacionais de emissão de GEE, incluindo as emissões de metano da disposição de resíduos sólidos, modelos são propostos em suas três publicações: IPCC (1997), IPCC (2000) e IPCC (2006). Cada publicação tem diferentes maneiras de tratar o modelo matemático chamado de Decaimento de Primeira Ordem (DPO), que considera a variação anual das emissões de metano, neste caso, geração de metano. Esses modelos são também as raízes da metodologia utilizada para estimar as emissões de linha de base de uma atividade de projeto sobre mitigação de metano dos aterros no âmbito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), em Inglês, “Clean Development Mechanism” (CDM) (SANTOS, 2014).

Neste sentido, a modelagem matemática pode ser uma ferramenta essencial apesar de superestimar um objeto definido para geração de metano em aterro sanitário. Se aplicada como uma primeira abordagem para compreender o quanto um aterro sanitário pode gerar de gás de aterro, torna-se consequente saber o potencial de emissão de GEE se liberado para atmosfera.

Conforme o Comitê Interministerial sobre Mudança do Clima (CIMGC), desde a implementação do MDL até janeiro de 2016, havia o registro de 7.690 atividades de projeto de MDL. O Brasil é um dos três países com maior número de projetos (339, ou 4,4% do total), seguindo Índia (1.598, ou 20,8%) e China (3.764, ou 48,9%) (IPEA, 2018)

Do mesmo modo, com o objetivo de impulsionar a redução dos GEE e fomentar o desenvolvimento e a implantação de tecnologias mais eficientes e sustentáveis, os governos de países, mas também as empresas têm à disposição alguns mecanismos, entre eles o Mercado de Créditos de Carbono. Essa estratégia, segue métricas estabelecidas pelo Protocolo de Kyoto em 2005, substituído pelo Acordo de Paris em 2015, no qual 1 (uma) tonelada de CO₂ é transformada em 1 (um) crédito de carbono. Nesse contexto, as organizações integrantes possuem cotas individuais de emissões. Ficando abaixo do estabelecido, essas cotas podem ser convertidas em moeda de

troca com aquelas empresas que ultrapassaram suas metas e precisarão “limpar” suas emissões (FULLER, 2020).

Nessa perspectiva, um modelo de geração de gás de aterro (também chamado de biogás) é uma ferramenta importante para gestores públicos cuja função é fornecer uma estimativa do metano gerado ou do volume total de gás de aterro ao longo do tempo a partir de um volume de resíduos específico. O objetivo de um modelo é, representar uma hipótese, em termos simples, o cenário das alterações complexas verificadas durante a decomposição dos resíduos em um aterro, baseando-se no princípio da conservação da massa (ABRELPE, 2012).

A exemplo de muitos estudos, tanto laboratoriais como de campo, sugerem que a geração de metano no aterro sanitário pode ser aproximada por um modelo matemático cinético de primeira ordem. E com isto, diversos modelos têm sido propostos, adotando essa premissa (NASCIMENTO et al., 2019; PIÑAS et al., 2016; SANTOS et al., 2017; VIEIRA; CANDIANI, 2021).

Constatou-se a importância que metodologias de cálculo mais apuradas sejam usadas para a determinação de valores referente a quantidade de CH₄ nas atividades econômicas, neste caso em aterro sanitários, sendo uma informação valiosa para gestores públicos em nível municipal, estadual e nacional. Os dados gerados pelo projeto poderão auxiliar no planejamento da Fundação Estadual de Proteção Ambiental (FEPAM) na promoção de discussões junto ao governo estadual e sociedade sobre questões relativas às mudanças climáticas e também da Companhia Riograndense de Valorização de Resíduos (CRVR), partícipe e colaboradora de informações para o desenvolvimento deste estudo.

Verificou-se ao longo desta pesquisa, a falta de uma instrução normativa específica por parte do órgão fiscalizador para recomendar o controle e monitoramento sobre os GEE diante da disposição final de resíduos sólidos urbanos, no âmbito do Estado do Rio Grande do Sul. Segundo a FEPAM (2017), a Diretriz Técnica nº 04/2017, para o Licenciamento Ambiental da Atividade de Disposição Final de Resíduos Sólidos Urbanos, informa as diretrizes gerais sobre a obrigatoriedade de elementos contidos para cada fase, durante o processo de licenciamento ambiental da atividade, mas não consta a exigência do reporte das emissões. As obras de instalação e o funcionamento de aterros sanitários devem ser conduzidos em conformidade com a norma técnica da ABNT/NBR 13.896/97 ou substituta, e as legislações vigentes.

Tal como, a Portaria FEPAM nº 32/2016, estabelece os critérios e as diretrizes para elaboração do Relatório de Auditoria Ambiental, que deverão ser considerados para aterros sanitários de grande e excepcional porte. A execução das auditorias ambientais, adesão voluntária ao Sistema de Gestão Ambiental (SGA), tem como requisito os registros de monitoramento e medições das fontes de emissões para o meio ambiente ou para os sistemas de coleta e tratamento de resíduos sólidos, efluentes e emissões (FEPAM, 2016).

Da mesma forma, a empresa CRVR opera no estado do Rio Grande do Sul com foco na área de valorização de resíduos. O Aterro Sanitário da Central de Resíduos do Recreio (CRR), iniciou suas operações em outubro de 2001 e na época foi projetado para ser a mais completa estrutura disponível para tratamento e destinação de resíduos sólidos urbanos (RSU) no Estado do Rio Grande do Sul. O aterro sanitário foi implantado no vale de uma cava de mineração inativa sob a operação de mina de carvão (CDM-PDD, 2014).

Em seguida, no ano de 2015 inaugurou-se uma unidade de geração de energia elétrica no referido aterro sanitário, tendo como combustível o aproveitamento do biogás obtido da decomposição dos rejeitos depositados. A unidade geradora tem uma potência de 8,5 MWh, podendo atender uma população de aproximadamente 100 mil habitantes (CRVR, 2020). Atualmente, a quantidade destinada na média de 1 Milhão de Toneladas (Mt) RSU.ano⁻¹, com porte exponencial e o potencial de emissão de GEE, o local de pesquisa tem o aterro sanitário Central de Resíduos do Recreio situado no município de Minas do Leão – RS, operado pela empresa Companhia Riograndense de Valorização de Resíduos (CRVR). A unidade recebe cerca de 40% de todo o rejeito gerado diariamente no RS, proveniente de mais de 100 municípios gaúchos.

Diante do contexto exposto ao encontro do objeto delineado deste estudo, foi definido o modelo e método aplicado pela Convenção-Quadro das Nações Unidas para as Mudanças Climáticas (United Nations Framework Convention on Climate Change – UNFCCC), chamada ACM0001-Queima ou uso de gás de aterro – versão 19.0 (UNFCCC, 2019), para obter o conhecimento da quantidade de Gás metano produzido em aterro sanitário.

Além disso, os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) - Agenda 2030 elaborados pela Organização das Nações Unidas (ONU, 2021), foram lembrados. Nesta pesquisa, 3 ODS's (ODS 7, ODS 11 e ODS 13) tem relação com o

objeto. O uso do Metano do biogás diversificando a participação das energias renováveis na matriz energética (ODS 7), a redução do impacto ambiental negativo da qualidade do ar diante da coleta e destinação final adequada dos resíduos sólidos para aterro sanitário com sistemas de qualidade (ODS 11), e o fortalecimento de políticas e estratégias de conscientização institucional para a promover a mitigação quanto a emissão dos gases de efeito estufa ao combate das mudanças clima (ODS 13).

Para melhor entendimento dos estudos realizados, dividiu-se este estudo em capítulos: o primeiro refere-se a uma revisão bibliográfica, que foi um estudo que serviu de subsidio inicial para compreender o assunto transversal sobre os GEE, temática do metano e o setor de resíduos no âmbito da educação ambiental. Este artigo foi publicado no ano de 2021 na Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA).

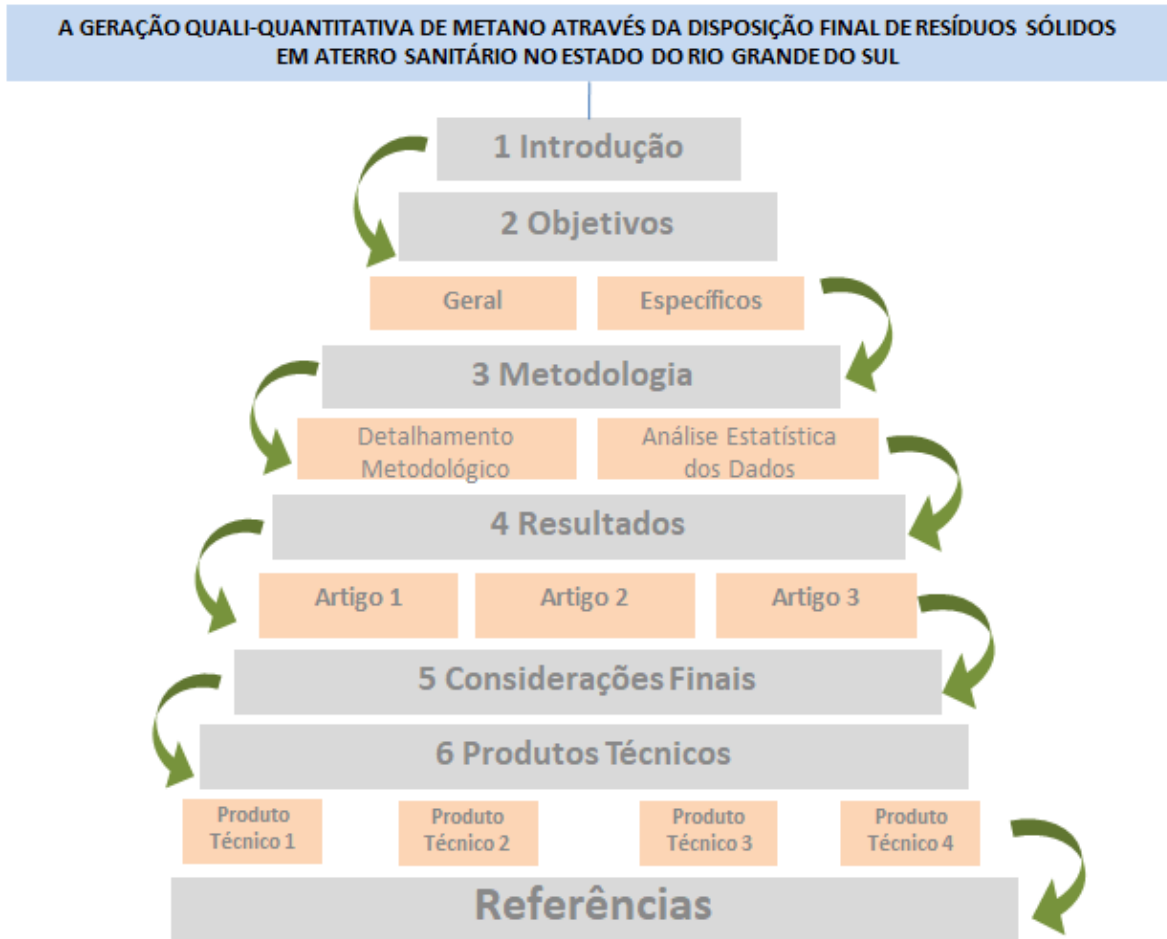
O segundo artigo trata-se de uma pesquisa exploratória com viés quantitativo e qualitativo, ao tratar da estimativa realizada de CH₄ em aterro sanitário com formato retroativo, futurista como também, mencionando cada fração de resíduo que produz o gás, publicado em revista específica no tema. Do mesmo modo, o terceiro artigo refere-se a uma pesquisa exploratória com viés quantitativo a respeito da elaboração e uso de um software, consonante as estimativas de CH₄. A ferramenta computacional atua como facilitador à informação do gás produzido, publicado em uma revista da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), ambos respectivamente em 2023.

Ainda, exigido pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) para dissertações em mestrados profissionais, ao menos um produto técnico, ocorreram à produção de quatro produtos técnicos: o primeiro produto trata de um Software/Aplicativo (Programa de computador) já mencionado na projeção de CH₄. Já o segundo produto, refere-se a um Manual/Protocolo para uso do software de forma auxiliadora para acessar os dados desenvolvidos de CH₄ e/ou realizar os cálculos. O Terceiro é um relatório técnico em parceria com o poder público. Por fim, o quarto produto trata de um Software/Aplicativo (Programa de celular) sendo para uso em celular/smartphone.

Enfim, os resultados da pesquisa e os produtos gerados, além atribuir ao repositório científico da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS), foram entregues à Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luís Roessler (FEPAM), à Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Infraestrutura (SEMA/RS), e a

Companhia Riograndense de Valorização de Resíduos (CRVR), colaborando de forma transversal, para a discussão de estudos sobre emissões de Gases de Efeito Estufa do Estado do Rio Grande do Sul – RS.

Figura 1 – Estrutura da dissertação.



Fonte: Autor (2023).

2 OBJETIVOS

Ficam estabelecidos o objetivo geral e específicos da pesquisa.

2.1 OBJETIVO GERAL

Contextualizar o gás metano (CH_4) e a quantificação dos valores gerados provenientes da disposição final de resíduos sólidos urbanos com o uso da metodologia do MDL, ACM0001 v.19, no aterro sanitário central de resíduos do Recreio, localizado no município de Minas do Leão - RS, no período de 2001 a 2021.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Aplicar a metodologia de decaimento de primeira ordem para projetar os valores de CH_4 , em aterro sanitário no Estado do RS;
2. Realizar uma projeção do volume de gases produzidos pelo Aterro Sanitário Central de Resíduos do Recreio no município de Minas do Leão/RS, entre o período de 2001 a 2021;
3. Realizar diferentes cenários com o emprego da fórmula CDM Tool 04 da metodologia ACM0001 para a atividade de aterro sanitário;
4. Desenvolver um *software* e *aplicativo* para medir e apresentar de forma facilitadora os volumes de gases produzidos em aterro sanitário;
5. Fornecer subsídios de CH_4 e de CO_{2e} produzidos no aterro sanitário em Minas de Leão para FEPAM/RS, colaborando para compreensão e elaboração de estudos sobre emissões de Gases de Efeito Estufa do Estado do Rio Grande do Sul.

3 METODOLOGIA

A partir do objetivo geral, a pesquisa aplicou o caráter exploratório. Gil (2008) salienta que a pesquisa exploratória visa procurar a investigação, proporciona acesso e aproximação ao tema que pretende-se explicitar.

Utilizou-se neste estudo a abordagem qualitativa, de modo a entender a relevância das ações geradas do local estudado, resultam em direcionamentos ao encontro do tripé da sustentabilidade (Social, Econômico e Ambiental). Proetti (2018) cita que esse tipo de pesquisa possibilita investigar os fatos e sua dinâmica, além de estabelecer a compreensão. Também, comenta que a pesquisa quantitativa é necessária para apresentar o sentido lógico/coerente de um tratamento científico, empenhado pelo pesquisador. Nesse sentido, buscou-se elucidar os objetivos descritos e a análise estatística para fundamentar a relevância do objeto pesquisado.

Por ser um projeto pioneiro e inovador, foi obtido acesso aos valores e dados informados pela empresa CRVR à FEPAM, conforme estipulado na base de convênio entre ambas e descritas no Termo de Autorização de Pesquisa Científica (TAPC). O local estudado foi a Unidade de Valorização Sustentável Minas do Leão (Central de Resíduos do Recreio), localizado no município de Minas do Leão/RS, administrada pela empresa CRVR.

O estudo tratou de estimar quantitativamente a produção do gás metano e representar demais unidades de GEE como o Dióxido de Carbono Equivalente (CO_{2e}), produzidos pela disposição final de resíduos sólidos em aterro sanitário com a metodologia ACM0001: Queima ou uso de gás de aterro - Versão 19.0 no âmbito do uso aplicado da Ferramenta - Emissões de Locais de Disposição de Resíduos Sólidos versão 08.0.

3.1 DETALHAMENTO METODOLÓGICO

A seguir são apresentados os procedimentos metodológicos que nortearam a pesquisa.

3.1.1 Coleta de dados do aterro sanitário

Na Figura 2 apresenta-se o mapa geopolítico da localização do estudo.

Figura 2 - Mapa geopolítico da localização do estudo.



Fonte: CDM-PDD-FORM- Version 08.0 (2017).

A coleta de dados sobre a quantidade de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) recebidos na Central Resíduos do Recreio de 2001 a 2021, foram disponibilizados pela empresa CRVR (Tabela 1). Aproximadamente 40% dos municípios gaúchos encaminham seus RSU. A licença de operação do empreendimento é de no máximo 4.000 mil/ton dia de RSU.

Tabela 1 - Quantidade recebida de Resíduos Sólidos Urbanos no Aterro Sanitário da Central de Resíduos do Recreio, Minas de Leão/RS, Brasil.

Ano	RSU/ Toneladas	Ano	RSU/ Toneladas
2001	591,87	2011	1.055.449
2002	32.228	2012	1.025.060
2003	272.547	2013	1.192.027
2004	385.744	2014	1.215.742
2005	460.781	2015	1.195.273
2006	586.986	2016	1.149.634
2007	664.583	2017	1.091.763
2008	712.839	2018	1.166.318
2009	756.899	2019	1.217.756

2010	940.489	2020	1.164.573
		2021	1.141.226

Fonte: CRVR (2022).

A partir da visita no local ocorreu a coleta de informações do aterro sanitário. Foram realizadas as perguntas norteadoras e referentes às características de um aterro sanitário, fixadas no Anexo I.

Foi necessário pesquisar e acessar dados variáveis como: a gravimetria dos RSU, média de temperatura, média pluviométrica e índice de aridez, uma vez que desempenham influência sobre os resultados conforme a sua delimitação.

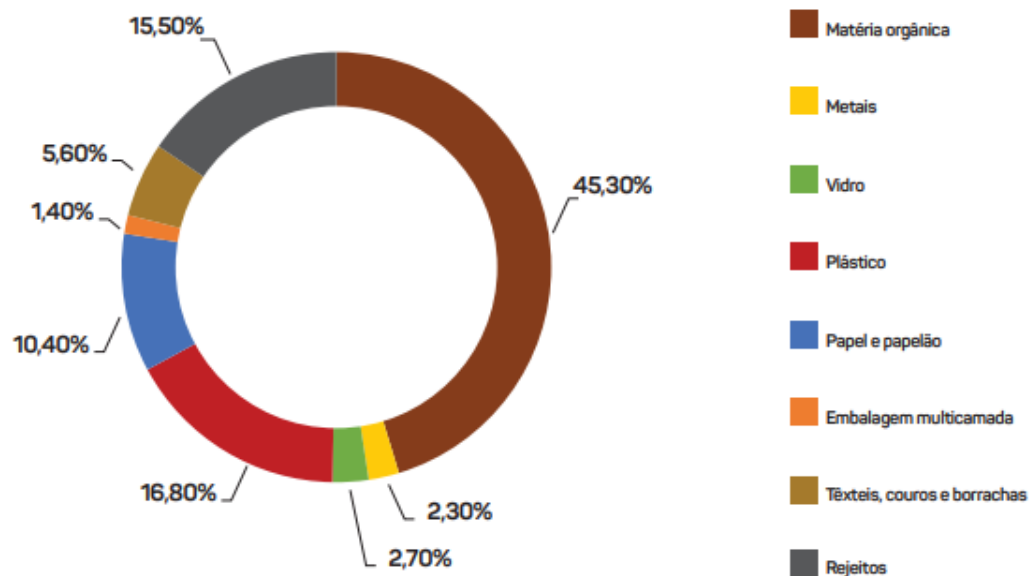
Neste sentido, os itens abaixo apresentam a base para o gás metano e demais unidades de GEE, produzidos pela disposição final de resíduos sólidos em aterro sanitário com uso aplicado da ACM0001: Queima ou uso de gás de aterro - Versão 19.0 (UNFCCC, 2019).

3.1.2 Coleta de dados do índice gravimétrico

A composição gravimétrica dos resíduos sólidos refere-se à categorização dos tipos de materiais descartados pela população, e seu conhecimento é um passo fundamental para a gestão integrada e descarte eficiente dos materiais.

O dado oficial é observado no Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES), instituído por meio do Decreto Nº 11.043, de 13 de abril de 2022, é um instrumento importante da Política Nacional de Resíduos Sólidos Lei Nº 12.305/2010. Entretanto, o dado do PLANARES, teve origem no relatório ABRELPE (2020) na Figura 3, dispondo os tipos e quantidades de resíduos.

Figura 3 - Composição gravimétrica dos resíduos sólidos no Brasil.



Fonte: ABRELPE (2020).

Segundo o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, em 2020, realizado pela ABRELPE para obtenção dos dados apresentados, partiu-se da compilação e revisão de cerca de 200 estudos, incluindo referências acadêmicas, científicas e dados primários, que contemplavam metodologias similares e mesmo espectro temporal. A gravimetria nacional foi estimada com base na média ponderada a partir da geração total de RSU por faixa de renda dos municípios e respectivas composições, levando-se em consideração a população e geração per capita (ABRELPE, 2020).

3.1.3 Coleta de dados da média pluviométrica

Para obter a média pluviométrica do estudo aplicado nas equações, o dado foi obtido pela quantidade de precipitação registrada na região do Aterro Sanitário Central de Resíduos do Recreio, localizada na região carbonífera do RS, especificamente no município de Minas do Leão/RS. Segundo o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), o período contabilizado entre 1990 a 2020, teve como precipitação média (mm) de 1705 mm. O índice pluviométrico levou em conta a precipitação de cada mês para cada ano.

3.1.4 Coleta de dados da média de temperatura

Segundo o INMET, a normal climatológica do Brasil dispõe de diversa base de dados sobre os aspectos físicos e as variáveis climáticas como as estações, evaporação, insolação, nebulosidade, precipitação, pressão atmosférica, temperatura, umidade relativa, vento e evapotranspiração (INMET, 2022).

Para obter a média de temperatura, houve o mesmo método do dado pluviométrico e o respectivo período. A temperatura média (°C) definida foi 17,6 °C.

A empresa CRVR, possui sistema que armazena as informações em até 6 meses. Os registros coletados entre julho/2021 a janeiro/2022, apresentaram a temperatura média de 19,6 °C. No entanto, a escolha foi do dado do INMET, visto a série histórica de maior escala temporal cobrindo toda região e a distribuição de todas as estações do ano.

3.1.5 - Coleta de dados do índice de aridez

O valor do índice de aridez (para medir o grau de aridez, acidez de uma determinada área) foi definido pela média de temperatura e pela média de precipitação no aterro sanitário. O resultado encontrado ocorreu mediante as variáveis citadas aplicadas na Fórmula ACM0001, tendo em uma escala de 1 a 5. Adotou-se o Índice de Aridez o valor de 2 devido a resultante entre precipitação e temperatura.

3.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS

Após a etapa de coleta de dados, a quantidade de resíduos sólidos urbanos entre 2001 e 2021, foram submetidos para encontrar a estimativa de metano e dióxido de carbono equivalente, na equação da Metodologia *ACM0001: Queima ou uso de Gás de Aterro*, no âmbito da *Ferramenta - Emissões de Locais de Disposição de Resíduos Sólidos versão 19.0* (UNFCCC, 2019).

Os parâmetros de entrada do modelo da equação foram caracterizados levando em conta a gravimetria, pluviometria, média de temperatura, índice de aridez e o percentual de teor de CH₄.

Considerando a gravimetria da composição de resíduos sólidos publicado por Abrelpe (2020), foram criadas planilhas separadas no mesmo período, expressando a geração de metano nas seguintes categorias:

- Todos (100%);
- Alimentos (45%);
- Papéis e Celulose (10%);
- Têxteis (6%);
- Madeira e derivados (1%); e
- Jardins/Rejeitos (14%) incluindo neste estudo “Rejeitos” na mesma categoria.

Os demais resíduos inertes classificados como “Outros”, somam 23% atribuídos às tipologias de recicláveis como vidro, plástico, metal e também, a categoria de perigosos (pilhas, baterias, lâmpadas e óleo de cozinha) que não possuem a fração orgânica de carbono degradável.

O desenvolvimento de equações em planilhas foi feito com o uso do programa Microsoft Excel®. Foi especificado o valor gerado por cada equação de acordo com a ordem de grandeza considerada em “Toneladas e a emissão para cada ano de resíduos sólidos depositados”, o somatório de mais de um ano de produção de gases cumulativos, para geração do resultado final de cada ano.

Conforme a gravimetria exposta de cada Tipo de Resíduo “*j*”, o parâmetro *Tipo de Resíduos (j)* tratou para cada especificidade correlação de outros parâmetros com valores: *Velocidade de decomposição (k)* para cada resíduo “*j*” definindo conjunto de valores para a *Taxa de decaimento (k_j)*, de acordo com o tipo de clima que a atividade está inserida; e *Fração de Carbono Orgânico Degradável (DOC)*, atribuindo de acordo com o peso para cada resíduo “*j*”, a quantidade de carbono disponível sendo *DOC_j* o parâmetro definido.

Para apontar as possibilidades encontradas de resultados, foi incrementado valor de parâmetro, Fator de Correção do Modelo (ϕ_y), sendo $\phi_y=0,50$ este nomeado como valor conservador pelo Autor, além da recomendação da própria fórmula $\phi_y=0,75$ sendo valor Recomendado (CDM-TOOL 04, 2019).

A estimativa exponencial entre 2022 e 2030, dos resíduos dispostos no aterro até 2021, teve a mesma logicidade e quantidade de planilhas citadas anteriormente. Esse intervalo, considerou o período de cumprimento aos ODS 2030 da ONU.

Utilizando a metodologia referendada, o desenvolvimento de equações para cada categoria foi feito em planilhas com o uso do Microsoft Excel®. Estimado o valor produzido de CH₄, foi considerada a ordem de grandeza em Toneladas e a variação

anual produzida de CH₄, para finalmente ocorrer o somatório de cada ano dando origem ao resultado final.

A premissa entre j , DOC_j , k e k_j para cada ano geração de CH₄ (y), somou aos demais parâmetros o período de *quantidade de tempo de resíduos descartados* (x), com o cruzamento destes parâmetros para a *quantidade de resíduos j no período x* (W_{jx}), possibilitando atingir a soma de cada ano (y) de forma contínua e sem distinção.

3.2.1 Metodologia ACM0001 - Queima e/ou uso de gás de aterro

A metodologia de cálculo de estimativa de CH₄ é aplicada pela Convenção-Quadro das Nações Unidas para as Mudanças Climáticas (United Nations Framework Convention on Climate Change – UNFCCC), chamada ACM0001: Queima ou Uso de Gás de Aterro – Versão 19.0 (UNFCCC, 2019).

Até o momento, é a metodologia mais utilizada para projetos de MDL envolvendo recuperação de CH₄/gás de aterro sanitário. É uma metodologia de linha de base e monitoramento consolidada, baseada que substituiu outras quatro referências normativas:

- AM0002 (*Greenhouse gas emission reductions through landfill gas capture and flaring where the baseline is established by a public concession contract* ou Redução de emissão de gás estufa através de captura e queima de gás de aterro sanitário onde a linha de base é estabelecida através de um contrato de concessão pública);
- AM0003 (*Simplified financial analysis for landfill gas capture projects* ou Análise financeira simplificada para projetos de captura de gás de aterro sanitário);
- AM00010 (*Landfill gas capture and electricity generation projects where landfill gas capture is not mandated by law* ou Projetos de captura de gás de aterro sanitário e geração de eletricidade onde a captura do gás de aterro sanitário não é exigida por lei); e
- AM00011 (*Gas recovery with electricity generation and no capture or destruction of methane in the baseline scenario* ou Recuperação de gás de aterro com geração de eletricidade com cenário de linha de base não contendo captura ou destruição de metano).

No período das versões 1.0 a 11.0, a metodologia titulava “*Linha de base consolidada e metodologia de monitoramento para atividades de projeto de gás de*

aterro". A partir da versão 12.0.0, alterou seu título para “*Queima ou uso de gás de aterro*”.

Com seu *status* ativo para desenvolvimento de projeto de grande escala consolidado na redução de emissões, a metodologia ACM0001 continuou sendo atualizada, lhe conferindo a versão 19.0 a mais recente. Entre os potenciais usos da ACM0001 estão apresentados na Tabela 2.

Segundo a ACM001 (2019), dentre os gases de efeito estufa, o gás CH₄ é visto ser a principal fonte de emissões desse tipo de atividade. As emissões de N₂O (g), Óxido Nitroso, outro GEE, são de menor importância comparadas às emissões de metano em um Local de disposição Final (SWDS) (Solid Waste Disposal). As emissões de CO₂ relacionadas a decomposição de resíduos orgânicos não são contabilizadas, uma vez que também é liberado sob a atividade de projeto. No entanto, é representado pela unidade de CO_{2e}, para a produção dos GEE gerados. Ela pode tanto ser utilizada por metodologias de aterro sanitário quanto para metodologias que envolvam queima de resíduos de biomassa para produção de energia, por exemplo, já que o resíduo de biomassa emitiria metano caso não existisse o projeto e o resíduo fosse disposto em aterro (VIANA, 2011).

Tabela 2 - Conjunto de ferramentas inseridas na metodologia ACM0001.

Versão	Ordem	Ferramenta Referenciada
19.0	a	Avaliação da validade da linha de base original/atual e atualização da linha de base na renovação do período de obtenção de créditos.
19.0	b	Emissões de locais de disposição de resíduos sólidos
19.0	c	Ferramenta combinada para identificar o cenário de linha de base e demonstrar a adicionalidade
19.0	d	Emissões do projeto provenientes da queima
19.0	e	Emissões de linha de base, projeto e/ou vazamento do consumo de eletricidade e monitoramento da geração de energia elétrica
19.0	f	Ferramenta para calcular as emissões de CO ₂ do projeto ou vazamento da combustão de combustível fóssil
19.0	g	Ferramenta para determinar a vida útil restante do equipamento
19.0	h	Determinação da eficiência básica da geração de energia térmica ou elétrica de sistemas'

19.0	i	Ferramenta para determinar o fluxo de massa de um gás de efeito estufa em um fluxo gasoso
19.0	j	Projeto e emissões de vazamento do transporte de carga
19.0	k	Listas positivas de tecnologias

Fonte: UNFCCC (2021).

A finalidade da ferramenta de Emissões de SWDS's, propõem-se as seguintes aplicações: A) ACM0001: “*Queima ou uso de gás de aterro*”, onde a delimitação do projeto pode receber monitoramento para modelo anual, ou para modelo mensal. e B) ACM0022: “*Processos alternativos de tratamento de resíduos*”. (UNFCCC, 2017). Par o presente estudo, foi aplicado a metodologia ACM0001, visto a delimitação do objeto de estudo.

Mais especificamente, o emprego desta ferramenta permite optar por procedimentos que promovam distintas finalidades: 1) Procedimento simplificado para determinar as emissões de metano do SWDS; e/ou 2) procedimento completo para determinar as emissões de metano no SWDS. Neste estudo, a metodologia utilizou a segunda opção.

3.2.2 Modelo CDM Tool 04 para estimativa de metano

Uma das normas referenciais da Metodologia ACM0001 é a Ferramenta *Methodological Tool – Emissions from solid waste disposal sites – Version 08.0* (UNFCCC, 2019), ou *CDM Tool 04* (Ferramenta MDL 04), é indicada para início de projetos e avaliação do CH₄ produzido, também medido em CO_{2e}, fornece procedimentos para a linha de base para os resíduos dispostos em um SWDS

A ferramenta *CDM Tool 04* é usada para cálculos anuais e considera as frações constituintes do resíduo, o tratamento de cada uma das frações j independentemente uma das outras, com sua própria constante “ k_j ” e potencial de geração de metano $L0_j$. Ela calcula emissões em t CO_{2e} (com o termo GWP_{CH_4}), leva em conta a parte de metano que é oxidada enquanto passa através da camada superficial do aterro (com a fração OX), e a fração que seria queimada na ausência da atividade de projeto (com a fração f_y). O fator MCF_y é baseado na qualidade do local de disposição no ano y ,

com um valor padrão de $MCF = 1$ para aterros sanitários, que é o caso deste estudo comparativo (SANTOS, 2014).

Todos os parâmetros foram compilados estritamente do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), documento **TOOL 04 - Ferramenta Metodológica: Emissões de Locais de Disposição de Resíduos Sólidos Versão 08.0**. A partir do documento original em inglês traduzido para Português, ajustou-se à apresentação das informações para melhor entendimento. A Figura 4 expõe a equação utilizada e seus parâmetros.

Figura 4 - Equação do MDL-ACM0001/Tool 04 empregada na pesquisa.

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

Fonte: UNFCCC (2019).

Onde:

$BE_{CH_4,SWDS,y}$ Emissões de metano que ocorrem no ano y gerada a partir da disposição de resíduos em SWDS durante um período que termina no ano y (t CO_{2e}/ano).

SWDS	Local de disposição final de resíduos sólidos;
φ	Fator de correção devido às incertezas do modelo para o ano y ;
f_y	Fração de metano capturado, queimada evitando emissão de metano para atmosfera no ano y ;
GWP_{CH4}	Potencial de Aquecimento Global do Metano;
OX	Fator de Oxidação - quantidade de metano do SWDS oxidado no solo, camada de cobertura do aterro (ou material que recubra o resíduo);
$\frac{16}{12}$	Taxa de conversão de carbono (12) para metano (16);
F	Fração do volume de metano no biogás;
DOC_{f, y}	Fração de carbono orgânico degradável (DOC) que irá se decompor em condições específicas que ocorrem em SWDS para o ano y (Fração de peso);
MCF_y	Fator de correção de metano para o ano y dependendo do aterro;
x	Anos do período em que os resíduos são depositados em SWDS, desde o primeiro ano ($x=1$) até o ano calculado das emissões ($x=y$);

y	Ano para o qual período de crédito/estimativa/produção/emissões de metano está sendo calculadas (período consecutivo de 12 meses);
$\sum_{x=1}^y$	Somatório para o ano y desde o ano x=1;
j	Tipo de resíduo definido/depositado;
\sum_j	Somatório para cada tipo de resíduo <i>j</i> ;
W_{j,x}	Quantidade de resíduos sólidos do tipo <i>j</i> depositados no ano x (t);
DOC_j	Fração de carbono orgânico degradável no tipo de resíduo <i>j</i> (fração de peso);
e	Função exponencial ;
k	Velocidade de decomposição;
k_j	Taxa de decaimento/decomposição para o resíduo de tipo <i>j</i> (1/ano);

Fonte: Version 08.0. Tools 04, ACM0001/MDL (2017).

Detalhando cada parâmetro citado, as descrições apresentam sucintamente cada dado utilizado na fórmula. Salienta-se que cada parâmetro descrito possui valor padrão havendo margem para modificação, na possibilidade de não condizer com a realidade do objeto analisado.

- ϕ (Fator de Correção do Modelo):

Tem sua descrição como valor padrão para o fator de correção do modelo devido às incertezas do modelo para um projeto específico ou genérico. Segundo o Modelo CDM Toll 04 (2019), onde consta o valor apresentado, estão descritos os valores distintos para aplicação A ou aplicação B, de modo para Condições úmidas/molhadas = 0,75 / 0,85, e Condições secas = 0.75 / 0.80, respectivamente.

O valor de fator de correção devido às incertezas do modelo para o ano y $\phi_y = 0,75$ nessa pesquisa foi classificado como Cenário 1 (Recomendado). Especificamente nesta pesquisa, $\phi_y = 0,50$ foi classificado como Cenário 2 (Conservador). O motivo se dará em razão da comparação do resultado final para cada finalidade estabelecida.

- f_y (Fração de Metano Capturado):

Tem sua descrição como fração de metano capturado no SWDS ou usada de outra maneira que evite as emissões de metano para a atmosfera no ano y. Para aplicação de crédito, uma vez para o período considerando o quanto do projeto irá

capturar de metano em razão determinada por contrato ou regulamento especificando a quantidade de metano que deve ser destruída / usada. Em cláusula contratual definida para crédito, o projeto irá se comprometer determinando o percentual mínimo que irá capturar de forma obrigatória por razão legal, contratual ou pelo histórico da atividade. Pode ser definido conforme acordado entre as partes envolvidas. O valor do parâmetro $f_y = 10\%$, é o mínimo considerado aceito pela ONU.

- GWP_{CH_4} (Potencial de Aquecimento Global):

Tem sua descrição para o Potencial de Aquecimento Global (PAG) do Metano. Utiliza como fonte de dados o IPCC (UNFCCC, 2019). O valor a ser aplicado deve conter o potencial de aquecimento global do metano válido para o período de compromisso relevante. É aplicado de acordo com a unidade de gás pretendida. Com base nas Diretrizes do IPCC, 2006 – AR5, a metodologia tem o PAG ou GWP definido a cada 1 tonelada para representar a unidade CO_2 de forma equivalente. $CO_{2e} = 25$ para CH_4 ; e de $N_2O = 265$. O valor quando apresentado na unidade de CO_{2e} , inclui todos os tipos de GEE, citados anteriormente. Para saber a quantidade de CH_4 , o GWP é $CH_4 = 1$, simulando a conversão para CO_{2e} , $GWP = 25$. Portanto, a cada 1 tonelada de CH_4 , resulta em 25 toneladas de CO_{2e} .

- OX (Fator de Oxidação e/ou Camada de Cobertura):

De acordo com o IPCC (2006), este parâmetro detém elevado grau de incertezas. É difícil medir, varia consideravelmente com a espessura e natureza da camada de cobertura, com as condições atmosféricas e climáticas, com o fluxo de metano e com o escape de metano através de rachaduras/fissuras na camada de cobertura. Estudos de campo e laboratoriais que determinam oxidação de metano apenas através de camadas de solo uniformes e homogêneas podem levar a estimativas de oxidação em camadas e cobertura que não condizem com a realidade dos aterros (VIANA, 2011).

Quando o metano passa pela camada superior, parte dele é oxidado por bactérias metanotróficas para produzir CO_2 . O fator de oxidação representa a proporção de metano que é oxidado a CO_2 . Isso deve ser diferenciado do fator de correção de metano (MCF), que deve ser responsável pela situação em que o ar ambiente pode invadir o SWDS e impedir que o metano seja formado na camada superior de SWDS (TOLL 04, 2019).

Com base em uma extensa revisão da literatura publicada sobre esse assunto, incluindo as Diretrizes do IPCC, 2006 – AR5, para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa, o valor recomendado: $OX = 0,1$ para aterros cobertos por solo ou composto. $OX = 0$, para cobertura com outro tipo de material, não havendo oxidação e todo metano emitido para a atmosfera.

- 16/12 (Conversão do carbono):

Tem sua descrição para a taxa de conversão do Carbono (16) para Metano (12). $16/12 = 1,33$, em termos de estequiometria.

- F (Fração do volume de metano no biogás):

Tem em sua descrição a fração do volume de metano no gás de um SWDS. De acordo com as diretrizes do IPCC (2006), após a biodegradação, o material orgânico é convertido em uma mistura de metano e dióxido de carbono. Quase todo RSU com carbono degradável é capaz de gerar 50% de metano, sendo que carboidratos, lipídios e gordura uma quantidade muito mais significativa. O valor padrão recomendável é 50% de metano, sendo aplicado $F = 0,5$. O valor pode ser alterado conforme a especificidade do objeto.

- DOC_f (Fração de Carbono Orgânico Degradável do Resíduo):

Trata-se da fração de carbono orgânico degradável (DOC em inglês; COD em português) em RSU que se decompõe em um SWDS. De acordo com IPCC 2006, este fator reflete o fato de que algum carbono orgânico degradável não se degrada, ou se degrada muito lentamente. A unidade de dados retrata a fração de peso, padronizando o que irá se decompor. O valor padrão de $DOC_f = 0,5$.

A incerteza neste parâmetro é muito alta, exatamente devido à falta de estudos e à dificuldade em replicar as condições reais do aterro em ambiente experimental (VIANA, 2011).

- MCF_y (Fator de Correção de Metano):

Tem sua descrição relacionada entre as situações qualitativas e de estrutura de um SWDS gerenciado ou não gerenciado. Um aterro sanitário é muito dinâmico, detêm variações de idades de resíduos e diferentes condições microbiológicas,

ocorrendo metanogênese em determinadas regiões e acetogênese em outras, assim por diante.

O MCF é em razão de um SWDS - não gerenciado, produz menos metano a partir de uma determinada quantidade de resíduos comparado a um SWDS - gerenciado. Isso porque uma fração maior dos resíduos se decompõe aerobicamente nas camadas superiores do SWDS - não gerenciado. Segundo MDL TOOL 04 (2019), recomenda aplicação do valor de acordo com a classificação das práticas operacionais desenvolvidas no SWDS para qual o dado deste parâmetro:

- *1,0 Locais de eliminação de resíduos sólidos geridos de forma anaeróbia:* Estes devem ter uma disposição controlada de resíduos. Ou seja, resíduos direcionados a áreas de deposição específicas, um grau de controle de eliminação e um grau de controle de incêndios. Ainda, deverá conter pelos menos uma das seguintes finalidades: Material de cobertura; Compactação mecânica; e nivelamento dos resíduos;
- *0,5 Locais de disposição de resíduos sólidos com manejo semi-aeróbio:* Estes devem ter a localização controlada de resíduos e incluirão todas as seguintes estruturas para a introdução de ar nas camadas de resíduos contendo: Material de cobertura permeável; Sistema de drenagem de chorume; Regulação da lagoa de tratamento; e Sistema de ventilação a gás;
- *0,8 Locais de disposição de resíduos sólidos não gerenciados/profundidade:* Inclui todos os SWDS que não atendem aos critérios de SWDS gerenciados e que possuem profundidades iguais ou superiores a 5 metros;
- *0,4 Locais de disposição de resíduos sólidos rasos não gerenciados ou pilhas de estoque que são considerados SWDS:* Inclui todos os SWDS que não atendem aos critérios de SWDS gerenciados e que possuem profundidades menores que cinco metros. Isso inclui estoques de resíduos sólidos que são considerados SWDS, de acordo com a definição dada para um SWDS.

- DOC_j (Fração de Carbono Orgânico Degradável no tipo de resíduo j):

Sua origem é dada pela classificação dos resíduos por tipo. A cada tipologia tem valor de especificidade resíduo j. A recomendação do MDL para os valores padrões DOC_j , distribuir o valor por peso úmido:

- 0,43 para madeira e produtos de madeira;
- 0,40 para Celulose, papel e papelão (exceto lodo de estação de tratamento);
- 0,15 para comida, restos de alimentos, bebida e tabaco (exceto lodo de estação de tratamento);
- 0,24 para resíduos têxteis;
- 0,20 para resíduos de parque e jardim e quintal;
- 0 para vidro, plástico, metal e outros resíduos inertes (que não possuem carbono biodegradável).

- k_j (Taxa de decaimento para o resíduo tipo j):

Este parâmetro leva em consideração o tipo do resíduo e o clima do local.

No MDL, são utilizadas definições diferentes para regiões secas e úmidas dependendo da média de temperatura. Em locais quentes (temperatura média anual superior a 20°C), uma região seca é a que possui precipitação média histórica anual inferior a 1000 mm. Já para localidades frias (temperatura média anual igual ou inferior a 20°C), a distinção entre seca e úmida é dada pela razão entre a precipitação média anual e a evapotranspiração potencial – maior que 1 significa úmida, menor significa seca (VIANA, 2011).

Os valores obtidos através das incógnitas: Temperatura Média Anual (MAT), Precipitação Média Anual (MAP), Evapotranspiração potencial (PET), definem qual categoria será aplicada. MAP / PET é a razão entre a precipitação média anual e a evapotranspiração potencial.

Levando em consideração a descrição acima, os valores são separados por padrões de clima (Boreal e Temperado / Tropical). O padrão de clima para Boreal e Temperado, contém a definição de MAT igual/ou maior que 20°C, Contendo: Seco ($MAP/PET < 1$) e úmido ($MAP/PET > 1$). O padrão para Tropical contém a definição de $MAT > 20^\circ C$, contendo: Seco ($MAP < 1000mm$) e molhado ($MAP > 1000mm$). Além disso, a taxa de decaimento para k_j , dispõe de classificações como: Lentamente; Degradando; moderadamente degradado; e Rapidamente degradado (CDM-TOOL 04, 2019).

Para locais possuidores de temperatura anual média igual ou inferior a 20°C (chamados de regiões boreais e temperadas), os valores são os seguintes (também representados por “região seca/região úmida”):

- 0,04 / 0,06 para resíduos de degradação lenta: Celulose, papel, papelão e resíduos têxteis;
- 0,02 / 0,03 para resíduos com degradação lenta: Madeira, produtos de madeira e palha;
- 0,05 / 0,10 para resíduos com degradação moderada: Lixo de jardim e parque (não alimentar orgânico);
- 0,06 / 0,185 para resíduos com degradação rápida: Alimentos, resíduos alimentares, lodo de esgoto, bebidas e tabaco.

Para localidades com temperaturas anuais médias superiores a 20°C (chamadas de regiões tropicais), os seguintes valores (representados por “região seca/região úmida”) são recomendados:

- 0,045 / 0,07 para resíduos de degradação lenta: Celulose, papel, papelão e resíduos têxteis;
- 0,025 / 0,035 para resíduos com degradação lenta: Madeira, produtos de madeira e palha;
- 0,065 / 0,17 para resíduos com degradação moderada: Lixo de jardim e parque (não alimentar orgânico);
- 0,085 / 0,4 0,06 / 0,185 para resíduos com degradação rápida: Alimentos, resíduos alimentares, lodo de esgoto, bebidas e tabaco.

Se um tipo de resíduo descartado em um SWDS não pode ser claramente atribuído a um dos tipos de resíduos na tabela acima, os participantes do projeto devem escolher, entre os tipos de resíduos que têm características semelhantes, o tipo de resíduo onde os valores de DOC_j e k_j resultam em uma estimativa conservadora (emissões mais baixas), ou solicitar uma revisão / desvio desta metodologia (TOLL 04, 2019).

Segundo MDL, é indicado usar médias de longo prazo com base em dados estatísticos, quando disponíveis.

- j (Tipo de resíduo definido/depositado):

Trata-se do tipo de resíduo que está sendo disposto no aterro. Nesta ferramenta, ficam definidos como tipo de resíduo j :

- Madeira e produtos de madeira;
- Celulose, papel e papelão (exceto borra);
- Alimentos, resíduos de alimentos, bebidas e tabaco (exceto lama);

- Têxteis;
- Resíduos de jardim, quintal e parque;
- Vidro, plástico, metal e outros resíduos inertes.
-

- Parâmetros sem valor pré-estabelecido:

Os parâmetros restantes (e , y , x , $W_{j,x, \sum_{x=1}^y}$, \sum_j) não possuem valor previamente definido ou estabelecidos diante de objeto e localidade específica, não podem ser padronizados.

4 RESULTADOS

Os resultados são apresentados em formato de 3 artigos científicos.

ARTIGO 1

4.1 ARTIGO 1 - EDUCAÇÃO AMBIENTAL E GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE): UMA ABORDAGEM DO PAPEL DO METANO PARA EDUCAÇÃO BÁSICA

Publicado em: Revista Brasileira de Educação Ambiental. Acesso em: **DOI:**
<https://doi.org/10.34024/revbea.2021.v16.12400>

Resumo: O efeito estufa natural é um dos fatores mais importantes para manter a Terra quente, pois impede que parte do calor do planeta escape para o espaço. Contudo, o excesso de gases causa o aquecimento global e a Educação Ambiental pode reverter este cenário através da sensibilização, possibilitando a transformação de comportamento e redução dos impactos ambientais. Este trabalho, a partir de revisão bibliográfica, visa contribuir com a articulação e inserção da temática no ensino de ciências, sobretudo nos níveis médio e fundamental. Para isso, é feita uma abordagem da perspectiva da química ambiental discutindo conceitos acerca do metano, sua química, suas fontes e função como gás de efeito estufa, assim como, o efeito sobre a saúde humana.

Palavras-chave: Efeito Estufa; Ação antrópica; Fontes de Metano; Educação Ambiental.

Abstract: The natural greenhouse effect is one of the most important factors to keep the Earth warm, as it prevents some of the heat from the planet escaping into space. However, excess gases cause global warming and Environmental Education can reverse this scenario by raising awareness, enabling behavior transformation and reducing environmental impacts. This work, based on bibliographic review, aims to contribute to the articulation and insertion of the theme in science teaching, especially at the secondary and fundamental levels. For this, an approach is made from the perspective of environmental chemistry discussing concepts about methane, its chemistry, its sources and function as a greenhouse gas, as well as the effect on human health.

Keywords: Greenhouse Effect; Anthropic Action; Methane Sources; Environmental Education.

4.1.1 Introdução

O efeito estufa natural é um dos fatores mais importantes para manter a Terra quente, pois impede que parte do calor do planeta escape para o espaço. A temperatura média global da Terra seria substancialmente menor sem o efeito estufa, e a vida na Terra, como a conhecemos, seria impossível. Porém, verifica-se um aumento do aquecimento global e as causas desse fenômeno são múltiplas, tanto de origem natural como de ações antropogênicas (AVELINO; DOMINGUES, 2020).

Os gases que intensificam o efeito estufa incluem metano, dióxido de carbono, óxido nitroso e gases fluorados, entre outros. O aquecimento constante da atmosfera e da superfície da Terra causado pelos gases de efeito estufa tem resultado no aquecimento global desde o início do século anterior. A poluição veicular e industrial, assim como a agropecuária são os principais contribuintes para os gases de efeito estufa e o aquecimento global, sendo o gás metano um dos mais nocivos.

Segundo Liotti e Campos (2021), a crise ambiental instaurada é um problema socioambiental complexo e intensifica a necessidade da organização de caminhos alternativos para o enfrentamento desse fato. Diante disso, a educação é considerada como um dos processos do desenvolvimento humano que proporciona a aquisição do conhecimento, a mudança de comportamento, bem como a formação de novas identidades sociais e, sem dúvida, a Educação Ambiental é um dos meios para avançar na sensibilização e reverter o cenário atual.

Segundo Lopes e Abílio (2021), a Educação Ambiental auxilia e combate a crise ambiental, contribuindo para a emancipação e transformação de ações e concepções dos indivíduos diante de si e do mundo. A literatura evidencia a importância de Educação Ambiental nas diferentes fases de ensino, sendo considerada uma importante ferramenta de transformação social e reversão do cenário ambiental que vivemos atualmente (SCHWANTZ *et al.*, 2019; BONATO *et al.*, 2021; LIOTTI; CAMPOS, 2021; PROCÓPIO *et al.*, 2021; RIBEIRO; MALVESTIO, 2021) Ademais, Lins e Fernandes (2021) destacam que a Educação Ambiental é uma condição fundamental para a formação do cidadão e, portanto, é essencial incluir nos planejamentos de aula, em todos os níveis de ensino, conteúdos que abordem problemas e soluções socioambientais.

Conforme Liotti e Campos (2021), verifica-se a falta de uma abordagem interdisciplinar e contextualizada sobre a temática das mudanças climáticas, incluindo

os gases de efeito estufa, demonstrando a complexidade dos fatores químicos, geofísicos e atmosféricos que envolvem esse fenômeno. Diante do exposto, este estudo visa contribuir com a articulação e inserção do tema em sala de aula, sobretudo nos níveis médio e fundamental. Para isso, é feita uma abordagem da perspectiva da química ambiental, a partir de revisão bibliográfica, discutindo conceitos acerca do metano, sua química, suas fontes e função como gás de efeito estufa, assim como, o efeito sobre a saúde humana.

4.1.2 Efeito Estufa: aspectos históricos e natural

No contexto histórico, Svante Arrhenius (1859-1927), importante cientista sueco, foi o primeiro a afirmar, em 1896, que a combustão de combustíveis fósseis poderia eventualmente resultar em um aumento do aquecimento global. Ele propôs uma relação entre as concentrações atmosféricas de dióxido de carbono (CO_2) e a temperatura, a base de ideias do matemático e físico francês Jean-Baptiste Fourier (1768-1830) (LACERDA; NOBRE, 2010). Svante Arrhenius e Thomas Chamberlin, um geólogo estadunidense, calcularam que as atividades humanas poderiam aquecer a terra ao adicionar CO_2 à atmosfera. Isto só foi realmente verificado em 1987; em 1988 foi finalmente reconhecido que o clima era mais quente do que qualquer outro período desde que se iniciarem medidas a partir de 1880. A teoria do efeito estufa foi nomeada e o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) foi fundado pelo Programa Ambiental das Nações Unidas e pela Organização Meteorológica Mundial (CASTRO *et al.*, 2010; ARTAXO, 2014).

Em relação aos aspectos naturais, o efeito estufa é o aumento da temperatura que a Terra experimenta porque certos gases na atmosfera (vapor de água, dióxido de carbono – CO_2 , óxido nitroso - N_2O , metano - CH_4 , ozônio - O_3 , entre outros) aprisionam a energia que vem do sol. Estes gases são normalmente chamados de gases de efeito estufa, uma vez que se comportam muito como as placas de vidro em uma estufa. Os painéis de vidro da estufa deixam entrar a luz, mas impedem a fuga de calor e isto é semelhante ao efeito que estes gases têm sobre a terra (ARESTA; DIBENEDETTO, 2021).

A luz solar entra na atmosfera da Terra, passando através dos gases de efeito estufa. Ao chegar à superfície do planeta, a superfície (solo e água) mas também a biosfera absorve a energia da luz solar. Uma vez absorvida, esta energia é enviada

de volta para a atmosfera. Parte da energia passa de volta ao espaço, mas grande parte dela permanece presa na atmosfera devido à gases de efeito estufa. Este é o processo completamente natural e, sem estes gases, todo o calor escaparia de volta no espaço e a temperatura média da Terra seria cerca de 30 °C menor, diminuindo, em muito, a vida no nosso planeta. Desta forma, o efeito estufa é um processo muito importante, pois sem o efeito estufa, a Terra não seria quente o suficiente para que a vida de muitos seres vivos teria se desenvolvida. Com o efeito estufa se tornando mais potente, devido a ações antrópicas, pode tornar a Terra mais quente, do que o habitual, gerando muitos problemas ambientais, para os humanos, plantas e animais (ARESTA; DIBENEDETTO, 2021).

4.1.3 Efeito Estufa: aspectos históricos e antrópicos

Certas atividades humanas também produzem gases de efeito estufa, tais como: CO₂, N₂O, CH₄, além de clorofluorcarbonos e hidrofluorcarbonos, que se juntam aos gases de estufa naturais, aumentando, desta forma, na atmosfera. A mudança no equilíbrio dos gases de efeito estufa tem efeitos significativos em todo o planeta.

A queima de combustíveis fósseis - carvão, petróleo e gás natural - liberam dióxido de carbono para a atmosfera. O uso de combustível fóssil é a principal fonte de CO₂. Este gás também pode ser emitido por impactos diretos induzidos pelo homem sobre a silvicultura e outros usos da terra, como por exemplo, através de desmatamento e queima, limpeza de terras para agricultura e degradação de solos (HEGERL, 2007). Da mesma forma, a terra também pode remover CO₂ da atmosfera através de reflorestamento, melhoria dos solos e outras atividades. A principal atividade humana que emite CO₂ é a combustão de combustíveis fósseis (carvão, gás natural e petróleo) para energia e transporte, embora certos processos industriais e mudanças no uso do solo também emitam este gás. O CO₂ está sendo constantemente trocado entre a atmosfera, o oceano e a superfície terrestre, pois é produzido e absorvido por muitos microrganismos, plantas e animais. Entretanto, as emissões e a remoção de CO₂ por esses processos naturais tendem a se equilibrar, na ausência de impactos antropogênicos. Mas, desde que a Revolução Industrial começou por volta de 1800, as atividades humanas contribuíram substancialmente para a mudança climática ao adicionar CO₂ e outros gases que retêm o calor para a atmosfera (EPA, 2021).

Um grupo de gases de efeito estufa chamado clorofluorcarbonos têm sido usado em aerossóis, como latas de spray para cabelos, geladeiras e na fabricação de espuma plástica. Conforme Schwaab *et al.* (2005), processos industriais, refrigeração e o uso de uma variedade de produtos de consumo contribuem para as emissões de gases F, que incluem hidrofluorcarbonos (HFCs), perfluorcarbonos (PFCs), hidrocarbonetos halogenados e hexafluoreto de enxofre (SF₆). Os hidrofluorcarbonos são utilizados como refrigerantes, propulsores de aerossóis, agentes de expansão de espuma, solventes e retardadores de fogo.

A principal fonte de emissões destes compostos é sua utilização em sistemas de refrigeração - por exemplo, em sistemas de ar-condicionado, tanto em veículos quanto em edifícios. Estes produtos químicos foram desenvolvidos em substituição aos clorofluorcarbonos (CFC) e hidroclorofluorcarbonos (HCFC) porque não empobrecem a camada de ozônio estratosférico. Os clorofluorcarbonos e HCFCs estão sendo eliminados gradualmente sob um acordo internacional, chamado de Protocolo de Montreal. Os HFCs são gases de efeito estufa potentes com alto potencial de aquecimento global, e são liberados na atmosfera durante os processos de fabricação e através de vazamentos, por manutenção e descarte do equipamento em que são utilizados (PUROHIT; HÖGLUND-ISAKSSON, 2017).

As atividades agrícolas, como o uso de fertilizantes, são a principal fonte de emissões de N₂O. A combustão de combustível fóssil também gera N₂O, envolvendo os setores econômicos do transporte. O óxido nitroso é emitido quando os combustíveis são queimados. A quantidade de N₂O emitida pela queima de combustíveis depende do tipo de combustível e da tecnologia de combustão, manutenção e práticas operacionais. Atividades humanas adicionais como, gerenciamento de águas residuais e processos industriais estão aumentando a quantidade de N₂O na atmosfera. O óxido nitroso também está naturalmente presente na atmosfera como parte do ciclo do nitrogênio da Terra, e tem uma variedade de fontes naturais (EPA, 2020). Globalmente, cerca de 40% do total de emissões de N₂O vêm de atividades humanas. As moléculas de óxido nitroso permanecem na atmosfera uma média de 114 anos antes de serem removidas por uma via ou destruídas através de reações químicas. O impacto de 1 quilo de N₂O no aquecimento da atmosfera é quase 300 vezes maior que o de 1 quilo de dióxido de carbono (SEEG, 2018).

Finalmente, o metano resultante de atividades agrícolas, especialmente via pecuária, gestão de resíduos, de forma anaeróbica, quando os resíduos orgânicos se

decompõem, mas também uso de energia e queima de biomassa contribuem para as emissões de CH₄ (EPA, 2021). Segundo Lima, Berstein e Valle (2014), o composto também é produzido em lixões, aterros controlados e aterros sanitários sem sistema de queima do CH₄ instalado (sistema *flare*). Cerca de 102 bilhões de metros cúbicos (bcm) de gás natural escaparam das operações globais de petróleo e gás para a atmosfera em 2012. Este gás desperdiçado se traduz em cerca de US\$ 30 bilhões de receita perdida a preços médios entregues em 2012, e representa cerca de 3% da produção global de gás natural (UNECE, 2020).

Posto isto, a seguir são apresentadas as emissões globais de GEE por setor econômico:

- Produção de eletricidade e calor (25% das emissões globais de gases de efeito estufa em 2010): A queima de carvão, gás natural e petróleo para eletricidade e calor é a maior fonte única de emissões globais de gases de efeito estufa (SEEG, 2018).
- Indústria (21% das emissões globais de gases de efeito estufa em 2010): as emissões de GEE da indústria envolvem principalmente combustíveis fósseis queimados no local, em instalações para energia. Este setor também inclui emissões de processos químicos, metalúrgicos e de transformação mineral não associados ao consumo de energia e emissões de atividades de gerenciamento de resíduos (IPCC, 2014).
- Agricultura, silvicultura e outros usos da terra (24% das emissões globais de gases de efeito estufa em 2010): as emissões de GEE deste setor vêm principalmente da agricultura (cultivo de culturas e pecuária) e do desmatamento. Esta estimativa não inclui o CO₂ que os ecossistemas removem da atmosfera ao sequestrar carbono na biomassa, matéria orgânica morta e solos, o que compensa aproximadamente 20% das emissões deste setor (FAO, 2014; MCGREGOR *et al.*, 2021).
- Transporte (14% das emissões globais de gases de efeito estufa em 2010): as emissões de gases de efeito estufa deste setor envolvem principalmente combustíveis fósseis queimados para o transporte rodoviário, ferroviário, aéreo e marítimo. Quase toda (95%) da energia do transporte mundial vem de combustíveis à base de petróleo, em grande parte gasolina e diesel (BARTHOLOMEU; PÉRA; CAIXETA FILHO, 2016).
- Edifícios (6% das emissões globais de gases de efeito estufa em 2010): as emissões de gases de efeito estufa deste setor surgem da geração de energia no local e da queima de combustíveis para aquecimento em edifícios ou para cozinhar em

residências. Já as emissões do uso de eletricidade em edifícios estão excluídas e, em vez disso, são contabilizados junto ao setor de Eletricidade e Produção de Calor (BERILL; GILLINGHAM; HERTWICH, 2021).

➤ Outras fontes de energia (10% das emissões globais de gases de efeito estufa em 2010): esta fonte de emissão de gases de efeito estufa refere-se a todas as emissões do setor de Energia que não estão diretamente associadas à produção de eletricidade ou calor, tais como extração, refino, processamento e transporte de combustível.

4.1.4 Metano: sua química

O metano (CH₄) é um gás incolor, inodoro e altamente inflamável composto de um átomo de carbono e quatro átomos de hidrogênio. É composto por um átomo de carbono (C), átomo central, ao qual são ligados 4 (quatro) átomos de hidrogênio através de ligações covalentes. Pode ser produzido natural e sinteticamente, e quando queimado na presença de oxigênio, produz dióxido de carbono e vapor de água.

O metano é o componente principal do gás natural e é utilizado para produzir calor e eletricidade em todo o mundo. O metano também é usado em reações químicas para produzir outros gases importantes como hidrogênio (H₂) e monóxido de carbono (CO) e negro de fumo, um composto químico que é encontrado em alguns tipos de borracha usada em pneus de automóveis.

4.1.5 Metano como gás do efeito estufa

O metano é o segundo mais abundante GEE antropogênico depois do CO₂, respondendo por cerca de 20% das emissões globais. O metano é mais de 28-34 vezes mais potente do que o CO₂ na captura de calor na atmosfera, a base do período dos últimos 100 anos. Quando medido durante o período dos últimos 20 anos, essa proporção cresce para 84-86 vezes (UNECE, 2020). Nos últimos dois séculos, as concentrações de metano na atmosfera mais do que duplicaram, em grande parte devido a atividades relacionadas ao homem. Como o metano é um gás de efeito estufa poderoso e de curta duração em comparação com o CO₂, conseguir reduções significativas teria um efeito rápido e significativo no potencial de aquecimento atmosférico (IPCC, 2007).

A permanência do metano na atmosfera é muito menor que o dióxido de carbono, mas o CH₄ é mais eficiente na captura de radiação do que o CO₂. O impacto do CH₄ é 25 vezes maior do que o efeito do CO₂ analisado no período dos últimos 100 anos (IPCC, 2007).

Globalmente, 50% a 65% do total de emissões de CH₄ vêm de atividades humanas. O metano é emitido por atividades de energia, indústria, agricultura, uso da terra e gestão de resíduos (IPCC, 2013). Entretanto, ao contrário do CO₂, que permanece na atmosfera por séculos, o metano se decompõe rapidamente e a maioria desaparece após uma década, o que significa que a ação pode reduzir rapidamente a taxa de aquecimento global no curto prazo.

Segue abaixo as 4 fontes mais importantes da geração antrópica de CH₄:

- Agricultura (42%): A pecuária doméstica como gado bovino, suíno, ovino e caprino produz CH₄ como parte de seu processo digestivo normal. Além disso, quando o dejetos animal é armazenado ou manejado em lagoas ou tanques de retenção, o CH₄ é produzido. Como os humanos criam esses animais para alimentação e outros produtos, as emissões são consideradas relacionadas ao ser humano (RESENDE *et al.*, 2020). Quando as emissões de animais e de esterco são combinadas, o setor agrícola é a maior fonte de emissões de CH₄ nos Estados Unidos e no Brasil. Embora menos significativas, as emissões de CH₄ também ocorrem como resultado do uso da terra e das atividades de manejo da terra no setor de uso da terra e silvicultura, tais como: incêndios florestais e de pastagens, decomposição de matéria orgânica em zonas úmidas costeiras, etc. (EPA, 2021).

- Energia e Indústria (36%): Os sistemas de gás natural e petróleo são a segunda maior fonte de emissões de CH₄, segundo EPA, agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos. O metano é o principal componente do gás natural. O metano é emitido para a atmosfera durante a produção, processamento, armazenamento, transmissão e distribuição de gás natural e a produção, refinamento, transporte e armazenamento de petróleo bruto. A mineração de carvão também é uma fonte de emissões de CH₄. Ele é encontrado em depósitos subterrâneos de combustíveis fósseis que têm sido submetidos a altas pressões e temperaturas durante milhões e milhões de anos. Como estes combustíveis são colhidos, extraídos e liberados, o CH₄ também é liberado. Trata-se de um composto difícil de transportar pois vaza facilmente durante a extração de petróleo, carvão e gás natural (EPA, 2021).

- Resíduos de residências e empresas (18%): O metano é gerado em aterros sanitários à medida que os resíduos se decompõem e no tratamento das águas residuárias. Os aterros sanitários são a terceira maior fonte de emissões de CH₄ nos Estados Unidos e podem ser usados para produção de biogás e geração de energia (Costa *et al.*, 2016). O metano também é gerado a partir do tratamento de águas residuárias domésticas e industriais e da compostagem e digestão anaeróbica (EPA, 2021).

Em nível mundial, estima-se que a China, Estados Unidos, Rússia, Índia, Brasil, Indonésia, Nigéria e México sejam responsáveis por quase metade de todas as emissões antropogênicas de metano. As principais fontes de emissão de metano para estes países variam muito. Por exemplo, uma fonte chave de emissões de metano na China é a produção de carvão, enquanto a Rússia emite a maior parte de seu metano a partir de sistemas de gás natural e petróleo (JANARDANAN *et al.*, 2020).

Um relatório da ONU reforça que é vital uma redução drástica das emissões de gás metano para enfrentar a mudança climática a curto prazo. Segundo a ONU Notícias (2021), o estudo é o trabalho da Coalizão Clima e Ar Limpo (CCAC), uma parceria global de governos e parceiros não-estatais, e do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP). O relatório ressalta por que a ação internacional é urgentemente necessária, pois as emissões de metano causadas pelo homem estão aumentando mais rapidamente do que em qualquer outro momento desde o início da manutenção de registros nos anos 80. Mesmo com a pandemia COVID-19 causando uma desaceleração econômica em 2020, que impediu outro ano recorde de emissões de CO₂, os dados da Administração Nacional Oceânica e Atmosférica dos Estados Unidos (NOAA, em inglês) mostram que a quantidade de metano na atmosfera atingiu níveis recorde no ano passado (LYON *et al.*, 2021).

Segundo a UNEP (2021), as emissões de metano causadas pela atividade humana podem e devem ser reduzidas em até 45% nesta década, ajudando assim a manter o aumento da temperatura global dentro de valores razoáveis, em favor do meio ambiente, economia e qualidade de vida, de acordo com o Acordo de Paris sobre mudança climática. Este acordo internacional, assinado por 200 países, visa manter o aumento da temperatura global até 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais até o final deste século. A meta de 1,5 °C é considerada como a porta de entrada para o aquecimento "perigoso", onde o planeta poderia sofrer sérios efeitos adversos da mudança climática. Para que isso seja alcançado, "medidas urgentes" são

necessárias a fim de reduzir o metano se o aquecimento global for mantido dentro de um limite estabelecido no referido acordo (ONU NOTÍCIAS, 2021). O corte do metano é a alavanca mais forte que o mundo tem para retardar a mudança climática durante os próximos 25 anos e complementa os esforços necessários para reduzir o dióxido de carbono. Os benefícios para a sociedade, a economia mundial e o meio ambiente são numerosos e superam em muito o custo.

De acordo com a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança Climática (UNFCCC), a estabilização dos gases de efeito estufa, incluindo CH₄, é necessária para combater o problema da mudança climática global (ROMANAK et al., 2021). A emissão de CH₄ tem efeitos negativos locais, regionais e globais sobre o meio ambiente, o ser humano e os seres vivos. A função crítica de uma melhor gestão dos resíduos sólidos urbanos é reduzir os problemas associados à poluição local por resíduos, e mudar a emissão de CH₄ para emissões de CO₂ através de instalações de geração de energia. Na hierarquia de gerenciamento de resíduos, recomenda-se a, redução da geração de resíduos, reutilização de resíduos, reciclagem e recuperação para padrões de consumo e produção sustentáveis em países desenvolvidos e em desenvolvimento. Ari e Sentürk (2020) observaram uma relação invertida entre as emissões de CH₄ per capita e o PIB per capita. O estudo recomenda que o aumento do PIB per capita deve ser alinhado com políticas fortes para a transformação dos países em práticas sustentáveis e padrões de consumo e produção.

4.1.6 Metano, ozônio e a saúde humana

O metano (CH₄) contribui para o crescente contexto global concentração de ozônio troposférico (O₃), um poluente atmosférico associado à mortalidade prematura. Como o metano, o ozônio também é um importante gás de efeito estufa. A redução das emissões de metano diminui, portanto, o ozônio superficial em todos os lugares, ao mesmo tempo em que retarda o aquecimento da atmosfera, mas embora a mitigação do metano tenha sido considerada para abordar a mudança climática, se falou pouco na importância do metano para a qualidade do ar (VAN DINGENEN et al., 2018).

Segundo Filippidou e Koukouliata (2011) e Rice et al. (2014), a ação global para reduzir as emissões de metano poderia, até o ano de 2050, evitar 70.000 a 130.000

mortes/ano prematuras devido à poluição pelo ozônio no mundo. As doenças relacionadas a essas mortes prematuras são: 1) respiratórias, 2) doenças cardíacas, além de 3) vias respiratórias danificadas e tecido pulmonares.

A Avaliação Global de Metano descreve os benefícios da diminuição do metano, um ingrediente chave na poluição atmosférica, que inclui a prevenção de cerca de 260 mil mortes prematuras e 775 mil visitas hospitalares relacionadas à asma anualmente, assim como 25 milhões de toneladas em perdas de safra (UNEP, 2021). Segundo este estudo, os benefícios são: 1) a rápida redução do aquecimento, que pode ajudar a evitar pontos perigosos de aquecimento do clima; 2) melhoria da qualidade do ar que pode salvar centenas de milhares de vidas; 3) melhoramentos na segurança alimentar, evitando perdas de colheitas; e 4) criação de empregos através de esforços de mitigação enquanto aumenta a produtividade através da redução do estresse térmico.

O ozônio troposférico é produzido pela interação da luz solar com emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x), monóxido de carbono (CO), compostos orgânicos voláteis (COV) e metano (CH₄). A comparação das observações de ozônio no final do século 20 com dados anteriores mostra que, no último século, os níveis de ozônio no nível do solo no continente europeu mais do que dobraram. Embora os níveis de pico de ozônio de curto prazo na Europa e na América do Norte tenham diminuído nas últimas décadas como resultado da redução das emissões de NO_x e COV, não é possível encontrar tal tendência para os níveis de longo prazo (ZHANG; WEL; FANG, 2019).

Desde a era pré-industrial, as concentrações de metano mais do que duplicaram. E após um período de estagnação, elas estão aumentando novamente desde a última década. De acordo com Van Dingenen *et al.* (2018), em todo o mundo, as emissões de metano aumentaram 17% entre 1990 e 2012, em comparação com um aumento de 53% nas emissões de CO₂. Caso a economia mundial continuar, sem diminuir gases do efeito estufa ("*business as usual*"), as emissões globais de metano produzidas pelo homem podem aumentar de 35-100 por cento até 2050, a partir do nível de 2010 de cerca de 330 Tg. Em contraste, cenários mais sustentáveis, como os que visam as metas do 2 (dois) °C do Acordo de Paris, projetaram reduções de emissão de metano de até 50 por cento até 2050.

Assim, a mitigação do metano oferece uma oportunidade única de melhorar a qualidade do ar globalmente e pode ser um componente econômico da gestão

internacional do ozônio, trazendo múltiplos benefícios para a qualidade do ar, a saúde pública, agricultura, clima e energia (VAN DINGENEN et al., 2018).

4.1.7 Desafios de aproveitar o metano produzido por ação antrópica

Ainda não estão muito disseminados esforços para capturar e utilizar o metano produzido por ação antrópica, de forma lucrativa. Embora existam múltiplos benefícios, a recuperação do metano não está difundida pelas seguintes razões:

- O metano é geralmente um subproduto secundário nos processos industriais a partir dos quais é emitido. As minas de carvão, por exemplo, procuram desprender o metano do funcionamento da mina porque ele pode causar explosões. Historicamente, as empresas de mineração não têm visto o metano associado como um recurso energético por si só.
- As entidades responsáveis pelas emissões de metano muitas vezes não estão familiarizadas com tecnologias existentes para a recuperação de metano ou com o potencial para projetos lucrativos de recuperação. Isto é especialmente verdadeiro nos países em desenvolvimento onde um melhor acesso à informação e treinamento técnico seria benéfico para gerar apoio a projetos de recuperação de metano.
- O mau funcionamento dos mercados de energia e a insolvência financeira dos serviços públicos e dos municípios de muitos países não conseguem proporcionar ao setor privado um clima que atraia seus investimentos em projetos de captação e utilização de metano.

Existem opções baratas e até rentáveis para reduzir as emissões de metano em um período de tempo relativamente curto. Em particular, reduções importantes de emissões podem ser obtidas por:

- Redução do consumo de energia, substituição de combustíveis fósseis, modernização da velha produção de gás e petróleo e da infraestrutura de distribuição de gás para reduzir vazamentos não intencionais (UNECE, 2020; SANTOS; FERREIRA FILHO, 2017).
- Fazer a máxima separação e tratamento de resíduos, e usar cada vez menos aterros sanitários para resíduos biodegradáveis. Estima-se que o potencial de redução global no setor de aterros sanitários para resíduos sólidos seja de aproximadamente 61%

das emissões de base até 2030, dos quais 12% podem ser atingidos a custos relativamente baixos ou nulos (CARDOSO; CARDOSO, 2016).

- Já para o caso de países em desenvolvimento como o Brasil, a desativação de lixões, usando cada vez mais aterros sanitários, com instalação de tecnologia que transforma o metano em CO₂ (*flare*, produção de energia) ou ainda envasamento do metano produzido (via biogás) em aterro sanitário para fins de uso como GNV (biometano) (CAICEDO-CONCHA et al., 2019; LIMA; BERSTEIN; VALLE, 2014).
- Melhorar os padrões sanitários nos países em desenvolvimento e implementar padrões ocidentais para o saneamento de águas residuais. O Novo Marco do Saneamento básico, no Brasil, aprovado em julho de 2020 (Lei nº 14.026/20), estabelecendo um novo quadro regulamentar para o saneamento básico do país) (BRASIL, 2020). Se quer, assim, alcançar o acesso universal aos serviços de saneamento básico até ao ano 2033, sendo 99% de todos os lares do Brasil com abastecimento de água e 90% com eliminação e tratamento de esgotos (SOUSA, 2020).
- Seguindo as recomendações da FAO para melhorar a saúde animal e a eficiência da produção de leite e carne (RESENDE *et al.*, 2020). A fermentação entérica de ruminantes - uma importante fonte de metano - também pode ser reduzida, por exemplo, através do ajuste da dieta dos animais e da vacinação (PREDREIRA et al., 2013; PHAND; PANKAJ, 2021).
- Mudando os hábitos alimentares através da redução do consumo de carne e laticínios, o que também traria benefícios adicionais à saúde (ZACH; BLACKSTONE, 2021).

4.1.8 Considerações finais

Este trabalho apresenta, de forma descritiva e abrangente, os principais conceitos acerca da química ambiental considerados necessários e essenciais para a compreensão do fenômeno do efeito estufa e do aquecimento global. Com a abordagem de conceitos sobre o metano, sua química, suas fontes e função como gás de efeito estufa, e seu efeito sobre o ozônio ao nível do solo e, portanto, sobre a saúde humana, possibilita-se reflexões no contexto da temática ambiental.

O efeito estufa natural é um dos fatores mais importantes para manter a Terra quente, pois impede que parte do calor do planeta escape para o espaço. A

temperatura média global da Terra seria substancialmente menor sem o efeito estufa, e a vida na Terra, como a conhecemos, seria impossível. Entre os gases que aumentam o efeito estufa destacam-se metano, dióxido de carbono, óxido nitroso e gases fluorados, entre outros. O gás metano é produzido por uma série de fontes antropogênicas (de origem humana) e naturais, tais como aterros sanitários, emissões fugitivas de sistemas de petróleo e gás natural, agricultura, tratamento de águas residuais, além da combustão estacionária e móvel.

Contudo, o aquecimento constante da atmosfera e da superfície da Terra causado pelos gases de efeito estufa tem resultado no aquecimento global desde o início do século anterior. A poluição veicular e industrial, assim como a agropecuária são os principais contribuintes para os gases de efeito estufa e o aquecimento global, sendo o gás metano um dos mais nocivos. Portanto, a Educação Ambiental aliada a ações de sensibilização ambiental pode reverter o atual cenário. Além disso, é extremamente importante a ampliação de ações conscientes tomadas por governos, empresas e sociedade para reduzir as emissões de metano.

A partir da discussão teórica apresentada neste artigo, espera-se contribuir para o debate sobre este importante tema ambiental, fomentado a sua inserção na sala de aula, de maneira multidisciplinar, principalmente do Ensino Médio e Fundamental visando engajar a comunidade escolar na construção de uma compreensão crítica no viés científico, promovendo a sensibilização ambiental.

REFERÊNCIAS

ARESTA, M.; DIBENEDETTO, A. **The Atmosphere, the Natural Cycles, and “Greenhouse Effect”**. The Carbon Dioxide Revolution. Springer, Cham., 2021.

ARI, I.; ŞENTÜRK, H. The relationship between GDP and methane emissions from solid waste: A panel data analysis for the G7. **Sustainable Production and Consumption**, v. 23, p. 282-290, 2020.

ARTAXO, P. Mudanças climáticas e o Brasil. **Revista USP**, n. 103, p. 8-12, 2014.

BARTHOLOMEU, B.D.; PÉRA, T.G.; CAIXETA-FILHO, J.V. Logística sustentável: avaliação de estratégias de redução das emissões de CO₂ no transporte rodoviário de cargas. **Journal of Transport Literature**, v. 10, n. 3, 2016.

BERRILL, P.; GILLINGHAM, K.T.; HERTWICH, E.G. Drivers of change in US residential energy consumption and greenhouse gas emissions, 1990–2015. **Environmental Research Letters**, v. 16, n. 3, p. 030445, 2021.

BONATO, S.; SCHWANTZ, P.I.; PRESTES, M.M.B.; BOHRER, R.E.G.; LARA, D.M. administração pública no âmbito da gestão de resíduos sólidos: um diagnóstico no município de Soledade/RS. **Revista Metropolitana de Sustentabilidade**, v. 11, n. 1, 2021.

BRASIL. **Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020**. Atualiza o marco legal do saneamento básico e dá outras providências. Diário Oficial da União 2020; 16 jul. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/lei-n-14.026-de-15-de-julho-de-2020-267035421>. Acesso em: 22 maio 2021.

CAICEDO-CONCHA, D.M.; SANDOVAL-COBO, J. J.; FERNANDO, C. Q. R.; MARMOLEJO-REBELLÓN, L. F.; TORRES-LOZADA, P.; SONIA, H. The potential of methane production using aged landfill waste in developing countries: A case of study in Colombia. **Cogent Engineering**, v. 6, n. 1, p. 1-15, 2019.

CARDOSO, F.C.I.; CARDOSO, J.C. O problema do lixo e algumas perspectivas para redução de impactos. **Ciência e Cultura**, São Paulo, v. 68, n. 4, p. 25-29, 2016.

CASTRO, B. M.; BRANDINI, F. P.; WAINER, I. E.; DOTTORI, M. O mar de amanhã, com as mudanças climáticas de hoje. **Ciência e Cultura**, São Paulo, v. 62, n. 3, p. 40-42, 2010.

COSTA, A. N.; DOMINGUES, E.G.; MEDEIROS, P.; STACH, A.H.M. Análise de Risco do Aproveitamento Energético do Biogás de Aterros Sanitários para a Geração de Eletricidade. **Revista Tecnica**, v. 1, n. 2, p. 111-127, 2016.

EPA. **Greenhouse gas emissions: nitrous oxide emissions**. 2020. Disponível em: <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases#nitrous-oxide>. Acesso em: 22 maio 2021.

EPA. **Greenhouse gas emissions: methane**. 2021. Disponível em: <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases#methane>. Acesso em: 22 maio 2021.

FAO. **Agriculture, Forestry and Other Land Use Emissions by Sources and Removals by Sinks**. Climate, Energy and Tenure Division, FAO, 2014. Disponível em: <http://www.fao.org/3/i3671e/i3671e.pdf>. Acesso: 23/05/2021.

FILIPPIDOU, E. C.; KOUKOULIATA, A. Ozone effects respiratory system. **Progress in Health Sciences**, v. 1, n. 2, 2011.

HEGERL, G. C.; ZWIERS, F. W.; BRACONNOT, P.; GILLET, N. P.; LUO, Y.; ORSINI, J. A. M.; ... PLANTON, S. Understanding and attributing climate change. *In*: SOLOMON S. *et al.*, eds. **Climate change 2007: the physical science basis**. Contribution of the Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK and New York: Cambridge University Press. p. 663-746, 2007.

IPCC. **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate

Change. S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.). Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom 996 pp., 2007. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar4/syr/>. Acesso em: 23 maio 2021.

IPCC. **Climate 2013: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1585 pp., 2013. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>. Acesso em: 23 maio 2021.

IPCC. **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change**. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. *et al.* (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2014. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/>. Acesso em 25 maio 2021.

JANARDANAN, R.; MAKSYUTOV, S.; TSURUTA, A.; WANG, F.; TIWARI, Y. K.; VALSALA, V.; ... MATSUNAGA, T. Country-Scale Analysis of Methane Emissions with a High-Resolution Inverse Model Using GOSAT and Surface Observations. **Remote Sensing**, v. 12, n. 3, p. 375, 2020.

LACERDA, F.; NOBRE, P. Aquecimento global: conceituação e repercussões sobre o Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 03, p. 14-17, 2010.

LIMA, A.K.C.; BERSTEIN, A.; VALLE, T.F. Aproveitamento energético do biogás a partir de resíduos sólidos. **Revista Educação Pública**, v. 16, p. 1-8, 2014.

LIOTTI, L.C.; CAMPOS, M.A.T. Livros didáticos do ensino médio e o conhecimento escolar sobre mudanças climáticas. **Revista Brasileira de Educação Ambiental**, v. 16, n. 2, p. 19–36, 2021.

LINS, N. S.; FERNANDES, N. N. B. Análise da práxis pedagógica de Educação Ambiental nas disciplinas Ciências e Geografia, modalidade EJA. **Revista Brasileira de Educação Ambiental**, v. 16, n. 3, p. 126-141, 2021.

LOPES, T. S.; ABÍLIO, F. J. P. Educação Ambiental Crítica: (re)pensar a formação inicial de professores/as. **Revista Brasileira de Educação Ambiental**, v. 16, n. 3, p. 38-58, 2021.

LYON, D. R.; HMIEL, B.; GAUTAM, R.; OMARA, M.; ROBERTS, K. A.; BARKLEY, Z. R.; ... HAMBURG, S. P. Concurrent variation in oil and gas methane emissions and oil price during the COVID-19 pandemic. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 21, p. 6605–6626, 2021.

MCGREGOR, A.; RICKARDS, L.; HOUSTON, D.; GOODMAN, M.K.; BOJOVIC, M. The Biopolitics of Cattle Methane Emissions Reduction: Governing Life in a Time of Climate Change. **Antipode**, fev. 2021.

ONU. Notícias. **Cut methane emissions to avert global temperature rise, UN-backed study urges**. 2021. Disponível em: <https://unece.org/challenge>. Acesso em: 23 maio 2021.

PEDREIRA, M. D. S.; OLIVEIRA, S. G. D.; PRIMAVESI, O.; LIMA, M. A. D.; FRIGHETTO, R. T. S.; BERCHIELLI, T. T. Methane emissions and estimates of ruminal fermentation parameters in beef cattle fed different dietary concentrate levels. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 42, n. 8, p. 592- 598, 2013.

PHAND, S.; PANKAJ, P.K. **Climate-Resilient Livestock Farming to Ensure Food and Nutritional Security**. In: Hebsale Mallappa V.K., Shirur M. (eds) *Climate Change and Resilient Food Systems*. Springer, Singapore, 2021.

PROCÓPIO, J.C.; VALE, K.C.; COSTA, F.J.; BARROS, C.F.A. A interdisciplinaridade da Educação Ambiental nas práticas educacionais de uma escola de ensino fundamental em Contagem (MG). **Revista Brasileira de Educação Ambiental**, v. 16, n. 3, p. 301–315, 2021.

PUROHIT, P.; HÖGLUND-ISAKSSON, L. Global emissions of fluorinated greenhouse gases 2005–2050 with abatement potentials and costs. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 17, p. 2795–2816, 2017.

RESENDE, L. O.; MÜLLER, M. D.; KOHMANN, M. M. et al. Silvopastoral management of beef cattle production for neutralizing the environmental impact of enteric methane emission. **Agroforestry Systems**, v. 94, p. 893–903, 2020.

RIBEIRO, M.T.; MALVESTIO, A.C. O ensino da temática ambiental nas Instituições de Ensino Superior no Brasil. **Revista Brasileira de Educação Ambiental**, v. 16, n. 3, p. 347-361, 2021.

RICE, M.B.; THURSTON, G.D.; BALMES, J.R.; PINKERTON, K.E. Climate change. A global threat to cardiopulmonary health. **American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine**, v. 189, n. 5, p. 512–519, 2014.

ROMANAK, K.; FRIDAHL, M.; DIXON, T. Attitudes on Carbon Capture and Storage (CCS) as a Mitigation Technology within the UNFCCC. **Energies**, v. 14, n. 3, p. 629, 2021.

SANTOS, J.A.; FERREIRA FILHO, J.B.S. Substituição de combustíveis fósseis por etanol e biodiesel no Brasil e seus impactos econômicos: uma avaliação do plano nacional de energia 2030. **Pesquisa e Planejamento Econômico**, v. 47, n. 3, p. 185-216, 2020.

SCHWAAB, K.; DETTLING, F.; BERNHARDT, D.; ELSNER, C.; SARTORIUS, R.; REIMANN, K.; ... PLEHN, W. **Fluorinated Greenhouse Gases in Products and Processes**: An Evaluation of Technical Measures to Reduce Greenhouse Gas Emissions. 2005. Disponível em: <https://bit.ly/3Ydfgeb>. Acesso em: 22 maio 2021.

SCHWANTZ, P.I.; ROTH, J.C.G.; SANTOS, E.F.; LARA, D.M. Reciclagem de resíduos oleosos: ação de sensibilização ambiental com alternativas de reciclagem pela produção artesanal de sabão. **Revista Estudo & Debate**, v. 26, n. 1, 2019.

SEEG. **Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa**. Emissões de GEE no Brasil e suas implicações para políticas públicas e a contribuição brasileira para o Acordo de Paris. Documento de Análise. Observatório do Clima. 51p. 2018.

SOUSA, A. C. A. O que esperar do novo marco do saneamento? **Cadernos de Saúde Pública**, v. 36, n. 12, dez 2020.

UNECE. **Methane management: the challenge**. 2020. Disponível em: <https://unece.org/challenge>. Acesso em: 22 maio 2021.

UNEP. **Global Methane Assessment: Benefits and Costs of Mitigating Methane Emissions**. 2021. Disponível em: <https://www.unep.org/resources/report/global-methane-assessment-benefits-and-costs-mitigating-methane-emissions>. Acesso em: 23 maio 2021.

VAN DINGENEN, R.; CRIPPA, M.; JANSSENS-MAENHOUT, G.; GUIZZARDI, D.; DENTENER, F. **Global trends of methane emissions and their impacts on ozone concentrations**. EUR 29394 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2018.

ZACH, C.; BLACKSTONE, N.T. Identifying the links between consumer food waste, nutrition, and environmental sustainability: a narrative review. **Nutrition Reviews**, v. 79, n. 3, p. 301–314, 2021.

ZHANG, J.; WEI, Y.; FANG, Z. Ozone Pollution: A Major Health Hazard Worldwide. **Frontiers in Immunology**, v. 10, p. 2518, 2019.

ARTIGO 2

4.2 ARTIGO 2 - PROJEÇÃO DO CH₄ GERADO EM ATERRO SANITÁRIO COM O USO DA METODOLOGIA ACM0001

Publicado em: A ser submetido para a Revista Ambiente & Sociedade.

Resumo: O estudo propôs realizar a estimativa do gás metano (CH₄) gerado nas condições previamente conhecidas pela atividade de aterro sanitário sendo este o aterro sanitário Central de Resíduos do Recreio, localizado no município de Minas do Leão, Rio Grande do Sul, Brasil. Os resultados compostos apresentam 322.844 t/CH₄, e/ou 8.071.580 t/CO_{2e} acumulados no cenário recomendado, e 215.231 t/CH₄ e/ou 5.380.749 t/CO_{2e} acumulados no cenário conservador entre o período de 2001 a 2021. Foi empregado a metodologia de projetos de créditos de carbono para aterros sanitários ACM0001: Queima ou uso de gás de aterro. Outros resultados também foram produzidos, como a projeção de CH₄ e CO_{2e} até 2030 consonante à agenda ODS 2030, o CH₄ produzido por tipo de resíduos além do CH₄ convertido para unidade volumétrica de Nm³ para comparação com o biogás. Os valores indicaram que a fração de resíduos de alimentos é a maior produtora de CH₄. Via de regra, o metano em aterros sanitários varia de 45-60%. A presença de CH₄ no biogás pode oscilar entre 45-81% considerando os limites de cada cenário apresentado.

Palavras-chave: Metano. Resíduos Sólidos. Aterro Sanitário. Metodologia ACM0001.

Abstract: The study proposed to carry out the estimation of the methane gas (CH₄) generated in the conditions previously known by the landfill activity being this one the landfill Central de Resíduos do Recreio, located in the municipality of Minas do Leão, Rio Grande do Sul, Brazil. The composite results present 322,844 t/CH₄, and/or 8,071,580 t/CO_{2e} accumulated in the recommended scenario and 215,231 t/CH₄ and/or 5,380,749 t/CO_{2e} accumulated in the conservative scenario between the period from 2001 to 2021. The landfill carbon credit project methodology ACM0001: Landfill gas flaring or use was employed. Other results were also produced, such as the projection of CH₄ and CO_{2e} up to 2030 consistent with the SDG 2030 agenda, CH₄ produced by type of waste in addition to CH₄ converted to volumetric unit of Nm³ for comparison with biogas. The values indicated that the food waste fraction is the largest producer of CH₄. As a rule, methane in landfills ranges from 45-60%. The presence of

CH₄ in biogas can range from 45-81% considering the limits of each scenario presented.

Keywords: Methane. Solid Waste. Landfill. Methodology ACM0001.

4.2.1 Introdução

O setor de resíduos é o segundo maior gerador que emite Metano (CH₄) no Brasil, responsável por com 15,8% das emissões em 2020 (3,17 Mt CH₄), sendo que a maior contribuição (66.6% do total emitido) vem da disposição final de resíduos sólidos (SEEG, 2022).

Certamente as soluções com maior potencial de redução voltadas para os resíduos sólidos e o setor, estão através da redução gradativa de resíduos orgânicos em aterros sanitários, recuperação ou queima de pelo menos 50% do biogás gerado por aterros e a erradicação de lixões a céu aberto (SEEG, 2022).

A exemplo disso, segundo Carvalho et al. (2019), o potencial de produção de biogás pode ser calculado a partir da utilização de modelos matemáticos que preveem o volume de gases ao longo do tempo, sobretudo o metano, advindos do processo de decomposição anaeróbica da matéria orgânica presente nos resíduos acumulados em aterros sanitários.

Assim como, os valores de redução de CH₄ produzidos em aterro sanitário também são calculados, atualmente à base do peso dos resíduos sólidos recebidos diariamente, já existem atualmente fórmulas matemáticas através das quais se consegue, de forma mais apurada, definir a quantidade de CH₄ produzido e a quantidade de redução de liberação de CH₄ à atmosfera devido o processo com a queima do CH₄ (UNFCCC, 2019).

De acordo com Abrelpe (2012), os métodos de previsão de geração de gás começaram a surgir no início da década de 1970. Alguns estudos buscaram o aprimoramento de métodos a exemplo de Cossu et al. (1997) que estabeleceu a seguinte definição de tipos de modelos onde t = tempo, e C = quantidade de metano gerada ou de substrato degradável.

Nesse sentido, existem vários modelos propostos para a previsão da quantidade de metano produzida ao longo da vida útil de um aterro. Geralmente, esses

modelos acabam situando-se em quatro categorias distintas: de ordem zero, de primeira ordem, multifásicos e de segunda ordem (COOPS et al., 1995; ABRELPE, 2012).

Efetivamente os modelos matemáticos, bem como as estimativas da geração de metano em um aterro, não são simples, pois envolvem uma série de reações e condições ambientais, tornando essas estimativas complexas (VIEIRA, 2021). Dessa forma, o objetivo desse estudo aborda questões referentes a projeção de quantidades de valores de CH_4 em um aterro sanitário com um modelo de decaimento de primeira ordem, possibilitando compreender a dinâmica envolvida neste processo de forma facilitadora. O aterro sanitário da CR do Recreio é um local de disposição final de resíduos sólidos, onde costuma receber entre 2.500 e 4.000 t/RSU por dia. O local está situado no município de Minas do Leão, Rio Grande do Sul, aproximadamente 80 km a oeste da cidade de Porto Alegre, na região sul do Brasil. As coordenadas geográficas exatas do local são: $30^\circ 8' 49'' \text{ S}$ (-30,1469) $52^\circ 1' 33'' \text{ W}$ (-52,0258). As operações são gerenciadas pela Companhia Riograndense de Valorização de Resíduos S/A.

A medida do alcance do projeto implantado atendendo os municípios cadastrados que destinam seus rejeitos, confere a exploração do gás de aterro produzido pela decomposição dos resíduos sólidos domésticos por meio do sistema de digestão anaeróbica. A estrutura moderna do aterro (Figura 4) contém uma eficiente rede de captação de biogás operações unitárias de tratamento do gás de aterro, combustão em flare centralizado e valorização do biogás através da geração de energia elétrica a partir de moto geradores.

Portanto, para que haja intenções futuras de aperfeiçoamento sobre os processos científicos, operacionais e regulatórios, as estimativas geradas de CH_4 do estudo podem contribuir para um banco de dados, bem como subsidiar relatórios e programas no nível estadual quanto a redução das emissões de GEE no RS no âmbito dos aterros sanitários.

4.2.2 Passos metodológicos

O estudo tratou de estimar o gás Metano (CH_4) e demais unidades de Gases de Efeito Estufa (GEE) como Dióxido de Carbono Equivalente (CO_{2e}), produzidos pela disposição final de resíduos sólidos em aterro sanitário diante do modelo de primeira

ordem, a metodologia ACM0001: Queima ou uso de gás de aterro - Versão 19.0 - Ferramenta 04 do MDL. É constatado no componente 3 METODOLOGIA, o detalhamento de cada componente envolvido (TOOL, 2019).

O local é uma área de 129 hectares, sendo 84 para recebimento dos resíduos que aproveitou a condição favorável gerada pela mineração do carvão a céu aberto (Mina do Recreio) para recomposição da paisagem, além da hidrogeologia adequada ao empregar a atividade de aterro sanitário (CRVR, 2023).

De acordo com a avaliação do Índice de Qualidade de Aterros Sanitários (IQAS), o aterro sanitário CR do Recreio, tornou-se o primeiro aterro sanitário do Estado do Rio Grande do Sul a receber a pontuação máxima de 100 pontos da FEPAM (Fundação de Proteção Ambiental), órgão de fiscalização ambiental do Estado. Os critérios consideram o monitoramento ambiental, limpeza e presença de vetores, compactação dos resíduos, cobertura do aterro, tratamento do chorume e biogás, para avaliar as condições adequadas de operação da atividade.

4.2.3 Resultados e Discussão

O Aterro CR do Recreio tem capacidade para receber 90.000 t/RSU por mês (conforme estabelecido na Licença de Operação 4268/2012-DL). O Aterro CR do Recreio recebe atualmente resíduos sólidos de mais de uma centena de municípios do Rio Grande do Sul, incluindo a capital do Estado, Porto Alegre (CDM-PDD, 2014).

São utilizados diversos procedimentos de tecnologia de coleta de gás contendo poços verticais e horizontais, para extrair o chorume e o gás. Poços centrais e a rede de drenos, otimiza a extração e medição do gás produzido, de acordo com as informações coletadas na empresa.

O aterro sanitário contém uma planta de sucção forçada com 5 sopradores, na qual também detêm sistema de separação de fases líquida-gás para extração de líquidos condensados, e assim ser submetido a combustão em flare, para fins de mitigação de impactos ambientais e também para questões de segurança geotécnica do aterro sanitário. Além disso, a maior parcela do biogás captado é encaminhada para tratamento por adsorção, e posteriormente para a termoelétrica para geração de energia.

A planta de sucção que recebe o gás do aterro tem aplicação nos motores estabelecidos da termelétrica para geração de energia. O projeto funciona em duas

fases: Recebimento para destinação ambientalmente adequada dos resíduos sólidos, capturando o metano produzido pelos mesmos; e geração de eletricidade de fonte renovável por meio da captação de biogás do aterro.

A queima do CH_4 no *Flare* principal, ocorre acima de $500\text{ }^\circ\text{C}$, garantindo a destruição do metano e a obtenção de créditos de carbono. Abaixo dessa temperatura o CH_4 é destruído, mas sem a certificação de redução de emissão. A quantidade convertida em CO_2 vai para a atmosfera, contendo ainda tratamento e recirculação de lixiviados (CDM-PDD, 2014).

Figura 5 - Vista aérea do local da área do Aterro Sanitário CR do Recreio



Fonte: CDM-PDD-FORM-Version 08.0 (2017).

Este meio de verificação atua como uma ferramenta para avaliação dos sistemas de disposição final de resíduos sólidos urbanos. Dessa forma, consolida as práticas desenvolvidas do local e se torna referência para os demais SWDS do Estado do RS.

4.2.3.1 Projeto de MDL: Aterro Sanitário da Central de Resíduos do Recreio

A CRVR elaborou o projeto *Central de Resíduos do Recreio Landfill Gas Project (CRRLGP)*, utilizando a metodologia ACM0001 versão 15, para queima e uso de biogás de aterro. Submetido durante a vigência do Protocolo de Kyoto, uma das ferramentas do Protocolo era o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL).

A empresa protocolou projeto em 2006 o primeiro pedido de validação para Redução Certificada de Emissão (RCE), em inglês, *Certified Emission Reductions (CER)* os “créditos de carbono”, conseguindo a permissão de obtenção a partir de dezembro de 2007.

Segundo o Documento de Design do Projeto (Project Design Document – PDD/CRRLGP), versão 05.0 do CDM/MDL (2014), o 1º período de crédito de 7 anos, foi de 2007 a 2013, apresenta uma média de redução ao ano de 107.881 t/CO_{2e}/ano, segundo o MDL. Nos primeiros 6 monitoramentos, foram alcançadas 965.804 t/CO_{2e} de RCE. No ano de 2013, avaliado e verificado em relatório separado, obteve a remoção de 317.385 t/CO_{2e}, totalizando o primeiro período de crédito a remoção de 1.283.189 t/CO_{2e}, de acordo com a publicação.

As ferramentas são usadas para calcular, determinar, demonstrar, estimar, identificar e/ou testar informações relacionadas a uma atividade de projeto do MDL e geralmente são referenciadas em uma metodologia ou formulário aprovado. Quando referenciado, todos ou os componentes especificados da ferramenta são necessários e obrigatórios (UNFCCC, 2023).

Segundo o Documento de Design do Projeto (Project Design Document – PDD/CRRLGP), versão 08.0 do CDM (2017) e o relatório de validação para renovação do período de crédito (RCO), versão 1.0 (2015), o 2º período de crédito de 7 anos de dezembro de 2014 a novembro de 2021, apresenta uma média de redução ao ano de 506.798 t/CO_{2e}/ano de RCE, sem considerar o desconto para geração de eletricidade alterando a média de redução para 489.799 t/CO_{2e}/ano, segundo as estimativas antecipadas anuais de redução a serem alcançadas do MDL. Neste respectivo período, foram removidas da atividade emissora de metano 3.547.588 t/CO_{2e}, conforme a publicação.

Os dados apresentados podem ser observado no relatório do MDL (2023) publicado em janeiro no site cdm.unfccc. Até este estudo, não foi encontrada a validação do terceiro período, no site da UNFCCC. Todas as informações descritas

são dados públicos e podem ser acessados nos históricos de monitoramento de pesquisa por projeto no website do MDL/UNFCCC.

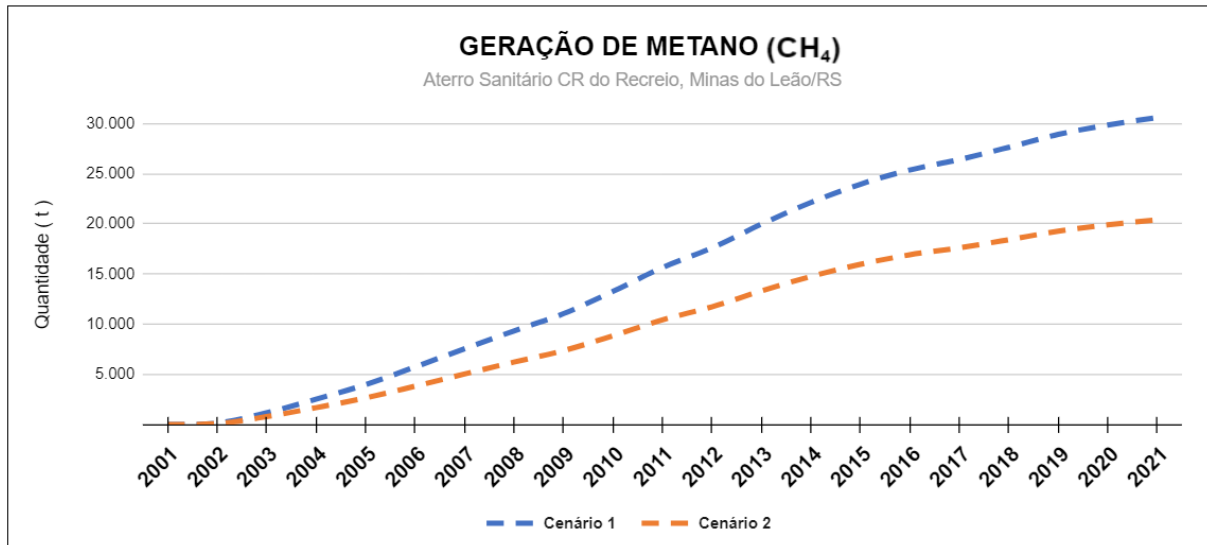
Balizar os dados de remoção resultantes da captura de CH_4 contém grande relevância para aferir emissões. A nomenclatura seguinte observada por produção e geração de Metano, definiu-se para apresentar os valores estimados do proposto na metodologia.

4.2.3.2 *Projeção de Metano (CH_4)*

Os modelos cinéticos de primeira ordem incluem o efeito da idade sobre a geração de metano. Presume-se que a formação de gás de aterro a partir de um determinado montante de resíduos decaia exponencialmente com o passar do tempo. Modificações nos modelos de primeira ordem também foram realizadas para incluir o acúmulo da fase metanogênica e a dependência de temperatura (COOPS et al., 1995).

A estimativa do total de CH_4 produzido no Aterro Sanitário Central de Resíduos do Recreio, no município de Minas do Leão, está ilustrada na Figura 6, para os anos de 2001 a 2021. O total de metano produzido de todos os resíduos sólidos, contempla as frações: Alimentos, Papéis e celulose, Têxteis, Jardins e rejeitos e Madeiras e derivados, ambos contendo carbono degradável. Adicionalmente o Anexo 3 (Relatório das projeções de CH_4) e na Figura 12 (CH_4 gerado por cada tipo de resíduo) mencionam a representatividade de demais informações.

Figura 6 - Total da geração acumulada de Metano produzido em toneladas entre 2001 e 2021 no Aterro Sanitário da Central de Resíduos do Recreio.



Fonte: Autor (2023).

O gráfico acima apresenta o resultado da projeção de metano com valores atribuídos ao parâmetro *Fator de Correção para as Incertezas do Modelo para o ano y* (ϕ_y).

Observa-se que a produção de CH₄ apresenta duas séries históricas, Cenário 1 (Recomendado) e Cenário 2 (Conservador). O primeiro cenário com tracejado em azul considerou o valor de $\phi_y = 0,75$ indicado pelo *CDM Tool 04*, classificado como valor Recomendado. O segundo cenário em cor laranja, possui $\phi_y = 0,50$ classificado pelo autor como valor Conservador, devido a proximidade dos valores finais comparados ao PDD do Aterro sanitário. Conforme já explicitado ao longo do componente 3 *METODOLOGIA*, o parâmetro ϕ_y tem seu uso atrelado a correção de valores da equação.

Os resultados de metano aumentaram consideravelmente ao longo dos anos em mais de 30.000% no cenário 1 e acima de 20.000% no cenário 2 até o ano de 2021, em comparação a 2001. Para faixa do cenário 1, o resultado no ano de 2021 foi de 30.607 t/CH₄/Ano. A faixa do cenário 2 apresentou 20.405 t/CH₄/Ano.

Entre os anos de 2001 e 2021 foram produzidas 322.844 t/CH₄ cenário 1, e com o cenário 2 totalizou 215.231 t/CH₄ resultando em uma diferença de 107.613 t/CH₄, entre os dados apresentados.

Vieira e Candiani (2021) apresentaram valores de 8.258.530,84 m³ t/CH₄/ano em seus estudos.

O aterro sanitário em questão leva projeção do município de São Caetano do Sul - SP, onde irá produzir CH₄ em vista de aplicar o biogás com potencial energético, correspondendo a 1,63 MW. O método utilizado para realizar a estimativa de geração de metano dos RSU foi o procedimento equacional do IPCC (1996; 2000). A referência carrega a premissa que todo RSU depositado em aterro sanitário passa pelo decaimento de primeira ordem ao obter o estado gasoso e a sugestão de mitigação pela captura do metano contido no biogás.

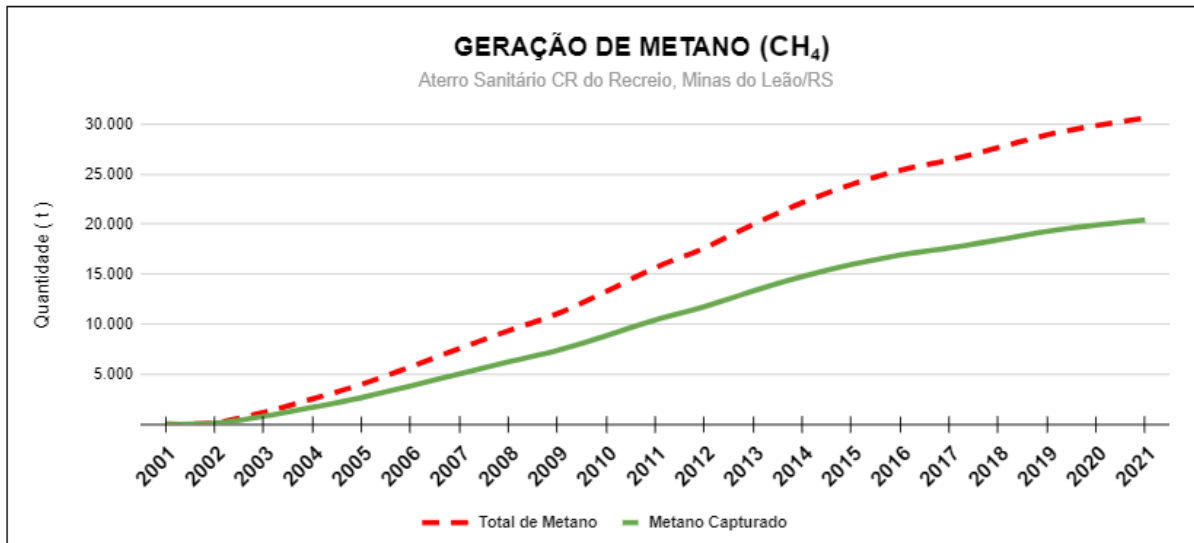
Quanto ao aterro sanitário CR do Recreio, o ano de maior recebimento de RSU foi 2019, totalizando 1.217.756 t/RSU/Ano. Em tese, foram gerados 28.923 t/CH₄/Ano aplicando $\phi_y = 0,75$ e 19.906 t/CH₄/Ano sendo $\phi_y = 0,50$.

É seguro afirmar que o CH₄ produzido em sua totalidade não foi liberado para a atmosfera, devido a captação pelas redes de biogás. A estimativa do cenário 2 utilizada com o parâmetro $\phi_y = 0,50$ obteve o resultado diante da proximidade da realidade do aterro, de acordo com os relatórios publicados de verificação de RCE pelo MDL. Ainda, uma parcela do aterro que gera biogás é queimada em campo, deixa de ser mensurado nos sistemas de captação e valorização como também, na obtenção das RCE. A estimativa do cenário 1 com $\phi_y = 0,75$ comparado com as RCE emitidas, apresenta superestimado de emissão.

Considerando os valores atestados pelo MDL sobre o aterro, foi prudente utilizar os valores cenário 2. Dessa forma, foi comparado como resultado de emissão o parâmetro $\phi_y = 0,50$ na Figura 7, com a quantidade reduzida do total de metano produzido.

O parâmetro *Fração Capturada de Metano (F_y)*, foi contabilizado a fim de identificar a captura para cada ano e interpretar os valores estimados de emissão na comparação com os valores capturados. Se relacionar o *Fator de Correção para as Incertezas do Modelo (ϕ_y)* sendo $\phi_y = 0,75$ para o total de metano produzido e converter o valor encontrado de $\phi_y = 0,50$ para a *Fração Capturada de Metano* na equação, sendo $F_y = 33\%$, encontra-se valores similares das RCE, dando ênfase que o percentual da quantidade capturada pelo aterro é de 77%, diante das estimativas apresentadas.

Figura 7 - Quantidade produzida e captura de metano em toneladas entre 2001 a 2021 no Aterro Sanitário da Central de Resíduos do Recreio.



Fonte: Autor (2023).

Observa-se a definição da potencial quantidade produzida de metano na cor tracejada em vermelho, e a quantidade capturada desse metano na cor verde pelo aterro sanitário, ambos os dados já contextualizados anteriormente.

Segundo Okamura (2013), ao comparar a densidade do metano presente no gás de aterro sanitário com o de biodigestores, resulta em 45% de metano e 65% de metano no biogás nas duas origens, respectivamente. O valor chama atenção pela eficiência no procedimento operacional ao analisar $F_y = 33\%$ na equação refletir em 77% do metano capturado, acima do teor do metano presente no biogás, coletado pela empresa Biotérmica entre 2016 a 2021.

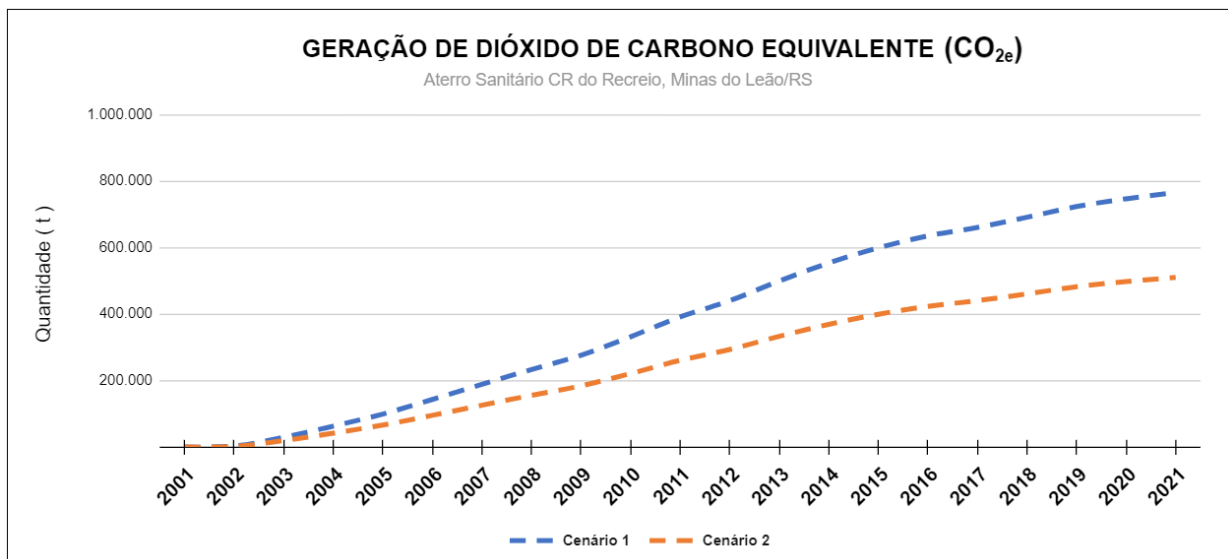
Quando dispostos adequadamente em aterros sanitários, toda a matéria orgânica acumulada tem um grande potencial para produção de biogás, rico em gás metano, o qual pode ser usado como fonte de energia. Este aproveitamento reduz os impactos ambientais de sua liberação descontrolada na atmosfera e oferece recursos energéticos e receitas financeiras para a sociedade em geral (NASCIMENTO et al., 2019).

4.2.3.3 Projeção de Dióxido De Carbono Equivalente (CO_{2e})

Existem duas abordagens para determinação do carbono equivalente: o *GWP* (Global Warming Potential) e o *GTP* (Global Temperature Change Potential). O primeiro é definido pela influência dos gases na alteração do balanço energético da Terra e, o segundo, pela influência no aumento de temperatura, em um prazo de 100 anos. É mais comum o reporte das emissões com base em GWP (SEEG, 2022).

A Figura 8 apresenta os resultados para CO_{2e}, em toneladas estimadas entre 2001 e 2021, no mesmo local citado anteriormente. Foi utilizado a premissa do *Fator de Correção do Modelo* (ϕ_y), com uso de $\phi_y = 0,75$ para cenário 1 (recomendado) pelo *CDM Tool 04*, e o uso de $\phi_y = 0,50$ para o cenário 2 (conservador) classificado pelo Autor.

Figura 8 - Total de carbono equivalente (CO_{2e}) em toneladas entre 2001 a 2021 no Aterro Sanitário da Central de Resíduos do Recreio.



Fonte: Autor (2023).

Observa-se para o ano de 2021 o total de 765.182 t/CO_{2e}/Ano com o parâmetro ϕ_y , cenário 1 (0,75) do MDL. No mesmo ano, sendo o cenário 2 (0,50), o resultado foi de 510.121 t/CO_{2e}/Ano.

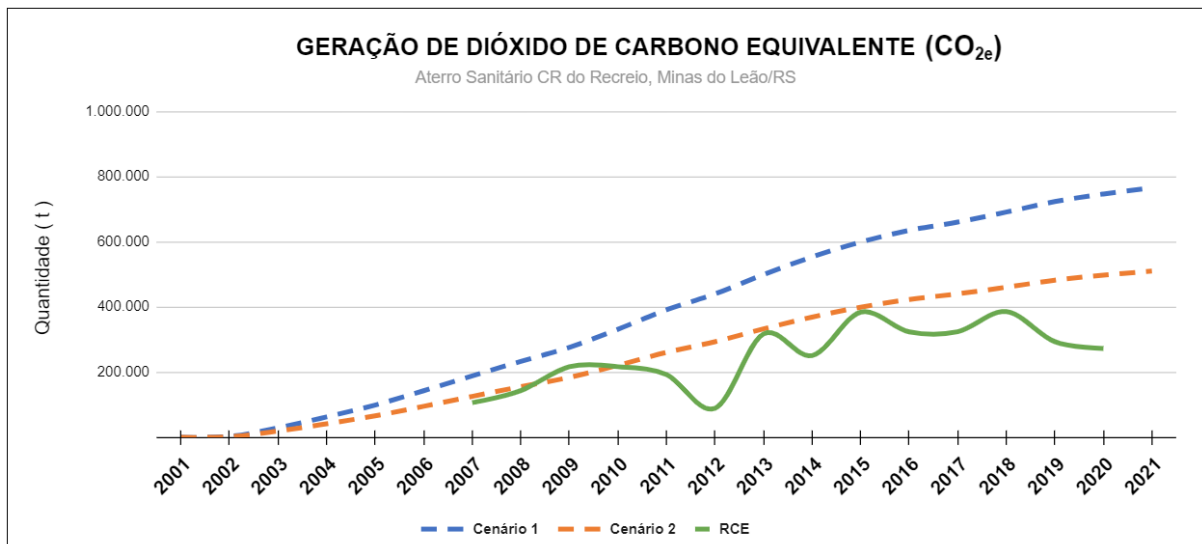
Entre os anos de 2001 e 2021 foram produzidas 8.071.580 t/CO_{2e}, no cenário 1, e com a faixa de cenário 2 foram 5.380.749 t/CO_{2e} resultaram a diferença de 2.690.831 t/CO_{2e}, entre os dados apresentados.

Foram adotados ao parâmetro GWP, em português, *Potencial de Aquecimento Global (PAG)*, na unidade de CO_{2e}. Nestes resultados foi utilizado GWP do quinto relatório de avaliação do painel intergovernamental sobre mudanças climáticas (AR5). A conversão de diferentes gases possui um histórico de variação (IPCC, 2014). Cada gás de efeito estufa é capaz de reter calor em determinada intensidade, sendo comparada à capacidade do dióxido de carbono (CO₂) de realizar a mesma função (FGVces, 2022).

Avaliando o período do estudo de 2001 a 2021, foram encontradas alterações de GWP para CH₄. AR4 = 25 (2007); AR5 = 28 (2014) e ainda posteriormente AR6 = 27 (2022). Na tentativa de estimar as emissões o mais perto da realidade, utilizou-se PAG=25 aplicado na equação.

Encontra-se na Figura 9, a quantidade de Reduções Certificadas de Emissões (RCE) ao longo de 2007/2013 e 2014/2021, que foram obtidas pelo aterro sanitário e verificadas pelo MDL. As informações das RCE's foram retiradas dos relatórios publicados no site do MDL, <https://cdm.unfccc.int/>.

Figura 9 - Comparação da estimativa de CH₄ com as RCE's no Aterro Sanitário da Central de Resíduos do Recreio.



Fonte: Autor (2023).

A série histórica diante da linha cor verde permite observar a quantidade capturada pelo aterro de forma aceita pelo MDL por meio das RCE verificadas e atestadas pelo próprio órgão. Além disso, observa-se para o ano de 2021 que ainda não consta o resultado publicado. No primeiro ano de 2007, obteve 106.610 t/CO_{2e}, e

em 2013 o total de 317.385 t/CO_{2e}. Em 2015, um aumento totalizando 383.967 t/CO_{2e} e uma queda em comparação ao ano de 2020 a redução de 272.853 t/CO_{2e}.

Segundo Montagner (2021), o Metano aplicado ao realizar a contenção seguida de tratamento, o biogás deixa de ser um passivo ambiental, e se torna um importante recurso energético, seja como combustível ou energia elétrica, e fonte de riquezas, agregando valor com a venda de créditos de carbono.

O resultado do ano de 2018 foi de 386.045 t/CO_{2e}. O valor esteve muito próximo da estimativa do cenário 2 com tracejado laranja, comparado ao cenário 1 com tracejado em azul ao longo da vigência da série. Entre 2007 e 2010 as reduções foram ainda maiores do que o previsto no cenário 2 e estiveram muito próximas nos anos de 2013 e 2015.

É importante salientar que o valor excedente das RCE's, necessariamente não seja CH₄ emitido para atmosfera pois este ter sido convertido em sua grande parte, mas não certificado pelo MDL, em razão das exigências previstas de verificação. Entre as quais, o atingimento da temperatura mínima acima de 500°C é premissa para obter uma RCE, convertendo em CO_{2e} verificado.

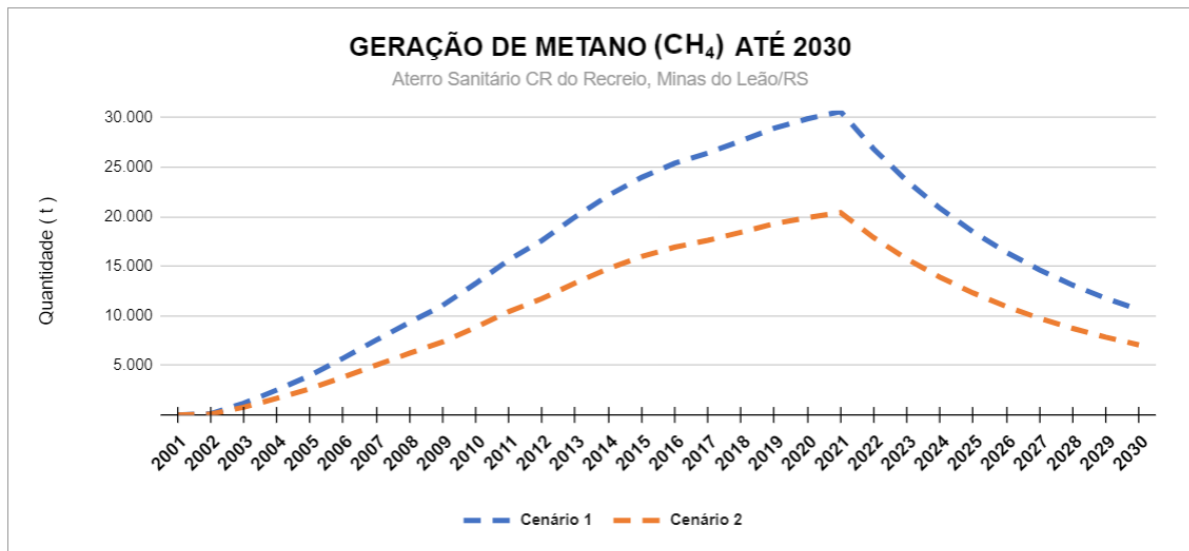
O avanço gradual do uso do aterro, além do uso da queima do metano no *flare* houve instalações de drenos verticais e a conexão dessas tubulações, sendo parte do gás metano queimado nestes equipamentos, muitas vezes sem as RCE's obtidas.

A fórmula do CDM Tool 04 é aplicada nos estágios iniciais de um projeto para atingir as RCE's. De acordo com Viana (2011) e Santos (2014), os valores são superestimados muitas vezes nas estimativas, elevando a expectativa por parte de investidores e gestores, chegando ao fim do período, sem ter atingido o valor previamente conhecido.

4.2.3.4 Projeção de Metano até 2030

Além das estimativas durante o período de 2001 a 2021, a Figura 10 apresenta de forma hipotética a contar o recebimento dos RSU até 2021. Considerou-se o restante da década projetado aos ODS 2030 da ONU.

Figura 10 - Projeção de metano em toneladas entre 2022 e 2030 no Aterro Sanitário da Central de Resíduos do Recreio.



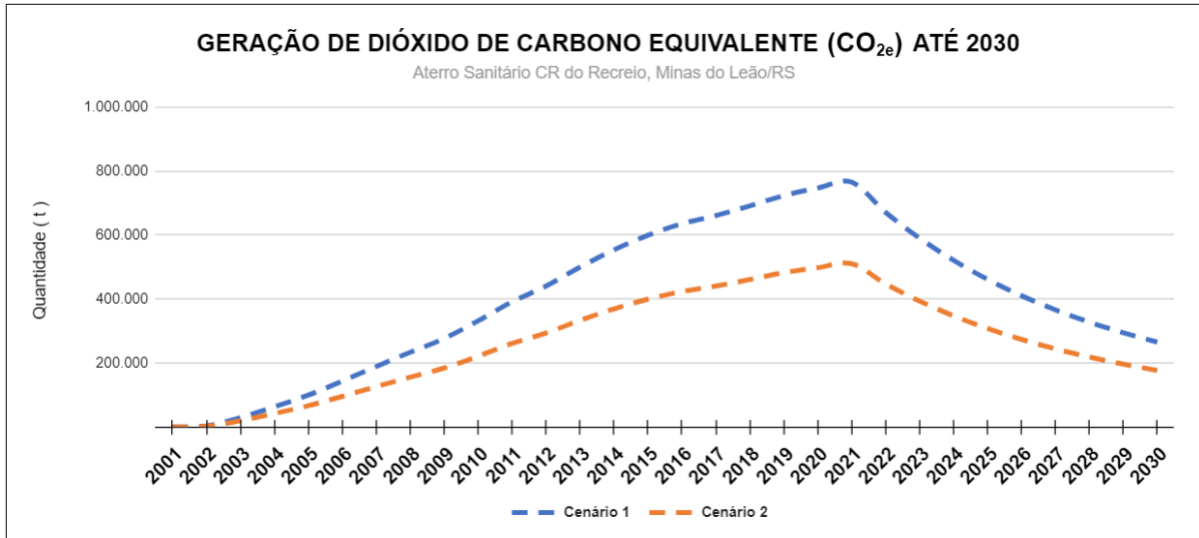
Fonte: Autor (2023).

A partir dos resíduos sólidos depositados no ano de 2001 até 2021, a cor tracejada azul representa total de 156.287 t/CH₄ e 104.190 t/CH₄ na cor tracejada laranja, o que seria produzido entre o período de 2022 a 2030.

A aplicação do parâmetro Fator de Correção do Modelo (ϕ_y) cenário 1 (0,75) do MDL e cenário 2 (0,50) foram considerados novamente. Houve a média de 17.365 t/CH₄ e 11.577 t/CH₄, de acordo com cada um dos modelos.

Observa-se para o ano de 2022 o total de 26.835 t/CH₄/Ano ao cenário 1. O resultado do cenário 2, resultou em 17.890 t/CH₄/Ano. A produção de CH₄ apresentou queda entre os anos de 2021 e 2022, com a redução de 3.772 t/CH₄ e 2.515 t/CH₄ em cada cenário.

Figura 11 - Projeção de carbono equivalente entre 2022 e 2030 no Aterro Sanitário da Central de Resíduos do Recreio.



Fonte: Autor (2023).

Na mesma lógica da Figura 10, o gráfico acima (Figura 11) apresenta a projeção para a unidade CO_{2e}, com a mesma proporcionalidade. Observa-se a linha com tracejado azul para a projeção de CO_{2e} até o ano de 2030 com o total de 3.907.190 t/CO_{2e} com uma média de 434.132 t/CO_{2e}/ano, diante do cenário 1. Para o cenário 2 com linha tracejado laranja, seriam produzidos 2.604.795 t/CO_{2e}, com uma média de 289.422 t/CO_{2e} ao longo de 9 anos, sem qualquer desconto. Ainda, resultaria em uma diferença de 1.302.395 t/CO_{2e}, entre os dados apresentados.

Caberia discussões acerca de procedimentos e marco regulatórios para os próximos anos, a fim da redução das emissões de GEE e a progressiva captura de CH₄ e demais GEE.

Vale lembrar que o mercado de carbono é, portanto, um universo que engloba diversas transações por meio das quais volumes de reduções de emissões de GEEs são comercializados, e diferencia-se relativamente ao tamanho, ao formato e à regulamentação. As informações sobre este mercado são limitadas, e nele muitas das transações ocorrem de forma estritamente privada, não sendo obrigatória a publicação dos termos de cada acordo, em particular dos preços e volumes de reduções de GEEs (IPEA, 2018).

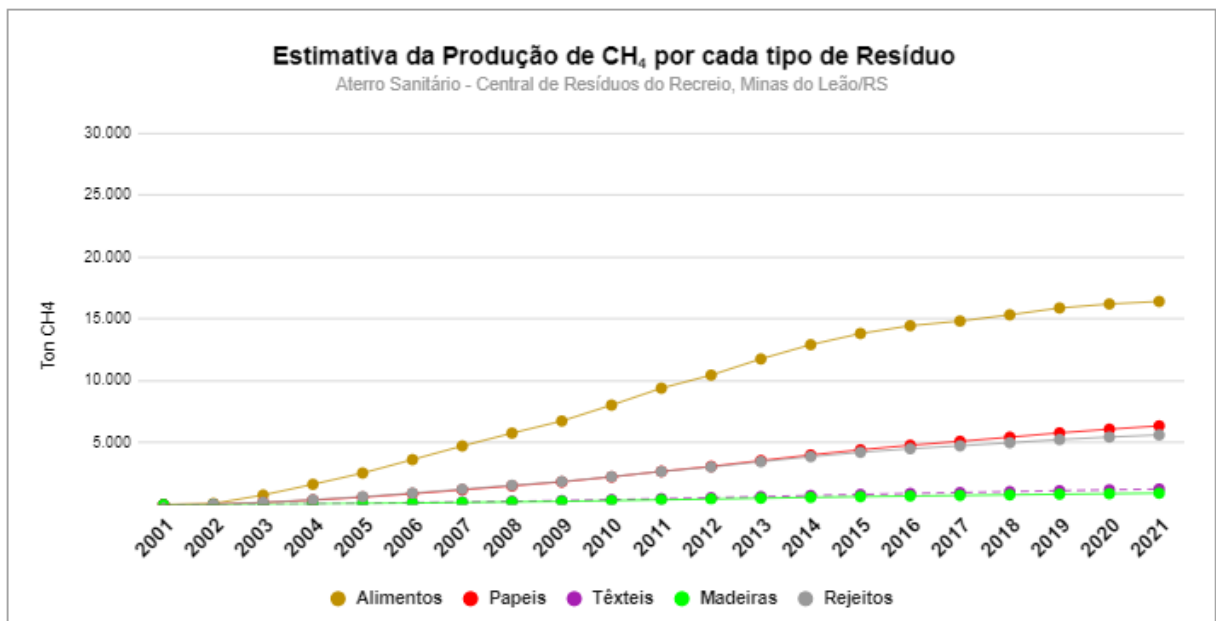
4.2.3.5 Projeção por Índice de Tipo de Resíduo (j)

A apresentação do índice de tipo de resíduo de CH₄ produzido somado por cada tipo de resíduo, representou o total de 322.845 t/CH₄ e 215.231 t/CH₄ de acordo com as definições apresentadas anteriormente, com os dados de recebimento de RSU do Aterro Sanitário Central de Resíduos do Recreio no município de Minas do Leão - RS entre 2001 a 2021.

Levando em conta o consumo e descarte dos materiais, a estimativa atrelada a cada resíduo, em seis classificações gerou 231 valores retroativos, 189 futuristas resultando em 420 valores entre as células e colunas para cada estimativa. No entanto, totalizou entre 21 e 30 resultados finais com projeção retroativa e futura, considerado cada série histórica pesquisada.

Os valores foram distribuídos por cada tipologia considerando o parâmetro Tipo de Resíduo (j) disposto no aterro ilustrando as maiores contribuições para a produção de CH₄ (Figura 12).

Figura 12 - Estimativa por Tipo de Resíduo (j) em toneladas entre 2001 a 2021 disposto no aterro sanitário.



Fonte: Autor (2023).

A exponencialidade de cada ano de metano produzido na série histórica, tem influência de acordo com a fração de carbono orgânico degradável que cada fração possui. A faixa da cor amarela para Alimentos, sendo resíduos orgânicos destinados

ao aterro sanitário, seguido por Papéis em vermelho, Jardins/Rejeitos em cinza, Têxteis em lilás e por fim, Madeiras e derivados na cor verde.

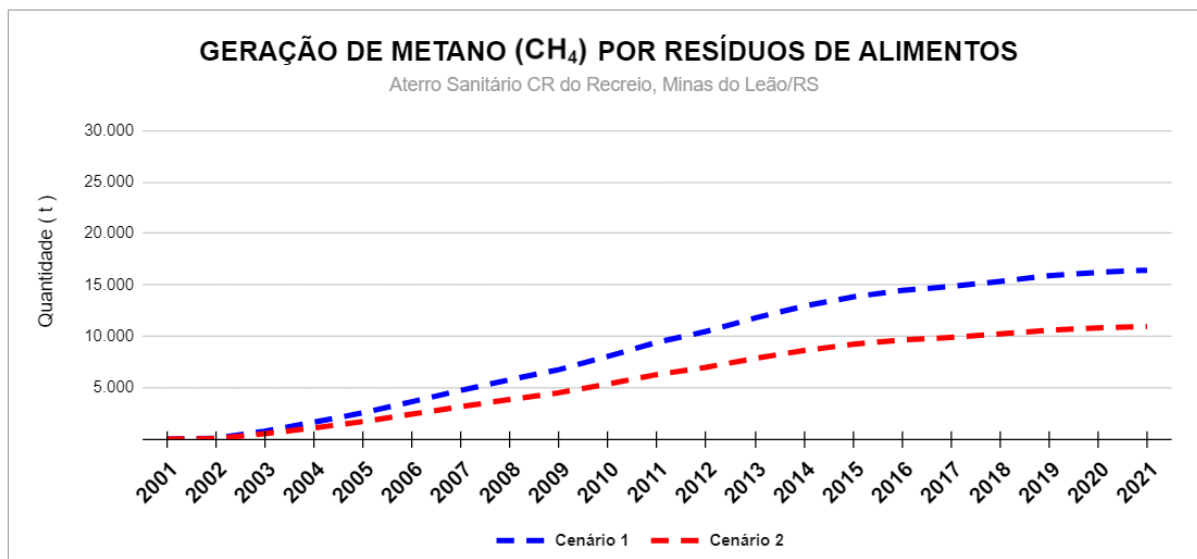
4.2.3.5.1 Resíduos de Alimentos

A maior quantidade estimada de metano gerado por fração j é Alimentos. Levando em conta as premissas do cenário 1 com a cor tracejado em azul e cenário 2 com a cor tracejado em vermelho, o ano de 2021 gerou 16.428 t/CH₄ e 10.952 t/CH₄, respectivamente.

Entre os anos de 2001 e 2021 (Figura 13), foram produzidas 185.623 t/CH₄ e 123.748 t/CH₄ com média de 8.839 t/CH₄/ano e 5.893 t/CH₄/ano, respectivamente.

Apesar de conter a menor fração de carbono degradável DOC_j , é o tipo j com maior valor de *Velocidade de Decomposição* (k). A falta de valoração sobre este material mediante outros processos como a compostagem antes da destinação final para o aterro sanitário, acarreta em maior quantidade e baixa redução de descarte.

Figura 13 - Estimativa j de Alimentos em toneladas entre 2001 a 2021 disposto no aterro sanitário.



Fonte: Autor (2023).

4.2.3.5.2 Resíduos de Papéis

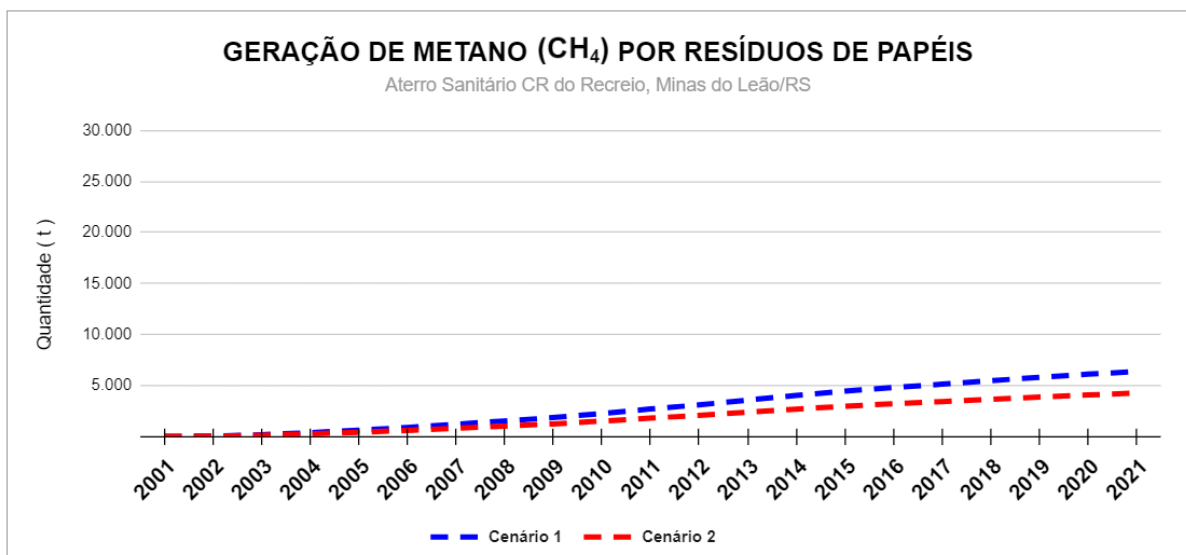
Avaliou-se que a estimativa de metano gerado por fração *j* Papéis, representa a segunda maior tipologia de resíduo que gerou o gás (Figura 14). Levando em conta as premissas do cenário 1 com a cor tracejada em azul e no cenário 2 com a cor tracejada em vermelho, o ano de 2021 gerou 6.364 t/CH₄ e 4.243 t/CH₄, respectivamente.

Entre os anos de 2001 e 2021, foram produzidas 60.217 t/CH₄ e 40.144 t/CH₄ com uma média ao ano de 2.867 t/CH₄/ano e 1.912 t/CH₄/ano, respectivamente.

Detendo a terceira maior parcela gravimétrica de resíduos sólidos, segundo Abrelpe (2021), essa tipologia por meio de papéis em geral como também o papelão, possuem elevada presença na geração de resíduos sólidos domiciliares, além da alta significância de valoração através da coleta seletiva com uso devido para a remanufatura da reciclagem como o ciclo da celulose.

Esta fração é rica em carbono, em razão de ser também o segundo tipo *j* com maior fração de *DOC_j* por peso com 0,40 entre as demais frações previstas.

Figura 14 - Estimativa de *j* Papéis em toneladas entre 2001 a 2021 disposto no aterro sanitário.



Fonte: Autor (2023).

4.2.3.5.3 Resíduos de Jardins

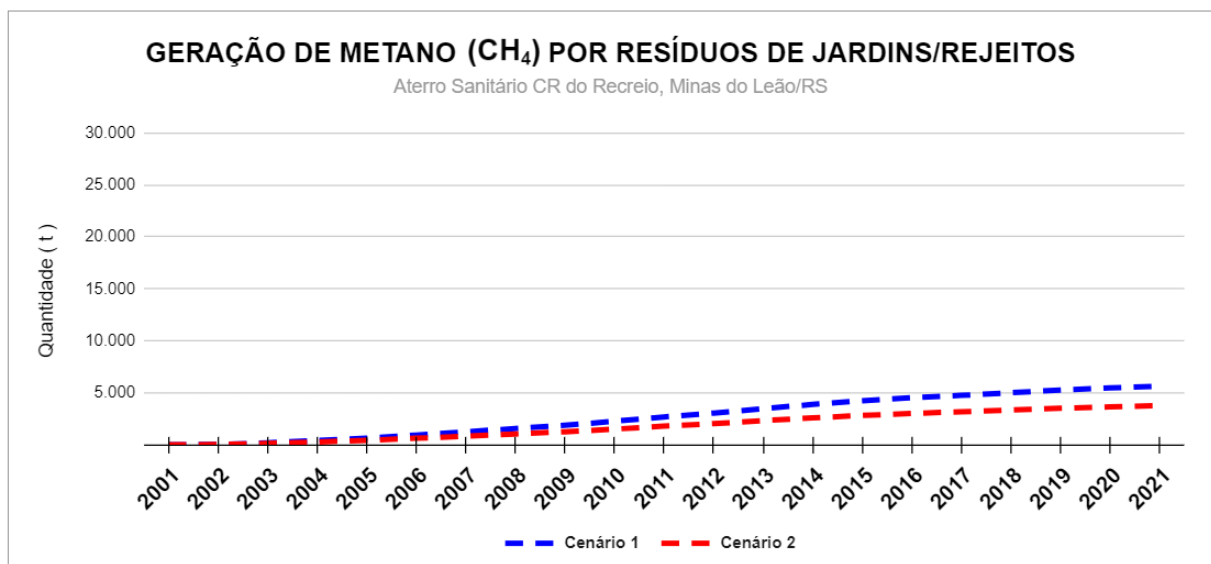
A estimativa gerada por fração *j* jardins correspondeu a terceira maior quantidade de metano.

Considerando as premissas anteriores, o cenário 1 na cor tracejado em azul, gerou 5.633 t/CH₄, e no cenário 2 em cor tracejado em vermelho foram gerados 3.755 t/CH₄. Seguente a Figura 15 entre 2001 a 2021, foram produzidas 57.023 t/CH₄ e 38.017 t/CH₄, com uma média de 2.715 t/CH₄ e 1.810 t/CH₄, respectivamente.

Apesar de conter a segunda maior fração gravimétrica e de taxa de degradação (k_j), o peso atribuído de carbono no parâmetro $DOC_j = 0,20$ é menor que o de Papéis $DOC_j = 0,40$. Entre primeiros dez anos da série, *jardins* gerou a segunda maior quantidade de metano comparado às demais frações. No entanto em 2010, a fração *j papéis* passou a gerar mais metano que jardins, em consequência da quantia de carbono que retém.

Neste estudo, foi atribuída em conjunto fração de Rejeitos. Esse material tem pouco aproveitamento e baixa definição de sua especificidade. Podas de árvores e restos de matéria seca possuem significância para processos de degradação da matéria e recomposição de camada protetora superficial do solo.

Figura 15 - Estimativa de *j* Jardins em toneladas entre 2001 a 2021 disposto no aterro sanitário.



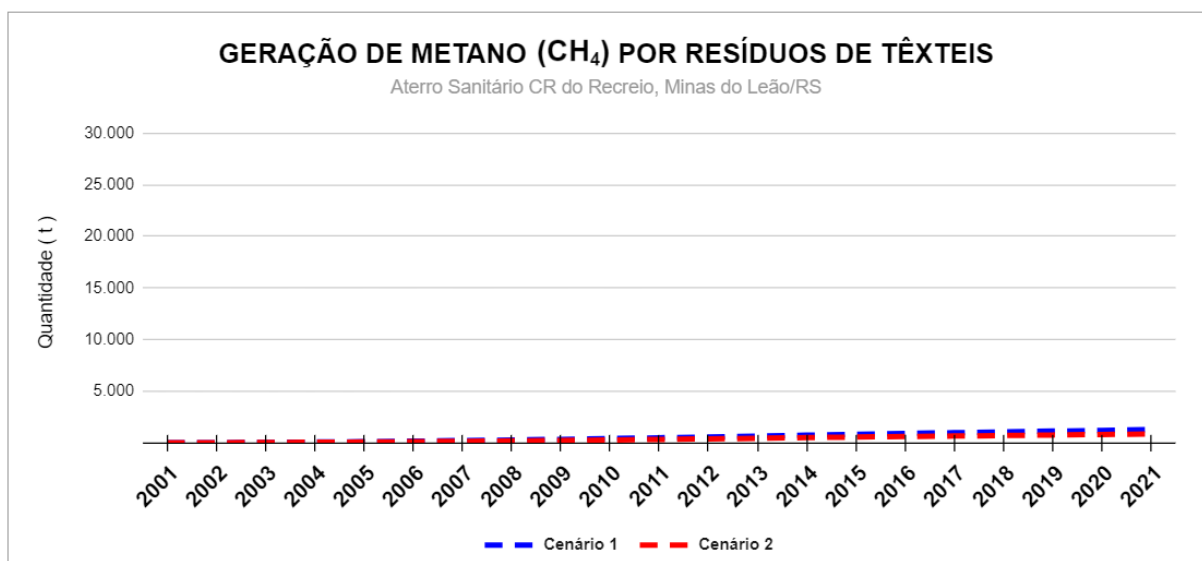
Fonte: Autor (2023).

4.2.3.5.4 Resíduos de Têxteis

Observou-se a estimativa gerada por fração *j* Têxteis a segunda menor produção de metano. Considerando o ano de 2021, o cenário 1 com a cor tracejado em azul foram gerados 1.262 t/CH₄, e no cenário 2 com a cor tracejado em vermelho o total de 841 t/CH₄. A série de 2001 a 2021 totaliza 11.267 t/CH₄ e 7.513 t/CH₄, com média de 537 t/CH₄ e 358 t/CH₄, respectivamente.

Aproximadamente metade do valor anual de 2021 foi atingido em 2012 com 557 t/CH₄. A Figura 16 ilustra a linha linear estável da quantidade gerada por cada ano. Trata-se do material que contém $DOC_j=0,24$ obtendo a terceira maior quantia, e a taxa de degradação $k_j=0,60$, mesmo valor que Papéis. No entanto a representatividade gravimétrica de RSU Têxteis é baixa, sendo a quarta fração tipo *j* e também da quantidade de metano produzido.

Figura 16 - Estimativa de *j* Têxteis em toneladas entre 2001 a 2021 disposto no aterro sanitário.



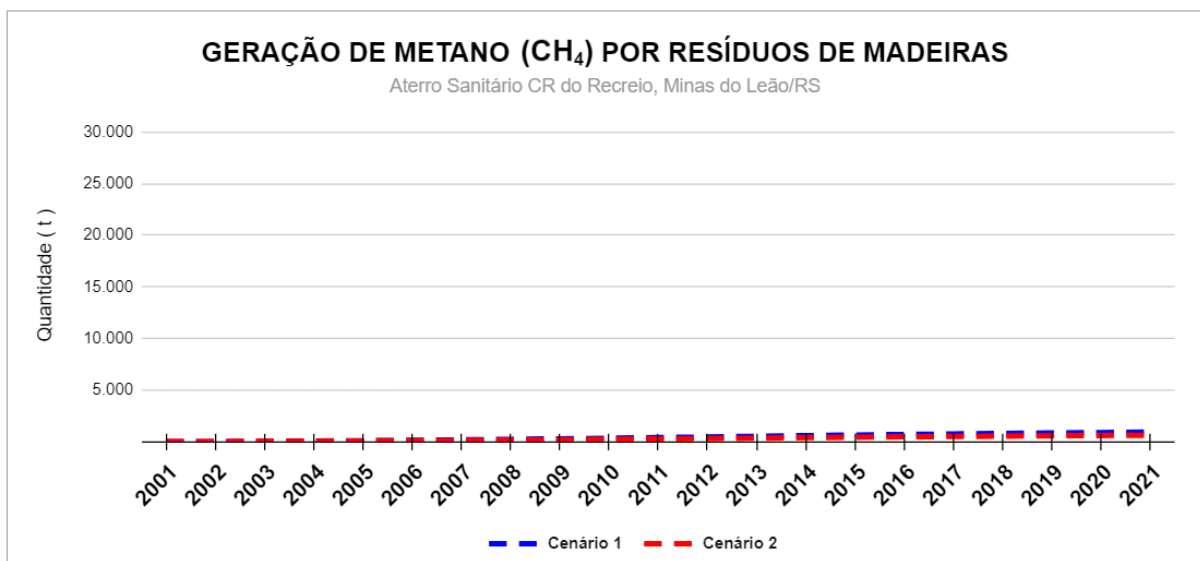
Fonte: Autor (2023).

4.2.3.5.5 Resíduos de Madeiras

A menor quantidade estimada de metano gerado por tipo de resíduo *j* é a fração Madeiras e derivados. Para o ano de 2021 o cenário 1 com a cor tracejado em azul, foram 8.15 t/CH₄, enquanto no cenário 2 com a cor tracejado em vermelho gerou 5.809 t/CH₄, respectivamente. A Figura 17 apresenta a série completa dos modelos entre os anos de 2001 e 2021, totalizando 8.715 t/CH₄ e 5.812 t/CH₄ com a média de 415 t/CH₄ e 290,45 t/CH₄.

Trata-se do material que contém a maior fração de carbono orgânico degradável sendo $DOC_j=0,43$. No entanto, a velocidade de decomposição e a taxa de decaimento são as mais baixas entre os demais. O reflexo do resultado da baixa quantidade de metano na série histórica está também na baixa presença gravimétrica sendo em menos de 2% dos demais resíduos sólidos.

Figura 17 - Estimativa de *j* Madeiras e derivados em toneladas entre 2001 a 2021 disposto no aterro sanitário.



Fonte: Autor (2023).

4.2.3.6 Estimativa de Biogás a partir do Metano

Os resultados da estimativa de t/CH₄ vistos anteriormente foram convertidos da unidade de toneladas (t) para unidade volumétrica de Normal Metro Cúbico (Nm³), delineado em dois cenários com uso do parâmetro *Fator de Correção do Modelo* (ϕ_y) aplicado na equação.

O primeiro cenário $\varphi_y = 0,75$ entre 2001 e 2021 apresentou 408.429.944 Nm³/CH₄ com a média de 19.449.044 Nm³/CH₄ por ano. A coluna do Cenário 2, $\varphi_y = 0,50$ totalizou 272.288.738 Nm³/CH₄ com a média de 12.966.130 Nm³/CH₄ por ano.

Observou-se que para o ano de 2021 o cenário 1 teve 38.720.915,70 Nm³/CH₄ enquanto o cenário 2, gerou 25.814.365,50 Nm³/CH₄, resultando na diferença de 12.906.550,2 Nm³/CH₄ a menos para o último modelo citado.

Visando o potencial uso de CH₄/Nm³ para biogás produzido pelo Aterro Sanitário Central de Resíduos do Recreio, o comparativo com a quantidade de CH₄ e biogás disponibilizada pela empresa Biotérmica observado na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores das estimativas de metano em t e Nm³ no aterro sanitário.

Ano	Cenário 1 Metano (t)	Cenário 2 Metano (t)	Cenário 1 Metano (Nm³)	Cenário 2 Metano(Nm³)	*Biotérmica Biogás (Nm³)
2001	2	2	2.530	2.530	-
2002	128	85	161.932	107.533	-
2003	1.173	782	1.483.962	989.308	-
2004	2.517	1.678	3.184.256	2.122.837	-
2005	3.973	2.649	5.026.242	3.351.249	-
2006	5.727	3.818	7.245.227	4.830.151	-
2007	7.553	5.035	9.555.300	6.369.778	-
2008	9.328	6.219	11.800.852	7.867.656	-
2009	11.047	7.364	13.975.559	9.316.196	-
2010	13.263	8.842	16.779.021	11.186.014	-
2011	15.644	10.430	19.791.224	13.194.993	-
2012	17.604	11.736	22.270.820	14.847.213	-
2013	19.972	13.315	25.266.577	16.844.806	-
2014	22.136	14.757	28.004.253	18.669.080	-
2015	23.955	15.970	30.305.470	20.203.647	-
2016	25.380	16.920	32.108.238	21.405.492	44.956.487
2017	26.417	17.611	33.420.146	22.279.676	46.457.935
2018	27.637	18.425	34.963.568	23.309.467	55.665.095
2019	28.923	19.282	36.590.487	24.393.658	47.375.172

2020	29.858	19.906	37.773.355	25.183.080	45.659.879
2021	30.607	20.405	38.720.915	25.814.365	-
2022	26.835	17.890	33.948.958	22.632.639	-
2023	23.608	15.739	29.866.480	19.911.408	-
2024	20.842	13.894	26.367.214	17.577.299	-
2025	18.463	12.309	23.357.541	15.572.115	-
2026	16.413	10.942	20.764.086	13.842.724	-
2027	14.642	9.761	18.523.594	12.348.641	-
2028	13.106	8.737	16.580.400	11.053.178	-
2029	11.771	7.847	14.891.492	9.927.239	-
2030	10.607	7.071	13.418.915	8.945.522	-

*Valor disponibilizado pela Empresa Biotérmica.
Fonte: Autor (2023).

A parcela do teor de metano no biogás corresponde em média 45-55%, considerando a origem de sua produção ser da atividade de aterro sanitário.

Segundo Seadi et al. (2008), a porcentagem de 50% CH₄ possui uma densidade [kg/m³] de 1,22. Zank (2020) destaca que a relatividade do biogás pode variar sua densidade conforme a concentração presente de metano, podendo conter 60% CH₄ e 40% CO₂, com uma densidade de 1,2143. Haja visto variações de concentração, pode ocorrer a presença inversa dos gases acima apresentados.

Segundo Kelleher et al. (2002), o processo de digestão anaeróbia envolve a degradação e estabilização da matéria orgânica levando à formação de metano. A partir dos resíduos sólidos domésticos dispostos em aterro sanitário, recebem o processo de decaimento da matéria orgânica por meio da digestão anaeróbica.

O processo e tratamento por Digestão Anaeróbia, contém distintas fases, como: fase sólida de hidrólise com bactérias hidrolíticas e fermentativas que promovem a quebra das moléculas; fase líquida de acidogênese, com bactérias fermentativas; fase líquida acetogênese com bactérias homoacetogênicas e a fase gasosa da metanogênese com as bactérias arqueas metanogênicas divididas em dois grupos, as hidrogenotróficas, responsáveis pela produção de H₂ + CO₂, e

acetoclásticas, responsáveis por Acetato. Ambas irão promover a liberação de CH₄ e CO₂.

Os valores do metano recomendado ficaram próximos dos dados de biogás (Nm³) disponibilizados pela Biotérmica. O percentual de CH₄ oscilou entre a faixa de 65-81% diante dos anos. Já os valores do cenário 2 (Conservador) relacionado à presença do metano, esteve na faixa 45-54% oscilando menos do que cenário 1 e quando relacionado à quantidade de biogás disponibilizada pela Biotérmica, transmitiu maior aceitabilidade na comparação.

4.2.4 Considerações finais

Os resultados da estimativa de metano através da ferramenta do MDL 04, na metodologia ACM0001, possibilitaram ao cenário 1 (recomendado), atribuído pelo valor padrão disposto no parâmetro, um conjunto de valores superestimados demonstrando inconsistência com as capturas certificadas realizadas pelo local estudado.

O cenário 2 (conservador), criado para este estudo ficou mais próximo dos valores de captura que o cenário 1. Essa diferença ocorreu devido o ajuste no parâmetro na fração de correção de modelo de 0,75 para 0,50, promovendo um valor superestimado mais baixo que o do recomendado pela ferramenta. Essas observações também resultaram para frações de cada tipo de resíduos.

As conversões de metano (t) para metano (Nm³), também apresentaram o cenário 2 com maior proximidade e consistência. A estimativa de metano (Nm³) apresentou 45-54% de sua presença no Biogás comparado aos valores desenvolvidos pela empresa Biotérmica, que apresenta uma média de 52% de teor de CH₄.

Ainda, recomenda-se o aperfeiçoamento da equação de decaimento de primeira ordem para futuros trabalhos, ao clima subtropical e mais condizente para a realidade do hemisfério sul, refletindo nos resultados dos parâmetros da velocidade de degradação.

REFERÊNCIAS

ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Atlas Brasileiro de Emissões de Gases de Efeito Estufa e Potencial**

Energético na Destinação de Resíduos Sólidos. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/atlas-brasileiro/>. Acesso em: 4 de fevereiro de 2023.

ANDRADE, A. B. B. **Análise da viabilidade econômica para geração de energia elétrica através do uso de biogás gerado em aterro sanitário no estado da Paraíba.** 2022. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2022.

CARVALHO, R. Q.; TAVARES, A. N.; SANTOS, G. V.; BAJAY, S. V. **Oportunidades enterradas:** geração elétrica a partir do biogás de resíduos sólidos urbanos. Vitória - ES: EDUFES, 2019.

CDM-RCP-FORM. **Project design document form for CDM project activities (Version 05.0).** 2014. Disponível em: <https://bit.ly/3IKLasr>. Acesso em: 4 de fevereiro de 2023.

CDM-RCP-FORM. **Validation report form for post-registration changes for CDM project activities (Version 01.0).** 2017. Disponível em: <https://bit.ly/3EPa1um>. Acesso em: 4 de fevereiro de 2023.

CDM-RCP-FORM. **Validation report form for renewal of crediting period for CDM project activities (Version 01.0).** 2015. Disponível em: <https://bit.ly/41CtA2F>. Acesso em: 4 de fevereiro de 2023.

COSSU, R.; MUNTONI, A.; CHIARANTINI, L.; MASSACCI, G.; SERRA, P.; SCOLLETTA, A.; STERZI, G. Biogas emissions measurement using static and dynamic flux chambers and infrared method. In: **SARDINIA... CISA**, p. 103-114, 1997.

FGV. Fundação Getúlio Vargas. **Nota técnica:** valores de referência para o potencial de aquecimento global (GWP) dos gases de efeito estufa: versão 2.0. 2022.

FULLER, M. **O que é e como funciona a precificação de carbono no Brasil.** Capital aberto, 2020. Disponível em: <https://capitalaberto.com.br/sustentabilidade/o-que-e-e-como-funciona-a-precificacao-de-carbono-no-brasil/>. Acesso em: 04 de fevereiro de 2023.

INMET, 2022. **Instituto Nacional de Meteorologia.** Brasília-DF, 2022. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/normais>. Acesso em: 4 de fevereiro de 2023.

IPEA. **Legado do MDL:** impactos e lições aprendidas a partir da implementação do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo no Brasil. Org.: FRANGETTO, F. W.; VEIGA, A. P. B.; LUEDEMANN, G. Brasília: IPEA, 2018.

MONTAGNER, P. R. S. **Avaliação do potencial de uso do biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica.** 2021. 79 p. (Trabalho de Conclusão de Curso), Universidade de São Paulo. Lorena/SP, 2021.

NASCIMENTO, M. C. B.; FREIRE, E. P.; DANTAS, F. D. A. S.; GIANSANTE, M. B. Estado da arte dos aterros de resíduos sólidos urbanos que aproveitam o biogás para geração de energia elétrica e biometano no Brasil. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 24, n. 1, p. 143–155, 2019.

PIÑAS, J. A. V.; VENTURINI, O. J.; LORA, E. E. S.; OLIVEIRA, M. A. D.; ROALCABA, O. D. C. 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**, v. 33, p. 175-188, 2016.

SANTOS, M. M. O. **Geração de biogás em aterros sanitários**: uma análise sobre os modelos de previsão aplicados a projetos do mecanismo de desenvolvimento limpo / Mauro Meirelles de Oliveira Santos. – 2014. 114 f. Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2014.

SEEG. **Desafios e Oportunidades para Redução das Emissões de Metano no Brasil, 2022**. Sistemas de Estimativa e Emissão de Gases. https://seeg-br.s3.amazonaws.com/Documentos%20Analiticos/Estudo_Metano/ObsClima_SEEG_2022_FINAL.pdf Acesso em: 03 de fevereiro de 2023.

VIANA, Thiago Augusto Pimenta. **Análise das estimativas de emissão de metano por aterros sanitários em projetos de MDL no Brasil** / Thiago Augusto Pimenta Viana. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia, 2011, 98 p.

VIEIRA, L. C.; CANDIANI, G. Potencial energético de resíduos sólidos urbanos na Região do Grande ABC Paulista. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.12, n.2, p.328-342, 2021. Acesso em: 03 de fevereiro de 2023.

ZANK, J. C. C.; BRANDT, L. S.; BEZERRA, R. C.; PEREIRA, E. N. 2020. As características do biogás e avaliação de substituição de combustíveis. **Exacta**, 18(3), p. 502-516, 2020.

ARTIGO 3

4.3 ARTIGO 3 - DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA COMPUTACIONAL PARA PROJEÇÃO DE METANO EM ATERRO SANITÁRIO

Publicado em: [Revista Ciência e Natura](#). Acesso em: [DOI:ISSN 2179-460XQualis A2](#)

Resumo:

A ação antrópica tem contribuído com o aumento dos Gases do Efeito Estufa (GEE), gerando efeitos climáticos adversos, entre eles a intensificação e ocorrência das mudanças climáticas. Um dos contribuintes para a geração destes gases são a disposição final de resíduos sólidos. Estimar a quantidade de CH₄ e demais unidades de GEE a partir da geração de gases gerados nos aterros sanitários pode ser uma ferramenta importante para auxiliar ações sob aspectos conceituais, regulatórios e econômicos. Para isto buscou-se estimar a produção dos mesmos a partir da disposição final de resíduos sólidos em aterro sanitário em Minas do Leão – RS. No entanto, devido à complexidade da fórmula que permite estimar os valores de GEEs, desenvolveu-se um *software* baseado na aplicabilidade da metodologia da ACM0001-Queima ou uso de gás de aterro - Versão 19.0. O sistema desenvolvido, EstimaGas, contém dados de 2001 a 2021 de toneladas/ano de resíduos sólidos depositados no aterro sanitário e gera tabelas e gráficos que apresentam a distribuição da quantidade total, por ano de resíduos depositados no aterro, a quantidade total, por tipo de resíduo e realiza o cálculo da quantidade de metano e dióxido de carbono geradas anualmente. Os resultados com o desenvolvimento do software para projetar CH₄ e demais unidades de GEE a partir de gases gerados nos aterros sanitários de Resíduos Sólidos, são promissores. O sistema operacional com as informações geradas, pode contribuir para ações referentes à gestão ambiental no âmbito do poder público e de organizações.

Palavras-chave: Gases do Efeito Estufa; Educação Ambiental; Aterros sanitários; Sistema computacional; Aplicativo.

Abstract: Anthropogenic action has contributed to the increase of Greenhouse Gases (GHG), generating adverse climatic effects, including global warming. One of the contributors to the generation of these gases is the solid waste disposal. Estimating the amount of CH₄ and other GHG units from the generation of gases generated in landfills can be an important tool to assist actions under conceptual, regulatory and economic aspects. For this, it was sought to estimate the production of the same from the final disposal of solid waste in landfills in Minas do Leão – RS. However, due to the complexity of the formula that allows estimating GHG values, a software based on the applicability of the ACM0001 methodology - Landfill gas burning or use - Version 19.0 was developed. The developed system contains data from 2001 to 2021 of tons/year of solid waste deposited in the landfill and generates tables and graphs that present the distribution of the total amount, per year of waste deposited in the landfill, the total amount, per type of waste and performs the calculation of the amount of methane and carbon dioxide generated annually. The results with the development of the software for Calculation of the Estimated Generation of CH₄ and other units of GHG from gases generated in Solid Waste landfills are promising. The system is operational and, with the information generated, it can contribute to actions regarding environmental management.

Keywords: Greenhouse Gases; Environmental Education; Landfills. Computational system for calculation of methane generated; Application.

4.3.1 Introdução

O Brasil ocupa o 6º lugar entre os maiores emissores de Gases do Efeito Estufa (GEE), com 3,2% do total mundial. Excluindo o bloco de 28 países da União Europeia, o Brasil torna-se o quinto emissor. O que é mais grave, as emissões per capita do Brasil também são maiores que a média mundial. Em 2019, a média de emissão de CO₂ por brasileiro foi de 10,4 toneladas brutas, contra 7,1% da média mundial (SEEG, 2020).

Nesse contexto, a discussão crescente a respeito das mudanças ambientais globais, suas origens e implicações têm sido um marco para o início do século XXI, e provavelmente, estão entre os maiores desafios da humanidade (LARA, 2017). O desequilíbrio ambiental e climático atrelado a presença intensificada dos GEE, principalmente dos gases Metano (CH₄), Dióxido de Carbono (CO₂), Óxido Nitroso (N₂O), gases fluorados, entre outros, reduzem as condições do funcionamento pleno do efeito estufa natural. O gás metano é produzido por uma série de fontes antropogênicas (de origem humana), tais como uso, agricultura, emissões fugitivas de sistemas de petróleo e gás natural, combustão estacionária e móvel tratamento de águas residuais e aterros sanitários (RICHTER et al., 2021).

O ano de 2020 foi avaliado pelos cientistas do National Oceanic Atmospheric Administration (NOAA) como o segundo ano mais quente da série histórica contabilizado a partir de 1880 (NOAA, 2021). Embora haja variações nos resultados entre as agências de pesquisas do clima, todos apresentam similaridade entre picos e vales e indicando aquecimento acelerado nas últimas décadas (NASA, 2021).

Um dos 17 objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) contendo 169 metas para acabar com a pobreza, combater a desigualdade e a injustiça, e enfrentar as mudanças climáticas até 2030, envolvem governos, sociedade civil, empresas privadas e públicas e academia científica (KRONEMBERGER, 2019; ONU, 2015; HICKEL, 2019).

Nesse sentido, a redução de emissões de poluentes atmosféricos e de GEE, torna as atividades econômicas mais resilientes com o meio físico. O tratamento dos resíduos sólidos mais eficiente, sustentável com tecnologias aplicadas, reduziram as emissões de GEE. Estima-se que sejam gerados, no mundo, a cada ano, cerca de 1,5 bilhão de toneladas (Gt) de RSU, e que esse volume poderá aumentar para aproximadamente 2,2 Gt até o ano de 2025 (OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2018).

A disposição final de resíduos sólidos tem como principal referência os aterros sanitários, que instalados recentemente apresentam sistemas de captação de biogás interligados a centrais termoelétricas, que produzem energia elétrica por meio da queima do gás CH₄ em motores (CANDIANI e MOREIRA, 2015; TEIXEIRA JÚNIOR, 2016).

Dessa forma, o estudo propõe o desenvolvimento de um sistema computacional capaz de projetar as emissões de metano produzidas em aterro sanitário, baseado na metodologia ACM0001: Queima e/ou uso de Gás de Aterro V.19, ferramenta 04 - Emissões de Locais de Disposição de Resíduos Sólidos, do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), utilizando para aquisição, e processamento dos dados a linguagem de programação JavaScript. A ferramenta permite resultados de valores de metano por uma equação matemática com parâmetros estabelecidos e pré-estabelecidos, conforme a seleção do local estudado.

Ainda há incertezas no estabelecimento de valores para as constantes de decaimento e potencial de geração para cada tipo de resíduo, mas as discrepâncias entre a previsão de geração e a captação efetiva de biogás em aterros sanitários podem, em parte, ser também explicadas pelo uso de modelos de previsão de primeira ordem inadequados. As atividades de projeto envolvendo emissão de biogás que buscam registro no âmbito do MDL devem usar a norma *Methodological Tool: Emissions from Solid Waste Disposal Sites — SWDS* (UNFCCC, 2011), ou simplesmente a *CDM Tool*, para a avaliação da quantidade de metano, expressa em equivalentes de dióxido de carbono (CO_{2e}) (Santos, M.M.; Romanel, C.; van Elk, A.G.H.P, 2017).

Os dados processados pelo sistema do software EstimaGas são enviados para um servidor. O sistema possibilita estudos projetivos sobre a geração de metano com base a quantidade de resíduos sólidos urbanos encaminhados para a disposição final em aterros sanitários no Estado do Rio Grande do Sul – RS. O local de pesquisa considerou os dados de RSU do aterro sanitário da Central de Resíduos do Recreio, localizado no município de Minas do Leão – RS, operado pela empresa Companhia Riograndense de Valorização de Resíduos (CRVR), recebendo cerca de 40% de todo o rejeito gerado no RS, proveniente de mais de 100 municípios gaúchos.

4.3.2 Metodologia

4.3.2.1 Metodologia ACM0001 - Queima e/ou uso de gás de aterro

Conforme a Tabela 2, onde apresenta o conjunto de ferramentas inseridas na metodologia ACM0001, versão 19.0, Ordem b – Emissões de Locais de Disposição de Resíduos Sólidos do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), foi a ferramenta empregada para a metodologia equacional do software.

Segundo a ACM001 (2019), a principal fonte de emissões desse tipo de atividade é o CH₄. As emissões de N₂O são pequenas comparadas às emissões de CH₄ em um SWDS. As emissões de CO₂ relacionadas a decomposição de resíduos orgânicos não são contabilizadas, uma vez que também é liberado sob a atividade de projeto. No entanto, é representado a unidade de CO_{2eq}, para a produção dos GEE gerados. A referida metodologia ACM001 (2019) pode tanto ser utilizada por metodologias de aterro quanto para metodologias que envolvam queima de resíduos de biomassa para produção de energia, por exemplo, já que o resíduo de biomassa emitiria CH₄ caso não existisse o projeto e o resíduo fosse disposto em aterro (VIANA, 2011).

A finalidade da ferramenta de Emissões de SWDS's, podem os seguintes tipos de aplicações: 1) ACM0001: "Queima ou uso de gás de aterro", onde a delimitação do projeto pode receber monitoramento para modelo anual, ou para modelo mensal; e 2) ACM0022: "Processos alternativos de tratamento de resíduos" (UNFCCC, 2019).

Para o presente estudo, foi escolhido ACM0001 visto a delimitação do objeto de estudo. Mais especificamente, o emprego da ferramenta permite optar por a finalidade de 1): Procedimento simplificado para determinar as emissões de CH₄ do SWDS; e/ou 2) Procedimento completo para determinar as emissões de CH₄ no SWDS. Dessa forma, foi utilizado o objeto relacionado à segunda opção.

4.3.2.2 CDM Tool 04 - Emissões de Locais de Disposição Final

Uma das normas referenciais da Metodologia ACM0001, é a Ferramenta *Methodological Tool – Emissions from solid waste disposal sites – Version 08.0* (UNFCCC, 2019), de forma abreviada CDM Tool 04, utilizada para estudar CH₄ produzido em aterro sanitário.

A equação referenciada a "Emissões de Locais de Disposição Final", consiste na aplicação base da ferramenta computacional EstimaGas. O modelo de

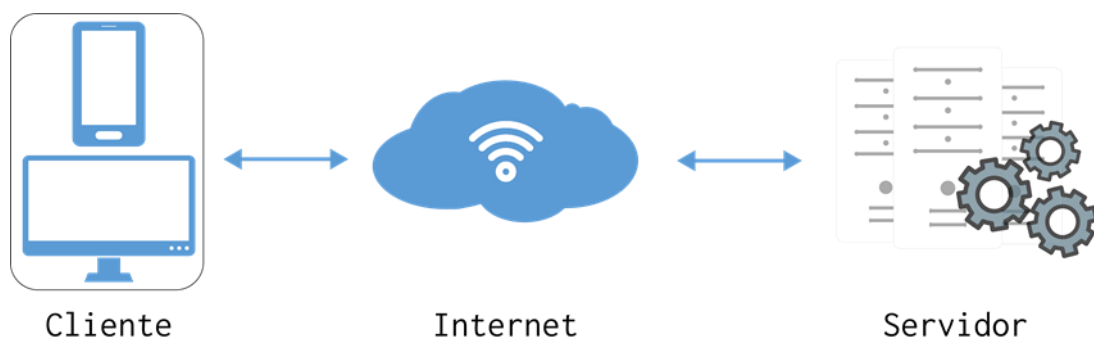
Decomposição de Primeira Ordem possui basicamente duas partes principais: a primeira, pré exponencial, descreve a quantidade de CH₄ produzida durante toda a vida útil do aterro; a segunda, exponencial, descreve como este CH₄ é gerado no decorrer do tempo (VIANA, 2012). Introduzindo interpretações, onde a primeira contém valores pré-estabelecidos que precisam ser definidos de acordo com a situação, os parâmetros restantes não são padronizados por conter aplicação de valores no escopo de projetos específicos.

A ferramenta CDM Tool 04 calcula emissões em toneladas de CO_{2eq} (com o termo GWP CH₄), leva em conta a parte de CH₄ que é oxidada enquanto passa através da camada superficial do aterro (com a fração OX), e a fração que seria queimada na ausência da atividade de projeto (com a fração f_y). O fator MCF_y é baseado na qualidade do local de disposição no ano y, com um valor padrão de MCF = 1 para aterros sanitários (SANTOS, 2014).

4.3.2.3 Software *EstimaGas*

O sistema foi desenvolvido de acordo com o modelo cliente/servidor, como mostra a Figura 18.

Figura 18 – Esquema modelo cliente/servidor.



Fonte: Autor (2023).

O servidor contém o conjunto de procedimentos que implementam as funcionalidades do sistema. Esse conjunto de procedimentos são acessados pelos clientes a partir de uma a partir do aplicativo ou site, por meio da API, acrônimo inglês

de *Application Programming Interface*, que em português quer dizer Interface de Programação de Aplicações, como ilustrado na figura acima.

O servidor gerencia um Banco de dados, permitindo armazenar, deletar, modificar e fazer buscas de informações referentes as quantidades de resíduos sólidos depositados no aterro sanitário, a partir do ano de 2001 até o ano de 2021.

A referida Interface de Programação de Aplicações (API) é responsável por:

- A. Gerenciamento de usuários: Armazenamento do nome e senha do usuário, também é possível deletar, editar tanto o nome, quanto a senha do usuário, e deleta-los, a senha é criptografada.

- B. Gerenciamento dos dados: Os dados do aterro são armazenados no servidor, eles são submetidos pelo aplicativo, ou site, e podem ser gerenciados pelos mesmos.

- C. Calcular os resultados: A partir dos dados do aterro, é calculado o metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂).

- D. Gerenciamento de sessão: Esse processo inclui o login e a autenticação. Assim que é feito o login é gerado e armazenado um token que inclui o ID do usuário e o horário que expira, a todo momento que uma solicitação é feita à API o token é autenticado e renovado, aumentando a vida do token, se não for feita uma solicitação em 30 minutos o token expira.

A ferramenta CDM Tool 04 é usada para cálculos anuais e considera as frações constituintes na fórmula a seguir:

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

Fonte: UNFCCC, 2019.

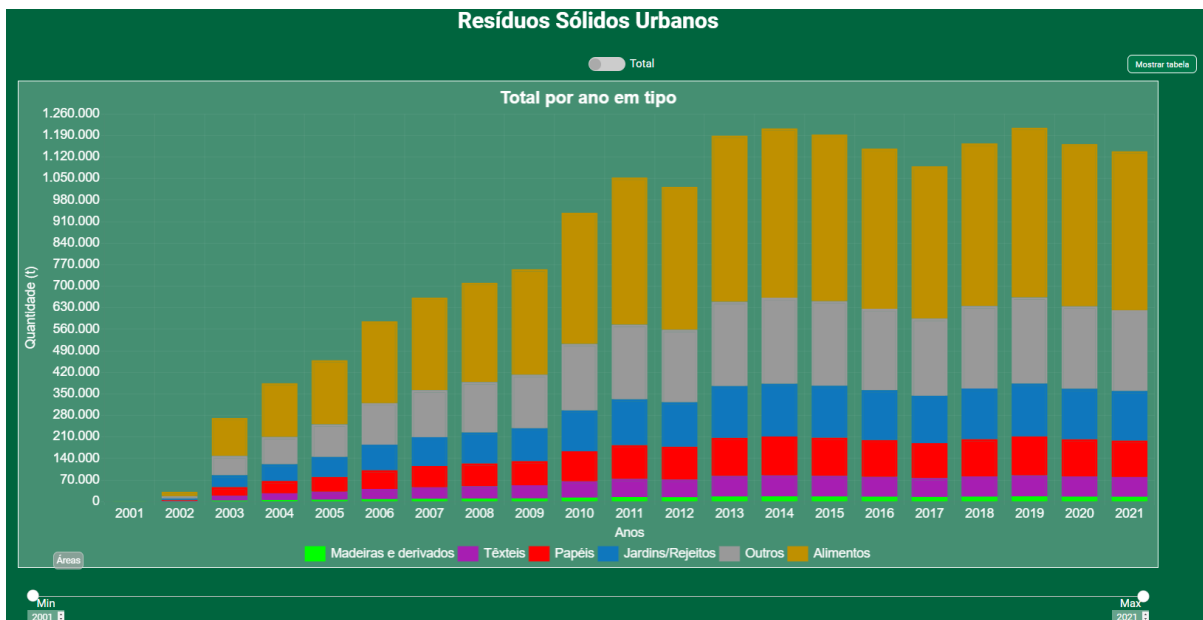
4.3.3 Resultados

O desenvolvimento do software está a partir da equação da metodologia ACM0001: Queima e/ou uso de gás de aterro v.19. O software é formado por um site web, que roda sistemas computacionais e smartphones.

O software permite realizar operações com os dados coletados no período de 2001 a 2021 e que podem ser visualizados sob forma de gráficos e tabelas. O entendimento em relação as quantidades de GEE produzidos pelo RSU originário por exemplo, de um determinado município, são produzidos considerando a disposição final em um aterro sanitário.

Nesse sentido, o software é composto por seis páginas: 1) Apresentação; 2) Resíduos Sólidos; 3) Geração de Gases; 4) Biogás; e 5) Relatório. Ainda, existe a página, identificado como “Login”, que tem como função uso pelo administrador e alteração permanente dos dados, ficando limitado o acesso ao responsável pelo gerenciamento. Já a página, intitulado de *Apresentação*, tem como objetivo explicar a função do software. O detalhamento das páginas citadas do software *EstimaGas*, pode ser observado no **“Manual Técnico para o uso do Software EstimaGas”**, um dos produtos técnicos da dissertação.

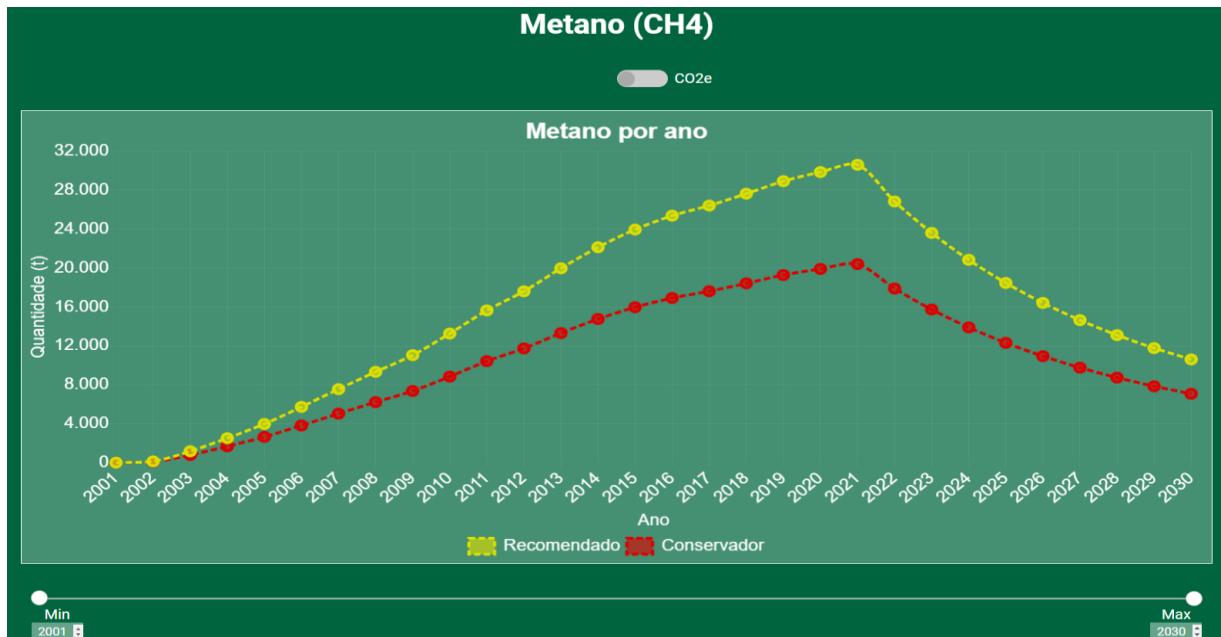
Figura 19 – Gráfico dos resíduos sólidos urbanos por tipologia e escala temporal



Fonte: Autor (2023).

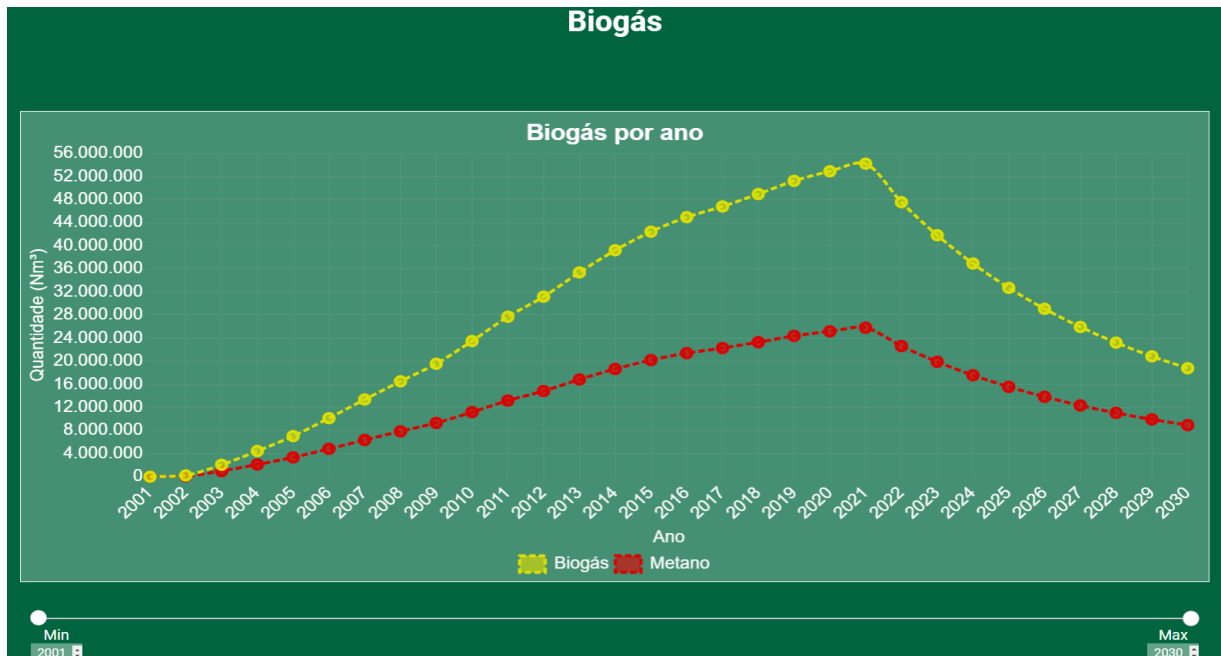
Na página *Resíduos sólidos* representada na Figura 19, são gerenciados os dados e os mesmos mostrados em forma de gráfico. As outras páginas mostram os dados de mesma origem em outras finalidades e formas de gráfico.

Figura 20 – Gráfico de metano (t) com os cenários recomendado e conservador



Fonte: Autor (2023).

Figura 21 – Gráfico de Biogás (Nm³) com os cenários biogás e metano



Fonte: Autor (2023).

As Figuras 20 e 21, representam a página *Geração de gases*, possibilitando acessar o gráfico com os valores de gases nas unidades de metano e carbono equivalente, diante dos cenários na medida de toneladas (t). Ainda, traz a página

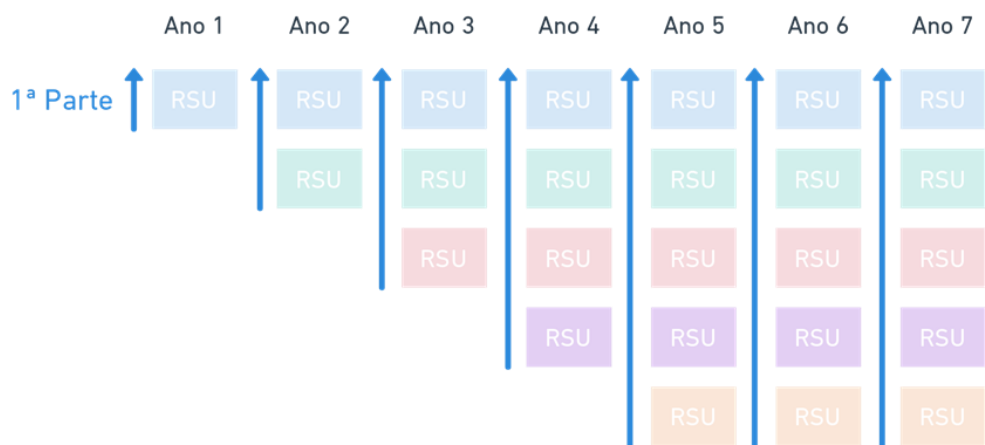
Biogás que permite a opção do dado separado de CH₄ presente no biogás e/ou além da quantidade de CH₄, a quantidade total de biogás na soma de outros gases que compõem a mistura de gás de aterro na medida de normal metro cúbico (Nm³).

Para a projeção de CH₄ produzido no aterro sanitário foi desenvolvido um algoritmo a partir da fórmula apresentada anteriormente, que foi dividida em duas partes.

Na primeira parte ϕ e GWP_{CH_4} , que são respectivamente o Fator de Correção do Modelo e o Potencial de Aquecimento Global, são as variáveis alternadas, sendo que ambos assumem dois valores, ou seja, existem 4 resultados a partir das alterações. A variável GWP_{CH_4} pode assumir 1 e 25, sendo o primeiro para CH₄ e o segundo para CO_{2eq}. A variável ϕ assume 0,5 ou 0,75, sendo um fator de correção, com o primeiro se obtém um resultado mais realista nominado Conservador e com o segundo um resultado otimista Recomendado. A primeira parte resulta em um vetor.

A segunda parte consiste de um laço de repetição, onde a cada ano uma nova linha é adicionada, até o último ano com dados de RSU. Então a primeira parte multiplica cada componente de cada linha pelos seus próprios componentes, como demonstrado na Figura 22, onde considera, para fins de exemplo, dados apenas até o ano 7:

Figura 22: Somatório por ano e por resíduo depositado.



Fonte: Autor (2023).

Após o processo anterior que resulta na quantidade de metano (CH₄), ou dióxido de carbono equivalente (CO_{2e}), é gerado por cada quantidade de RSU depositada naquele ano, somadas as quantidades de emissões geradas, assim obtém-se o total em cada ano:

Figura 23 - Somatório por ano e unidade de gás estufa

Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7
tCH4/ tCO2e	tCH4/ tCO2e	tCH4/ tCO2e	tCH4/ tCO2e	tCH4/ tCO2e	tCH4/ tCO2e	tCH4/ tCO2e

Fonte: Autor (2023).

O site é o responsável por apresentar os dados e possibilitar que o usuário teste com seus próprios dados. O site EstimaGas conta com 5 subpáginas:

- a) Apresentação: página inicial onde é explicado brevemente o projeto;
- b) Resíduos sólidos: mostra o resíduo sólido urbano (RSU) enviado para o aterro entre 2001 e 2021, e possibilita que o usuário edite os valores (mudança que não afetam o servidor, apenas os dados no computador do usuário), visualize a gravimetria ao posicionar o ponteiro do mouse acima dos anos da tabela, e, ao clicar no botão, é possível visualizar os dados da tabela em um gráfico cartesiano. Também é possível visualizar os gráficos em barras, visualizar o total por tipo e até escolher o período em anos que será apresentado no gráfico;
- c) Geração de gases - Metano (CH₄) / Dióxido de Carbono Equivalente (CO_{2e}): Mostra gráfico em massa de toneladas com o metano calculado e carbono equivalente, levando em conta dois cenários de correção do modelo, o recomendado e o conservador. Tem as mesmas opções que o gráfico cartesiano na página *Resíduos sólidos*, com exceção de visualizar por tipo;
- d) Biogás: Mostra gráfico em volume de normal metro cúbico para biogás em dois cenários, sendo biogás e metano. O primeiro (biogás) considera a presença de toda composição de gases (metano/gás carbônico/gás sulfídrico/nitrogênio/hidrogênio/oxigênio) contidos no gás de aterro. O segundo cenário, metano mostra o gráfico levando em conta apenas a presença do metano contido no biogás.

e) Relatório: Mostra a opção de gerar relatório ao exportar os dados de gases mostrados nos gráficos, possibilitando inserir de forma opcional o nome do usuário/localidade, selecionando a extensão do arquivo preferível em três formatos: Texto (.txt); Planilha (.xlsx); e Valores separados por vírgula (.csv).

É importante ressaltar que também foi desenvolvido para sistema android um aplicativo, que executa em smartphones e que possui as mesmas funcionalidades do site.

4.3.4 Conclusões

O principal objetivo deste artigo foi apresentar as etapas metodológicas contidas no desenvolvimento do sistema computacional enquanto software e aplicativo, EstimaGas, baseado na aplicabilidade da metodologia da ACM0001-Queima ou uso de Gás de Aterro - Versão 19.0.

Nesse sentido, o sistema computacional permitiu acessar o conhecimento de dados no âmbito da queima e geração de gás de aterro produzido em aterro sanitário, tornando de forma facilitadora e compreensível as dimensões que envolvem a aquisição de informações pouco acessíveis nessa atividade.

Os resultados obtidos do sistema foram satisfatórios ao tornar para qualquer usuário, o conhecimento das emissões de GEE geradas em aterro sanitário pela disposição final de resíduos sólidos, focalizado no gás metano.

Ainda, permite que a informação possibilite encontrar estratégias de gestão ao otimizar os custos podendo dar profundidade em ações regionais que estimulem investimentos e a mitigação do CH₄.

O EstimaGas em sua versão 1.0 alcançou resultados importantes sendo pioneiro em uma parceria entre poder público estadual, universidade pública e organização privada para evolução das discussões da temática do clima no Estado do RS. Poderá obter aperfeiçoamento ao longo de seu uso com a aplicabilidade para demais aterros sanitários, dados padrões e ajustes de parâmetros na medida que referências sejam confiáveis ou validadas.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de expressar sua sincera gratidão à FAPERGS pela bolsa vinculada ao Programa de Bolsa de Iniciação à Pesquisa (PROBIP), à Companhia Riograndense de Valorização de Resíduos (CRVR), à Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler (FEPAM) e a Secretaria de Meio Ambiente e Infraestrutura do Estado do Rio Grande do Sul por sua colaboração com o presente projeto.

REFERÊNCIAS

CRVR – Central de Resíduos do Recreio (2020). Disponível em: <http://crvr.com.br/area-de-atuacao/central-de-residuos-dorecreio/#:~:text=Projetada%20para%20uma%20capacidade%20total,s%C3%A3o%20reservados%20para%20receber%20res%C3%ADduos>. Acesso em: 26 jan. 2023.

CANDIANI, G.; VIANA, E. Emissões fugitivas de metano em aterros sanitários. **GEOUSP Espaço e Tempo (Online)**, [S. l.], v. 21, n. 3, p. 845-857, 2017. DOI:10.11606/issn.2179-0892.geousp.2017.97398. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/geousp/article/view/97398> . Acesso em: 5 jul. 2023.

FOLKE, Carl; POLASKY, Stephen; ROCKSTRÖM, Johan; *et al.* Our future in the Anthropocene biosphere. **Ambio** 50, 834–869, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13280-021-01544-8>

HEIMANN, Larry; VELIZ, Oscar. Mobile Application Development in Flutter. In: **Proceedings of the 53rd ACM Technical Symposium on Computer Science Education V. 2**. 2022. p. 1199-1199. DOI: <https://doi.org/10.1145/3478432.3499158>

HICKEL, Jason. The contradiction of the sustainable development goals: Growth versus ecology on a finite planet. **Sustainable Development**, v. 27, n. 5, p. 873-884, 2019. DOI: < <https://doi.org/10.1002/sd.1947> >

JANNES, Kristof; LAGAISSE, Bert; JOOSEN, Wouter. The web browser as distributed application server: towards decentralized web applications in the edge.

In: **Proceedings of the 2nd International Workshop on Edge Systems, Analytics and Networking**. 2019. p. 7-11. DOI: <https://doi.org/10.1145/3301418.3313938>

KRONEMBERGER, Denise Maria Penna. Os desafios da construção dos indicadores ODS globais. *Ciência e Cultura*, v. 71, n. 1, p. 40-45, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.21800/2317-66602019000100012>>

KUUSKERI, Janne; MIKKONEN, Tommi. Partitioning web applications between the server and the client. In: **Proceedings of the 2009 ACM symposium on Applied Computing**. 2009. p. 647-652. DOI: <https://doi.org/10.1145/1529282.1529416>

LARA, Daniela Mueller de (2017). Avaliação química de lenhos carbonizados de espécies da araucariaceae: caracterização de materiais associada à análise multivariada para inferências (paleo)ambientais. Tese de Doutorado. UNIVATES, 134 p.

NASKOVA, J. RecycHong: Mobile App Co-design. In: **Proceedings of the 2017 ACM Conference Companion Publication on Designing Interactive Systems**. 2017. p. 337-340. DOI: <https://doi.org/10.1145/3064857.3079188>

NASA, (2021) "2020 Tied for Warmest Year on Record, NASA Analysis Shows", <https://www.giss.nasa.gov/research/news/20210114/>, Janeiro.

NOAA, National Oceanic Atmospheric Administration. (2021) "State of the Climate: Global Climate Report for Annual 2020", <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/202013>, Janeiro.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. Emissões de GEE no Brasil e suas implicações para políticas públicas e a contribuição brasileira para o Acordo de Paris. Documento de Análise. Período 1970 - 2016. Observatório do Clima, 2018.

ONU – United Nations. General Assembly. Resolution 70/1, 25 september 2015. "Transforming our World: the 2030 Agenda for Sustainable Development". Disponível em: <

http://www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A_RES_70_1_E.pdf >. Acesso em: 29 dez. 2022.

PUTTHAKASEM, Natnicha.; LIMPHITAKPHONG, Nantamol; CHAVALPARIT, Orathai. Scenarios of municipal solid waste management for mitigating greenhouse gas emission: a case study of supermarket in Bangkok, Thailand. In: **Proceedings of the 7th International Conference on Informatics, Environment, Energy and Applications**. 2018. p. 31-35. DOI: <https://doi.org/10.1145/3208854.3208889>

RICHTER, Marc François; DE LARA, Daniela Mueller; ANDREAZZA, Ricardo de Carly Luz. Educação Ambiental e Gases do Efeito Estufa (GEE): uma abordagem do papel do metano para Educação Básica. **Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA)**, v. 16, n. 5, p. 431-445, 2021. DOI: < <https://doi.org/10.34024/revea.2021.v16.12400> >

SEEG (2020). Análise das Emissões Brasileiras de Gases de Efeito Estufa e suas implicações para metas de clima do Brasil 1970-2019. Disponível em: https://seeg-br.s3.amazonaws.com/Documentos%20Analiticos/SEEG_8/SEEG8_DOC_ANALITICO_SINTESE_1990-2019.pdf. Acesso em: 23 mar. 2021.

SEEG (2021). SEEG 8.0 - nota metodológica do setor de resíduos. Disponível em: https://seeg-br.s3.amazonaws.com/Documentos%20Analiticos/SEEG%208%20com%20Municipios/Nota-Metodologica-SEEG8_Residuos_com_Anexo_Municipios_-_02.2021.pdf. Acesso em: 06 mai. 2021.

SURESH, Nalina; LIMBO, Anton; HASHIYANA, Valerianus.; UJAKPA, Martin Mabeifan; NYIRENDA, Chawezi. An internet of things (IoT) based solid waste monitoring system. In: **Proceedings of the 2nd International Conference on Intelligent and Innovative Computing Applications**. 2020. p. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1145/3415088.3415104>

UNFCCC – United Nations Framework Convention Climate Change (2019). Metodological Tool: emissions from solid waste disposal sites. Disponível em:

<https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAmethodologies/tools/am-tool-04-v8.0.pdf>.

Acesso em: 03 de mar de 2021.

Santos, M.M; Romanel, C.; Van Elk, A. G Análise da eficiência de modelos de decaimento de primeira ordem na previsão da emissão de gás de efeito estufa em aterros sanitários brasileiros. Santos, M.M.; Romanel, C.; Van Elk, A.G.H.P 2017. Revista Engenharia Sanitária Ambiental. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/NmvJNjCL9pSYJhtvHJ8ZvFL/?lang=pt>

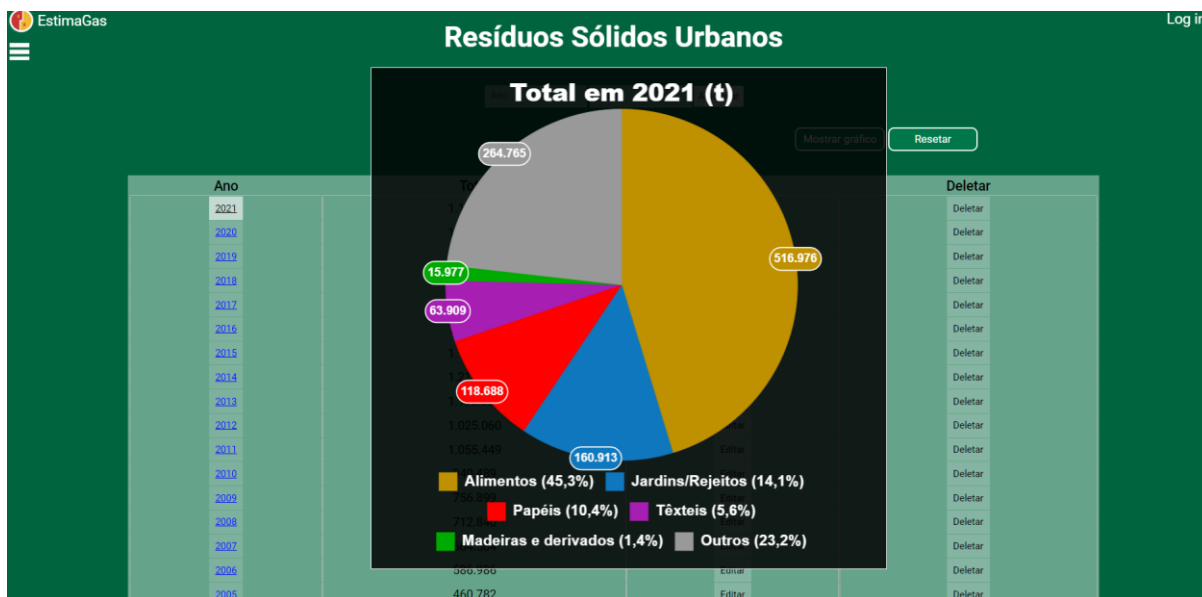
VIANA, Thiago Augusto Pimenta. Análise das estimativas de emissão de metano por aterros sanitários em projetos de MDL no Brasil. 2011. Disponível em: <http://www.peamb.eng.uerj.br/trabalhosconclusao/2011/ThiagoVianaDissertfinal.pdf>

5 PRODUTOS TÉCNICOS

Vislumbrando a pesquisa, *A Geração Quali-Quantitativa de Metano através da Disposição Final de Resíduos Sólidos em Aterro Sanitário no Estado do Rio Grande do Sul*, contemplando os ODS – Agenda 2030 aos objetivos 7, 11 e 13, dentro da linha de pesquisa Tecnologias Sustentáveis para o Desenvolvimento, promoveu a geração de quatro produtos. O primeiro refere-se a um *software que* expõe as estimativas desenvolvidas de metano de forma facilitadora a profissionais, agentes públicos e entusiastas sob interesse no tema. O segundo, trata-se de um manual de uso do software e da ferramenta de emissões de local de disposição final de resíduos sólidos do MDL. O terceiro aborda um relatório técnico para o respectivo órgão ambiental estadual e o quarto produto, um aplicativo para celular/smartphone.

Ambos produtos foram anexados neste documento, sendo que o Software e Aplicativo para celular estão explícitos no segundo produto técnico *“Manual para Operação do EstimaGas”*. Todos os produtos tiveram como base e classificação o documento referencial da CAPES para produções técnicas (BRASIL, 2019). Os produtos estão abaixo.

5.1 PRODUTO 1 – SOFTWARE DE MEDIÇÃO DE GÁS METANO ESTIMAGAS



Descrição da finalidade do software:

A elaboração de um Software de estimativas de emissões é o principal produto, para projetar as emissões e/ou produção do Gás Metano de aterro sanitário possibilitando conhecimento aos municípios aplicado por profissionais técnicos, agentes públicos, gestores e entusiastas do tema.

Avanços tecnológicos/grau de novidade:

Os resultados deste trabalho possuem relevância e inovação tecnológica diante do uso de uma metodologia de modelo equacional.

(X) Produção com médio teor inovativo: Combinação de conhecimentos pré-estabelecidos.

Autorias:

Docentes:

Dr. Celso Maciel da Costa, professor permanente do Curso de Engenharia da Computação da UERGS; Dr. Marc François Richter, orientador e professor permanente do PPGAS/UERGS; e Dra. Daniela Mueller de Lara, coorientadora e professora colaboradora do PPGAS/UERGS.

Discente:

Mestrando Ricardo de Carly Luz Andreazza, Mestrado profissional em Ambiente e Sustentabilidade (PPGAS/UERGS).

Demais autores:

Natan Teixeira Manique, Graduando em Engenharia da Computação da UERGS.

Conexão com a Pesquisa

Projeto de Pesquisa vinculado à produção: Caracterização quali-quantitativa do Gás Metano.

Linha de Pesquisa vinculada à produção: Tecnologias Sustentáveis para o Desenvolvimento.

Situação atual da Produção:

- () Piloto/Protótipo
- () Em teste
- (X) Finalizado/implantado

Recursos e vínculos da Produção Tecnológica

Sem financiamento

Descrição da Abrangência realizada:

O Software foi vinculado a um site e qualquer pessoa com acesso a rede poderá acessar.

Descrição da Abrangência potencial:

Diante das emissões de Metano, Gás de Efeito Estufa, como um dos principais responsáveis pelas mudanças climáticas, o software facilitará acesso a estimativa de metano gerado pela disposição final de resíduos sólidos em aterro sanitário, permitindo o conhecimento, aperfeiçoamento operacional e estratégico por parte dos gestores municipais.

Descrição da Replicabilidade:

Poderá ser utilizado por qualquer pessoa interessada.

Natureza:

Computacional

Finalidade

Estimativa de Gás metano em aterro sanitário

A produção necessita estar no repositório?

Sim

5.2 PRODUTO 2 – MANUAL TÉCNICO PARA USO DO SOFTWARE VOLTADO A FERRAMENTA EMISSÕES DE LOCAIS DE DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DO MDL

Descrição da finalidade:

Guia de instrução compilado da Ferramenta Emissões de Locais de Disposição de Resíduos Sólidos, no âmbito da metodologia ACM0001: Queima ou uso de gás de aterro do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), com uso voltado a aterros sanitários para capturar gás metano, componentes de biogás e projetos de carbono.

Autorias:

Docentes:

Dr. Marc François Richter, orientador e professor permanente do PPGAS/UERGS, Dra. Daniela Mueller de Lara, coorientadora e professora colaboradora do PPGAS/UERGS.

Discente:

Mestrando Ricardo de Carly Luz Andreazza, Mestrado profissional em Ambiente e Sustentabilidade (PPGAS/UERGS).

Conexão com a Pesquisa:

Sim.

Conexão com a Produção Científica:

Não se aplica.

A produção necessita estar no repositório?

Sim.

Documentos Anexados (em PDF):

O próprio documento.

5.3 PRODUTO 3 – RELATÓRIO TÉCNICO SOBRE AS PROJEÇÕES DE METANO

Descrição da finalidade do relatório:

Uso de um relatório técnico conclusivo contextualizando a atividade de aterro sanitário, planejamento e a conclusão dos resultados das estimativas de metano.

Avanços tecnológicos/grau de novidade:

Os resultados deste trabalho possuem relevância e grau de novidade diante da relevância do objeto a aterros sanitários e aos resultados de metano para aplicação do conhecimento produzido.

(X) Produção com médio teor inovativo: Combinação de conhecimentos pré-estabelecidos.

Autorias:

Docentes:

Dr. Marc François Richter, orientador e professor permanente do PPGAS/UERGS; e Dra. Daniela Mueller de Lara, coorientadora e professora colaboradora do PPGAS/UERGS.

Discente:

Mestrando Ricardo de Carly Luz Andreazza, Mestrado profissional em Ambiente e Sustentabilidade (PPGAS/UERGS).

Conexão com a Pesquisa:

Projeto de Pesquisa vinculado à produção: Caracterização quali-quantitativa do Gás Metano.

Linha de Pesquisa vinculada à produção: Tecnologias Sustentáveis para o Desenvolvimento.

5.4 PRODUTO 4 – APLICATIVO PARA SMARTPHONE SOBRE GÁS METANO

Descrição da finalidade do aplicativo:

Uso de um aplicativo educativo para sistema Android com o mesmo uso do site, para as emissões e/ou produção do Gás Metano de aterro sanitário possibilitando acesso instantâneo voltado ao público em geral com interesse.

Avanços tecnológicos/grau de novidade:

Os resultados deste trabalho possuem relevância e inovação tecnológica diante do uso de uma metodologia de modelo equacional.

(X) Produção com médio teor inovativo: Combinação de conhecimentos pré-estabelecidos.

Autorias:

Docentes:

Dr. Celso Maciel da Costa, professor permanente do Curso de Engenharia da Computação da UERGS; Dr. Marc François Richter, orientador e professor permanente do PPGAS/UERGS; e Dra. Daniela Mueller de Lara, coorientadora e professora colaboradora do PPGAS/UERGS.

Discente:

Mestrando Ricardo de Carly Luz Andreazza, Mestrado profissional em Ambiente e Sustentabilidade (PPGAS/UERGS).

Demais autores:

Natan Teixeira Manique, Graduando em Engenharia da Computação da UERGS.

Conexão com a Pesquisa

Projeto de Pesquisa vinculado à produção: Caracterização quali-quantitativa do Gás Metano.

Linha de Pesquisa vinculada à produção: Tecnologias Sustentáveis para o Desenvolvimento.

Situação atual da Produção:

- Piloto/Protótipo
- Em teste
- Finalizado/implantado

Recursos e vínculos da Produção Tecnológica

Sem financiamento

Descrição da Abrangência realizada:

O Aplicativo foi vinculado a um site e pode ser baixado via play store por qualquer pessoa.

Descrição da Abrangência potencial:

Diante das emissões de Metano, Gás de Efeito Estufa, como um dos principais responsáveis pelas mudanças climáticas, o aplicativo facilitará acesso a estimativa de metano gerado pela disposição final de resíduos sólidos em aterro sanitário, permitindo o conhecimento ao público geral interessado.

Descrição da Replicabilidade:

Poderá ser utilizado por qualquer pessoa interessada.

Natureza:

Computacional

Finalidade:

Estimativa de Gás metano em aterro sanitário

A produção necessita estar no repositório?

Sim

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A dissertação apresenta os diversos resultados referentes à geração de metano em aterro sanitário. Foi possível conhecer a dimensão e complexidade sobre o assunto que envolve as especificidades sobre o gás metano, aplicações potenciais e perspectivas que resultem no entendimento para aperfeiçoar os processos de mitigação deste hidrocarboneto no combate às mudanças climáticas.

As abordagens desenvolvidas entre os artigos, pontuaram a interdisciplinaridade relacionada ao aspecto qualitativo do gás metano voltado a educação ambiental em artigo já publicado, a caracterização quantitativa do uso de um modelo equacional para estimar o gás metano e a relação tecnológica digital, representada em um *software* de forma multidisciplinar. Ambas colocações relacionam a transversalidade do assunto às mudanças climáticas neste trabalho.

Através da ferramenta do MDL 04, na metodologia ACM0001, os resultados de metano, carbono equivalente, projeções até 2030, a geração por tipo de resíduo e o volume de metano obtido para combustível no biogás foram estimados.

Ao longo das estimativas, os modelos do Cenário 1 (Recomendado) e Cenário 2 (Conservador) apontaram diferentes resultados. Os dois modelos apresentaram valores superestimados, mostrando que a estimativa matemática oferece riscos na exatidão, mas que sem uso da modelagem, torna-se inviável e incompreensível as projeções e conhecimento para um projeto inovador e sua devida replicação.

O modelo do cenário 2 apresentou resultados satisfatórios e mais baixos do que o recomendado pelo MDL (Cenário 1). Tal fato aproximou-se dos valores reais de reduções certificadas pelo aterro sanitário Central de Resíduos do Recreio.

Ainda, recomenda-se o aperfeiçoamento da equação de decaimento de primeira ordem para metano em futuros estudos, principalmente para o clima subtropical e mais condizente para a realidade do hemisfério sul. Ainda se observa que os valores dos parâmetros para cada tipo de resíduo também devem ser avaliados em razão velocidade da degradação em função localização geográfica dos mesmos.

Foi possível perceber que a fração de resíduo de alimentos apresenta enorme condição de uso renovável para a produção de biogás, visto que sua velocidade de decomposição favoreceu alta produção de metano. Visualizou-se também a quantidade deste material destinado para aterros sanitários pelo fato prévio de emprego para a compostagem, podendo ser tratado como grande quantia de

substrato. Uma redução progressiva da destinação de resíduos orgânicos, gradativamente, poderia estar atrelada a programas contínuos de compostagem *in loco* aos municípios envolvidos no processo.

Devido à falta de instrumentos do poder público quanto à legislação e instruções normativas para o reporte de emissões de Gases de Efeito Estufa, torna-se relevante estabelecer de forma voluntária, a necessidade de o setor privado/público identificar e informar as emissões que foram geradas, com prazo de adaptação e objetivando a mitigação das mesmas.

Em caráter de recomendação para o órgão fiscalizador, o reporte compulsório deverá ser implantado após o voluntário, em formato gradativo dentro de um prazo aceitável para que nos próximos anos além dos aterros sanitários, o setor de resíduos e os demais setores econômicos informem suas emissões e remoções/reduções de GEE mediante a elaboração de inventários. Uma das formas poderia estar condicionada ao licenciamento ambiental e, ainda, também possibilitar acesso a outras iniciativas mundiais fortalecendo ESG.

Os produtos tecnológicos desenvolvidos possibilitarão auxílio e compreensão de forma facilitadora para cada finalidade alcançada. O primeiro, a partir do desenvolvimento do *software* “EstimaGas”, permitirá ao usuário o entendimento sobre a quantidade e a perspectiva de geração de metano. O segundo, um manual de uso do software e da ferramenta de emissões permitindo ao usuário de modo facilitador maior entendimento da aplicação. O terceiro enquanto relatório técnico apontará de forma detalhada quais os caminhos e procedimentos quanto as emissões de metano em aterro sanitário e o quarto produto, um aplicativo de celular/smartphone simplificando o uso do software de forma instantânea

Dessa forma, as proposições estão no sentido de contribuir para os objetivos de neutralidade climática e/ou balanço energético para fortalecer a resiliência climática.

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 10004**. Resíduos sólidos. Classificação. Disponível em: <https://bit.ly/3YiSLUW>. Acesso em: 08 de fevereiro de 2021.

ABNT. **NBR 8419/1992**. Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Disponível em: <https://bit.ly/3Zfg3wa>. Acesso em: 4 de fevereiro de 2023.

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020**. 2020. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2020/>. Acesso em: 4 de fevereiro de 2023.

BRASIL. Lei nº 12.187 de 29 de dezembro de 2009. **Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 30.12.2009 – Edição extra. 2009. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/l12187.htm. Acesso em: 08 de fevereiro de 2021.

BRASIL. Lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010. **Política Nacional de Resíduos Sólidos PNRS**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 08 de fevereiro de 2021.

CETESB. **Biogás Definição**. Governo de São Paulo – SP. 2020. Disponível em: [https://cetesb.sp.gov.br/biogas/#:~:text=Contudo%2C%20em%20linhas%20gerais%2C%20o,mistura%20gasosa%20composta%20principalmente%20por%3A&text=Metano%20\(CH4\)%3A%2050,do%20volume%20de%20g%C3%A1s%20produzido.&text=Di%C3%B3xido%20de%20carbono%20](https://cetesb.sp.gov.br/biogas/#:~:text=Contudo%2C%20em%20linhas%20gerais%2C%20o,mistura%20gasosa%20composta%20principalmente%20por%3A&text=Metano%20(CH4)%3A%2050,do%20volume%20de%20g%C3%A1s%20produzido.&text=Di%C3%B3xido%20de%20carbono%20). Acesso em: 09 de maio de 2021.

CRVR. **Central de Resíduos do Recreio**. 2020. Disponível em: <https://bit.ly/3GA8ZjX>. Acesso em: 26 de fevereiro de 2021.

FEPAM. **Diretriz Técnica nº 01**. Estabelece Condições e os Limites Máximos de Emissão de Poluentes Atmosféricos a Serem Adotados pela Fepam para Fontes Fixas e dá Outras Providências. Governo do Rio Grande do Sul – RS, 2018. Disponível em: <https://bit.ly/3miBDS5>. Acesso em: 26 de fevereiro de 2021.

FEPAM. **Diretriz Técnica nº 04**. Para o Licenciamento Ambiental da Atividade de Disposição Final de Resíduos Sólidos Urbanos. Governo do Rio Grande do Sul – RS, 2017. Disponível em: <http://ww3.fepam.rs.gov.br/CENTRAL/DIRETRIZES/DT-004-2017.PDF>. Acesso em: 26 de fevereiro de 2021.

FEPAM. **Portaria nº 32**. Critérios e diretrizes que deverão ser considerados para a execução das auditorias ambientais. Governo do Rio Grande do Sul – RS, 2016. Disponível em: <http://ww3.fepam.rs.gov.br/LICENCIAMENTO/area4/17.asp>. Acesso em: 26 de fevereiro de 2021.

FRANQUETO, R.; MARTINS, E. H.; CABRAL, A. R.; SCHIRMER, W. N. Monitoramento de emissões fugitivas a partir da camada de cobertura de aterro sanitário. **Uningá Review**, v. 35, p. eRUR2603-eRUR2603, 2020.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

IPCC. Chapter 6: Wastewater Treatment and Discharge. IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. 2007.

IPCC. **Climate Change 2007**: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S. et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2007.

LARA, D. M. **Avaliação química de lenhos carbonizados de espécies da araucariaceae**: caracterização de materiais associada à análise multivariada para inferências (paleo) ambientais. 134 p. Tese de Doutorado. UNIVATES, Lajeado, 2017.

LATTANZI, I. E.; PRATA FILHO, D. A.; QUELHAS, O. L. G. Modelagem da geração de biogás aplicando metodologia CDM para redução de emissões de gases de efeito estufa: estudo de caso do Aterro MTR Santa Maria Madalena, RJ, Brasil. **Sistemas & Gestão**, v. 14, n. 4, p. 483-491, 2019.

MOREIRA, H.; GIOMETTI, A. L. O Protocolo de Quioto e as Possibilidades de Inserção do Brasil no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo por meio de Projetos em Energia Limpa. **Contexto internacional**, v. 30, n. 1, 2008.

PEDOTT, J. G. J.; AGUIAR, A. O. **Biogás em aterros sanitários**: comparando a geração estimada com a quantidade verificada em projetos de mecanismo de desenvolvimento limpo. UNINOVE, São Paulo – SP, 2014.

REGATTIERI, C. R. **Quantificação da emissão de biogás em aterro sanitário**: estudo de caso do aterro sanitário de São Carlos - SP. 138 p. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

RELATÓRIO LUZ. Sociedade Civil da Agenda 2030 de Desenvolvimento Sustentável Brasil, 2022. **Grupo de Trabalho da Sociedade Civil para a Agenda 2030**. Disponível em: <https://gtagenda2030.org.br/relatorio-luz/relatorio-luz-2022/>. Acesso em: 03 de fevereiro de 2023.

RIO GRANDE DO SUL. **Decreto nº 45.098 de 15 de junho de 2007**. Fórum Gaúcho de Mudanças Climáticas. Porto Alegre, RS, 2007. Disponível em: <http://www.al.rs.gov.br/filerepository/repLegis/arquivos/DEC%2045.098.pdf>. Acesso em: 21 de janeiro de 2021.

RIO GRANDE DO SUL. **Lei nº. 13.594, de 30 de dezembro de 2010**. Política Gaúcha sobre Mudanças Climáticas PGMC, Porto Alegre, RS, 2009. Disponível em: <http://www.al.rs.gov.br/filerepository/repLegis/arquivos/13.594.pdf>. Acesso em: 21 de janeiro de 2021.

THIOLLENT, M. **Metodologia da pesquisa-ação**. 2. ed. São Paulo: Cortez, 1986.

UNFCCC. United Nations Framework Convention Climate Change. **Methodological tool**: Emissions from solid waste disposal sites. Version 08.0. Disponível em: <https://bit.ly/3YghqK3>. Acesso em: 08 de fevereiro de 2021.

ANEXOS

ANEXO I - Perguntas norteadoras.

1. Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)

1.1 Qual a Quantidade real recebida de RSU que o aterro recebe por dia/mês/ano?

2. Biogás

2.1. Qual a produção quanti e qualitativa de Biogás no Aterro Sanitário Central de Resíduos do Recreio?

3. Metodologia para Quantificação:

3.1. Qual o método empregado para mensurar os valores de RSU e Gases de Efeito Estufa no Aterro Sanitário?

3.2 A metodologia ACM0001: Flaring or use of Landfill gas- Version19.0, já foi empregada para quantificar os valores de CH₄ no aterro sanitário?

ANEXO II - Manual Técnico para uso do Software EstimaGas.



MANUAL DE USO DO SOFTWARE ESTIMAGÁS APLICADO A FERRAMENTA
EMISSÕES DE LOCAIS DE DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

Março, 2023

SUMÁRIO

1 - FICHA DO PRODUTO TÉCNICO.....	120
1.1 DESCRIÇÃO DA FINALIDADE.....	121
1.2 AUTORIAS.....	121
1.3 INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES.....	121
2 - APRESENTAÇÃO.....	121
2.1 SOBRE O ESTIMAGÁS.....	121
3 - PADRÕES DE USO.....	122
3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	123
3.2 GERAÇÃO DE GASES.....	125
3.3 BIOGÁS POR ANO.....	127
3.4 RELATÓRIO.....	127
4 – ATUALIZAÇÕES.....	130

1 - FICHA DO PRODUTO TÉCNICO

1.1 DESCRIÇÃO DA FINALIDADE

Guia de instrução compilado da Ferramenta 04: Emissões de Locais de Disposição de Resíduos Sólidos, no âmbito da metodologia ACM0001: Queima ou Uso de Gás de Aterro, do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), com uso para atividade de aterros sanitários aplicado em capturar gás metano, componentes de biogás e projetos de carbono.

1.2 AUTORIAS:

Docentes:

Dr. Marc François Richter, orientador e professor permanente do PPGAS/UERGS, Dra. Daniela Mueller de Lara, coorientadora e professora colaboradora do PPGAS/UERGS.

Discentes:

Mestrando Ricardo de Carly Luz Andreazza, Mestrado profissional em Ambiente e Sustentabilidade (PPGAS/UERGS).

Bolsista de Iniciação Científica:

Graduando Natan Manique, Bacharelado em Engenharia de Computação (ENGCOMP/UERGS)

1.3 INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES

Conexão com a Pesquisa: Sim

Conexão com a Produção Científica: Não se aplica.

A Produção Necessita estar no Repositório? Sim.

Documentos Anexados (Em PDF): O próprio documento.

2 - APRESENTAÇÃO

2.1 - SOBRE O ESTIMAGÁS

O EstimaGas é uma ferramenta computacional criada para projetar a quantidade de metano (CH_4) em aterros sanitários. Sua origem é oriunda da pesquisa de mestrado do aluno de Mestrado Ricardo de Carly Luz Andrezza que conteve 4 (quatro) produtos desenvolvidos ao longo da dissertação. Nesse sentido, possuem relação a elaboração do Software e Aplicativo, intitulado: “EstimaGas”, acompanhado do Manual, enquanto produtos técnicos reconhecidos pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), vinculado ao Ministério da Educação (MEC).

A relevância do software e produto tecnológico “*EstimaGas*” foi além da pesquisa de mestrado sendo resultado de uma parceria institucional entre a Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS), Fundação de Proteção Ambiental (FEPAM/RS) e Secretaria de Meio Ambiente e Infraestrutura do Estado do Rio Grande do Sul (SEMA/RS) e da empresa Companhia Riograndense de Valorização de Resíduos (CRVR), de modo transversal a participação dos atores estratégicos.

O software necessita ser alimentado por dados de disposição final de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) entregues a um aterro sanitário em valores de quantidade anual depositada, para poder fornecer uma estimativa da produção do Gás Metano (CH_4) gerado no aterro sanitário, a base da atividade microbiológica por meio das reações anaeróbicas.

O sistema implementado possui um servidor, que gerencia o banco de dados, que contém as informações sobre a quantidade de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), armazenados em quantidade de toneladas/ano, e por uma aplicação cliente, que executa em notebooks e em smartphones. Aplicação cliente permite ao usuário visualizar e analisar dados referentes ao envio de resíduos sólidos entre 2001 e 2021, neste caso estudado o aterro sanitário da CRVR, por exemplo. Os dados podem ser visualizados por tabelas e gráficos. Podem ser visualizados a quantidade total de resíduos sólidos depositados anualmente no aterro e a quantidade anual de resíduos, por tipo (alimentos, madeiras e derivados, têxteis, papéis, jardins/rejeitos e outros tipos não classificados nos tipos anteriores).

Por fim os resultados alcançados foram satisfatórios. Foi desenvolvido um sistema composto por um site web e um aplicativo para smartphones, ambos em pleno funcionamento. É possível visualizar os dados coletados entre 2001 e 2021 na forma de gráficos e tabelas. Além disso, o sistema realiza cálculos do gás metano, do dióxido de carbono e do biogás gerado, apresentado esses dados também na forma de gráficos e tabelas, de acordo com o período escolhido pelo usuário.

Boa experiência!



3 - PADRÕES DE USO

Para utilizar o referido software precisa-se acessar a página: www.estimagas.com.br. A primeira página (Figura 2) do sistema apresenta uma breve apresentação do software e um botão, que expande um menu, na parte esquerda superior da tela.



Através deste *menu* distribuído em 4 (quatro) eixos, é possível acessar às seguintes opções:

3.1 - RESÍDUOS SÓLIDOS

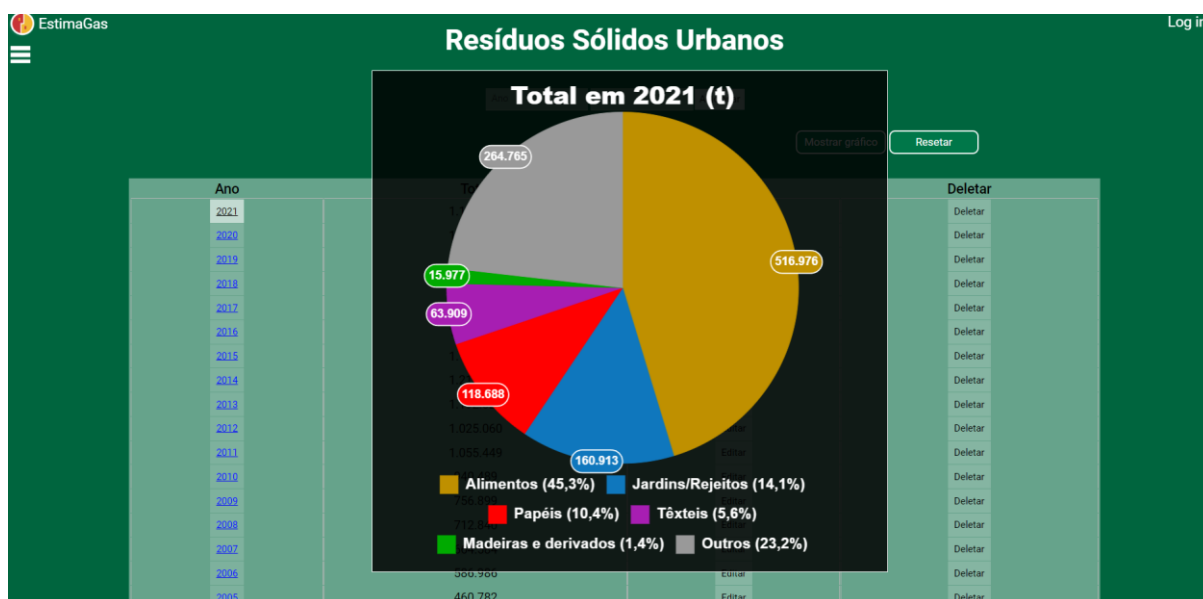
A segunda página intitulada "**Resíduos Sólidos**", permite que o usuário visualize os dados em tabelas e gráficos. Nessa página, é possível editar os valores, bem como escolher o período de tempo a ser apresentado no gráfico. Além disso, o usuário pode selecionar o tipo de gráfico que deseja visualizar e verificar o total de resíduos por tipologia. Abaixo, a tabela que permite editar, deletar e adicionar os dados de RSU, e visualizar a gravimetria.

Ano	Total	Editar	Deletar
2001	1.141.227	Editar	Deletar
2002	1.164.573	Editar	Deletar
2003	1.217.757	Editar	Deletar
2004	1.166.318	Editar	Deletar
2005	1.091.763	Editar	Deletar
2006	1.149.634	Editar	Deletar
2007	1.195.274	Editar	Deletar
2008	1.215.742	Editar	Deletar
2009	1.192.027	Editar	Deletar
2010	1.025.060	Editar	Deletar
2011	1.055.449	Editar	Deletar
2012	940.489	Editar	Deletar
2013	756.899	Editar	Deletar
2014	712.840	Editar	Deletar
2015	664.584	Editar	Deletar
2016	586.986	Editar	Deletar
2017	460.782	Editar	Deletar
2018	385.744	Editar	Deletar
2019	272.548	Editar	Deletar
2020	32.229	Editar	Deletar
2021	592	Editar	Deletar

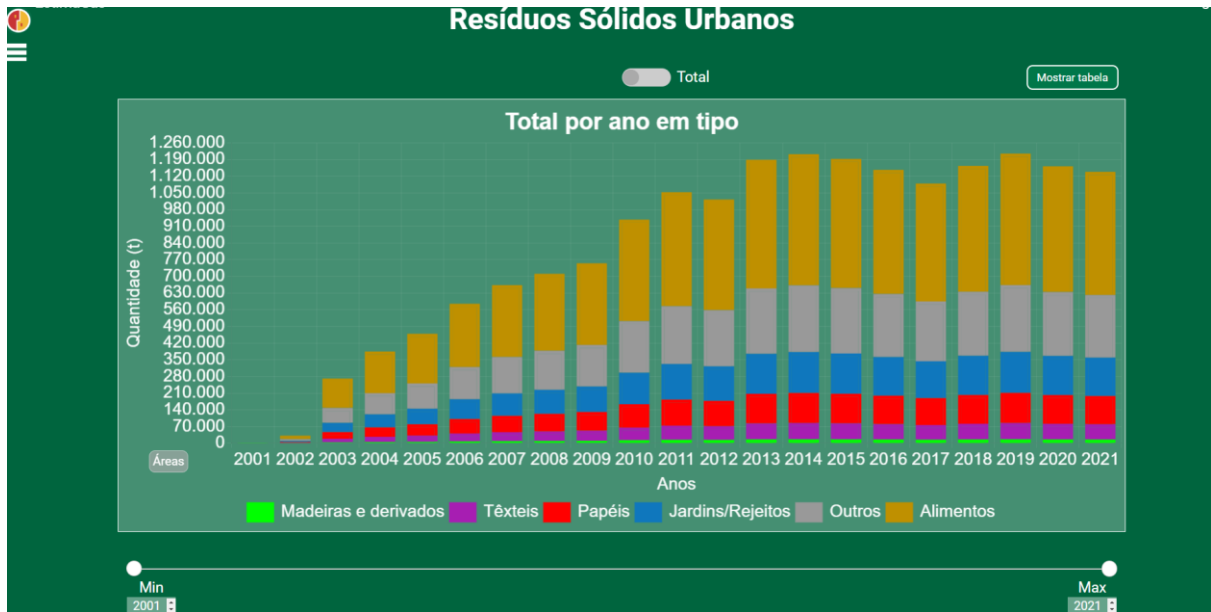
Gravimetria: Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE).
Dados de RSU: Companhia Rio Grandense de Valorização de Resíduos (CRVR).
Metodologia: MDL/ACM0001 - Queima e/ou uso de Gás de Aterro.

Abaixo do título **Resíduos Sólidos Urbanos** (RSU) é possível inserir os valores de RSU. O campo “**Ano**” serve para introduzir o período a ser estudado, conseqüente, no campo “**Quantidade**”, representam os valores registrados ou simulados de RSU produzidos e encaminhados para a destinação final ambientalmente adequada em aterro sanitário.

Ao posicionar o *cursor* do mouse na coluna “**Ano**”, é possível visualizar a representação da gravimetria dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) em toneladas (t) para cada ano escolhido e que foi introduzido anteriormente.



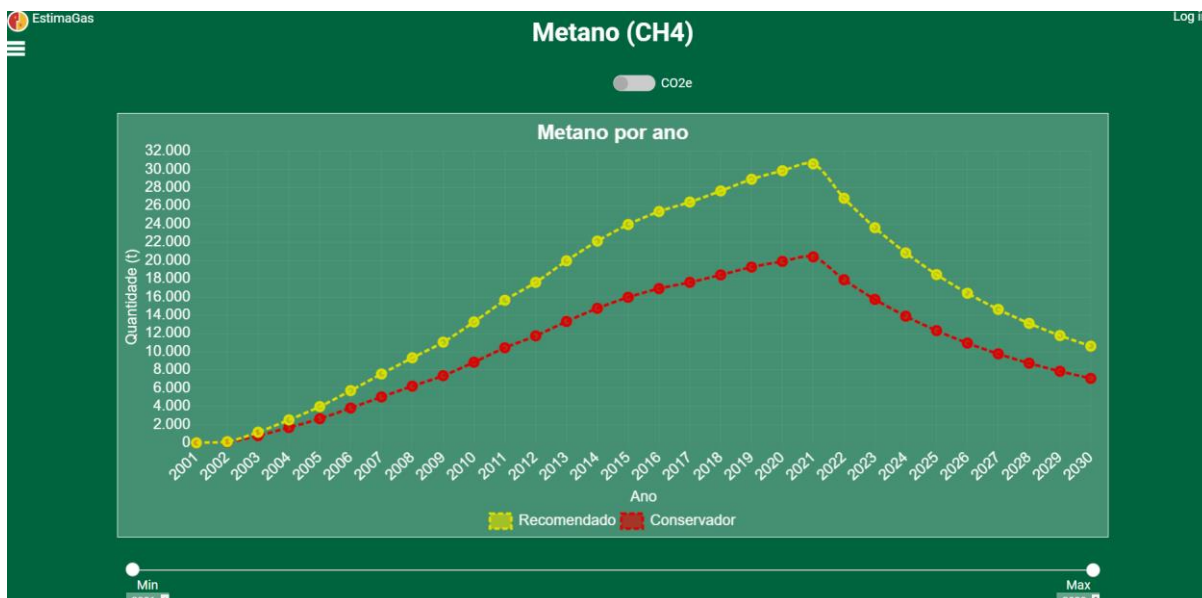
Ainda, ao clicar em “**Mostrar gráfico**” é observado o “Total por Ano” dividido em “**Tipo de RSU**” que chegou ao aterro sanitário, em gráfico de barras, podendo, assim, ser observado todo conjunto de RSU ou apenas parte dos RSU por tipologia, clicando na legenda. Abaixo dos gráficos, existe uma linha horizontal que permite visualizar o gráfico do ano de início e fim do período desejado que foi selecionado.



3.2 - GERAÇÃO DE GASES

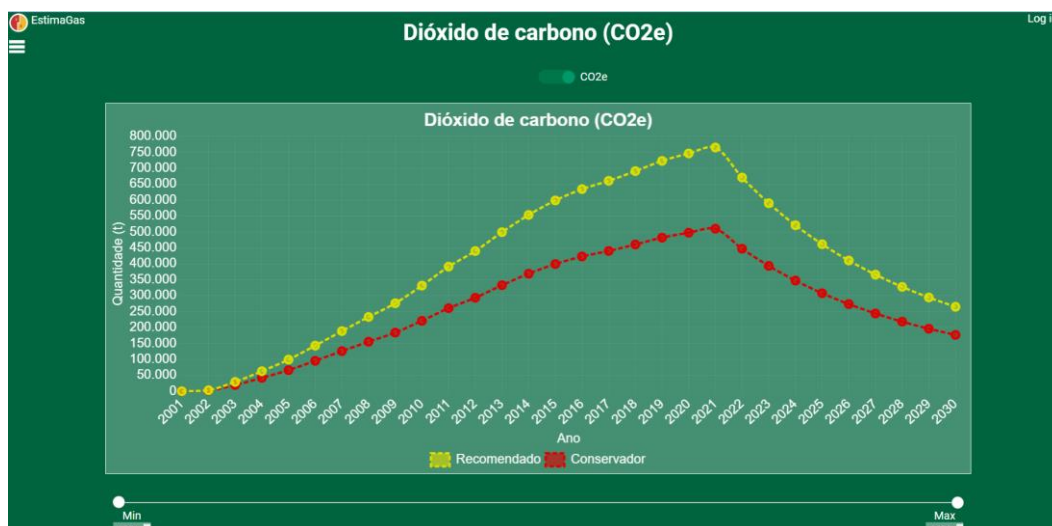
A página Geração de Gases possui duas finalidades para Metano e Dióxido de Carbono. Apresentam gráficos com os cálculos de metano e dióxido de carbono gerados a partir dos resíduos sólidos depositados no aterro sanitário, respectivamente. Essas páginas oferecem as mesmas opções de visualização dos gráficos da página **"Resíduos Sólidos"**. O aplicativo para smartphones Android, apresenta as mesmas funcionalidades do site. Portanto, pode ser aplicado em ambas ferramentas. As figuras a seguir apresentam algumas tabelas e gráficos que podem ser gerados pelo sistema.

Ao clicar na opção **"Geração de Gases"** e abaixo do título **"Metano (CH₄)"** é possível identificar a fração do gás metano que foi produzido ou que será produzido nos próximos anos, a partir da quantidade de RSU descrita, durante o período registrado no programa. As representações dos valores estão ilustradas em 2 (duas) faixas, Recomendado e Conservador.



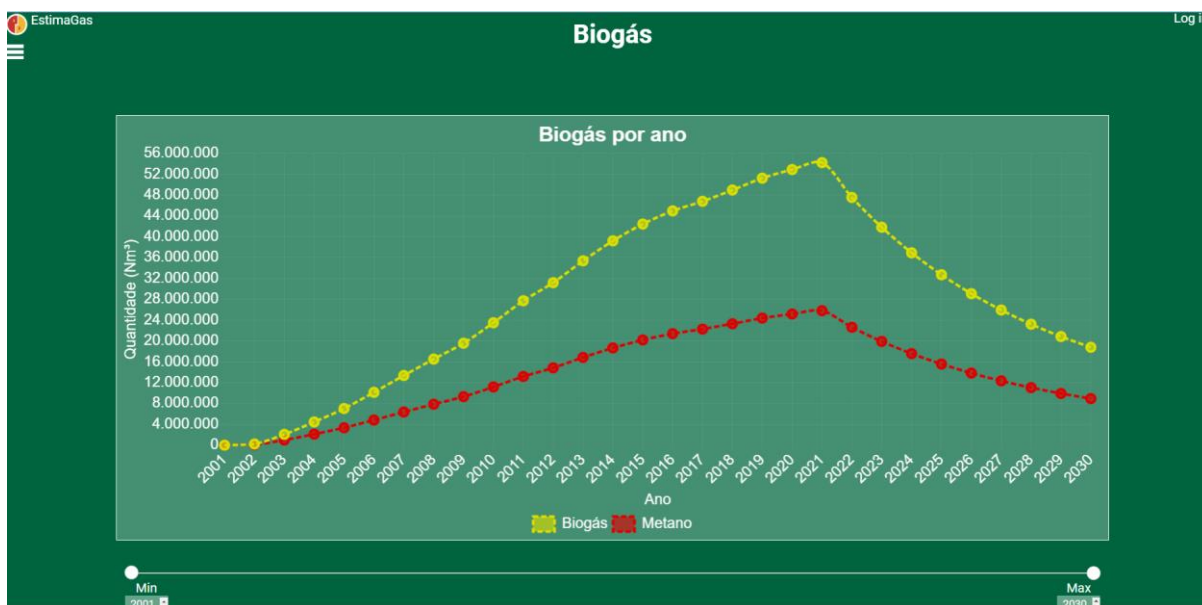
O valor “**Recomendado**” está de acordo com o valor padrão do fator de correção do modelo, disposto na equação empregada da metodologia do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). O valor “**Conservador**” foi definido pelo autor do estudo, com a premissa dos valores projetados estarem mais próximos dos valores realísticos do aterro sanitário estudado.

Ao acionar a barra de tipo de gás, é possível alterar a unidade de gás “**Metano CH₄**” para “**Dióxido de Carbono Equivalente (CO_{2e})**” e observar as projeções comentadas.



3.3. BIOGÁS

Ao clicar na opção **“Biogás”** e abaixo do título **“Biogás por ano”** é possível visualizar a quantidade projetada em um gráfico semelhante ao anterior. Entretanto, ao invés da unidade em massa de toneladas (t), a representação está definida na unidade volumétrica de normal metrocúbico (Nm³).



As representações dos valores estão ilustradas em 2 (duas) faixas, **“Biogás”** e **“Metano”**. A primeira representação considera o total de gases presentes no conjunto biogás, enquanto na segunda representação, representa apenas a quantidade de gás metano presente no biogás projetado, na unidade volumétrica de Nm³.

3.4 – RELATÓRIO

Ao clicar na opção **“Relatório”** a partir dos dados inseridos no programa **“EstimaGas”**, é possível definir qual a extensão do arquivo para exportar os resultados desenvolvidos.



O formato para exportar os valores obtidos estão ilustradas em 3 (três) opções, **“Texto (.txt)”**, **“Valores Separados por Vírgula (.csv)”** e **“Planilha (.xlsx)”**. Após a definição do formato, a faixa **“Município (opcional)”** nomina o local que o usuário tem por finalidade. Poderá ser um Aterro Sanitário que receba os RSU projetando o potencial de geração de CH₄ ou até um município que queira obter o conhecimento das emissões de CH₄ oriundas dos RSU gerados em seus limites, para projetar posterior envio para a destinação final ambientalmente adequada.



Para fins de ilustração, a simulação traz o hipotético nome do local de **“Destinação Ambientalmente Adequada”** e do formato do arquivo a extensão **“Planilha (.XLSX)”**.

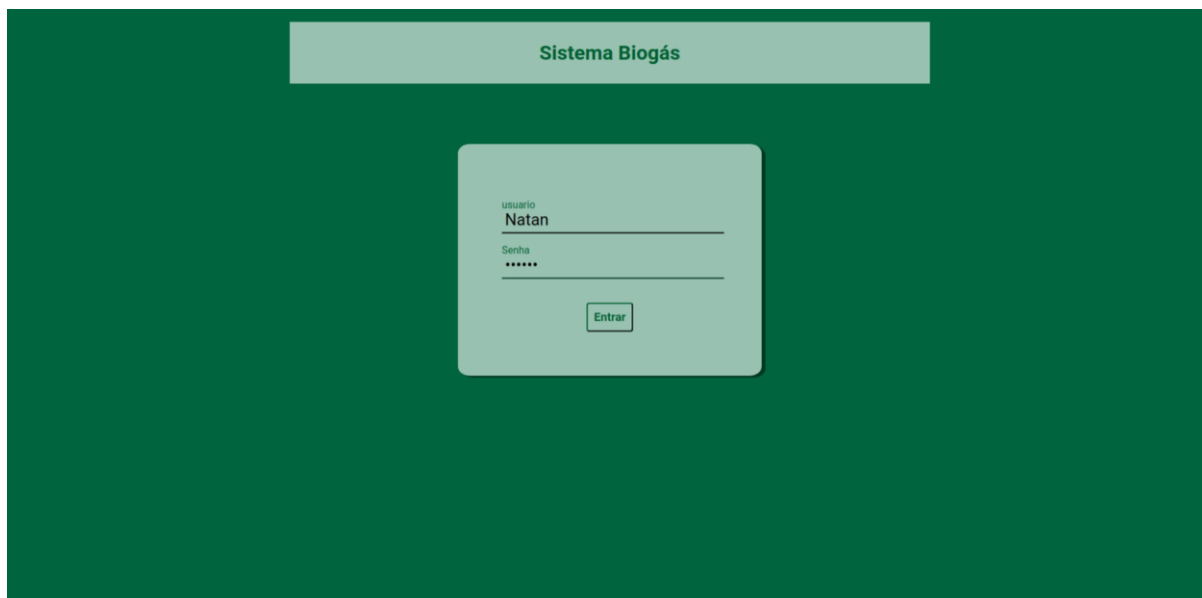


Após os passos anteriores, ao clicar na opção **“Gerar relatório”**, automaticamente ocorrerá o *Download* com o nome **“Relatório”**, o qual poderá ser visualizado.

DESTINAÇÃO AMBIENTALMENTE ADEQUADA													
RSU		Metano Conservador		Metano Recomendado		Dióxido Conservador		Dióxido Recomendado		Biogás		Metano (NM)	
ano	quantidade	ano	quantidade	ano	quantidade	ano	quantidade	ano	quantidade	ano	quantidade	ano	quantidade
2001	591,87	2001	1,538605	2001	2,307907	2001	38,46511	2001	57,69767	2001	4088,975	2001	1946,489
2002	32228,75	2002	85,1092	2002	127,6638	2002	2127,73	2002	3191,595	2002	226185,1	2002	107671,6
2003	272548	2003	781,9948	2003	1172,992	2003	19549,87	2003	29324,81	2003	2078219	2003	989301,7
2004	385744	2004	1678,149	2004	2517,224	2004	41953,74	2004	62930,6	2004	4459828	2004	2122027
2005	460781,8	2005	2648,68	2005	3973,019	2005	66216,99	2005	99325,48	2005	7039096	2005	3350845
2006	586986,1	2006	3818,251	2006	5727,376	2006	95456,27	2006	143184,4	2006	10147333	2006	4830469
2007	664583,5	2007	5035,13	2007	7552,695	2007	125878,2	2007	188817,4	2007	13381294	2007	6369943
2008	712839,5	2008	6218,658	2008	9327,987	2008	155466,4	2008	233199,7	2008	16526623	2008	7867224
2009	756899,3	2009	7364,472	2009	11046,71	2009	184111,8	2009	276167,7	2009	19571723	2009	9316793
2010	940489	2010	8842,173	2010	13263,26	2010	221054,3	2010	331581,5	2010	23498842	2010	11186233
2011	1055449	2011	10429,52	2011	15644,28	2011	260738	2011	391106,9	2011	27717350	2011	13194383
2012	1025060	2012	11735,78	2012	17603,67	2012	293394,4	2012	440091,7	2012	31188848	2012	14846932
2013	1192027	2013	13314,52	2013	19971,78	2013	332863	2013	499294,5	2013	35384495	2013	16844200
2014	1215742	2014	14757,47	2014	22136,2	2014	368936,7	2014	553405	2014	39219250	2014	18669672
2015	1195274	2015	15970,12	2015	23955,17	2015	399252,9	2015	598879,3	2015	42441968	2015	20203793
2016	1149634	2016	16919,84	2016	25379,75	2016	422995,9	2016	634493,8	2016	44665932	2016	21405284
2017	1091763	2017	17611,47	2017	26417,2	2017	440286,6	2017	660429,9	2017	46803998	2017	22280265
2018	1166318	2018	18424,59	2018	27636,89	2018	460614,8	2018	690922,1	2018	48964948	2018	23308949
2019	1217757	2019	19282,04	2019	28923,06	2019	482051,1	2019	723076,6	2019	51243704	2019	24393713
2020	1164573	2020	19905,64	2020	29858,46	2020	497641	2020	746461,5	2020	52900964	2020	25182624
2021	1141227	2021	20404,84	2021	30607,26	2021	510121	2021	765181,5	2021	54227637	2021	25814164
		2022	17890,09	2022	26835,14	2022	447252,3	2022	670878,5	2022	47544475	2022	22632756
		2023	15738,96	2023	23608,45	2023	393474,1	2023	590211,1	2023	41827662	2023	19911363
		2024	13894,47	2024	20841,71	2024	347361,8	2024	521042,7	2024	36925765	2024	17577896
		2025	12308,91	2025	18463,37	2025	307722,8	2025	461584,2	2025	32712003	2025	15572005
		2026	10942,32	2026	16413,48	2026	273558	2026	410337	2026	29080162	2026	13843128
		2027	9761,182	2027	14641,77	2027	244029,6	2027	366044,3	2027	25941190	2027	12348872
		2028	8737,386	2028	13106,08	2028	218434,6	2028	327652	2028	23220361	2028	11053666
		2029	7847,313	2029	11770,97	2029	196182,8	2029	294274,3	2029	20854917	2029	9927636
		2030	7071,114	2030	10606,67	2030	176777,8	2030	265166,8	2030	18792099	2030	8945666

4 - ATUALIZAÇÕES

Apenas os usuários com uma conta registrada, junto ao Software “**EstimaGas**”, poderão registrar os dados.



Sistema Biogás

usuario
Natan

Senha

Entrar

ANEXO III – Relatório técnico de dados das projeções de metano



RELATÓRIO TÉCNICO DAS PROJEÇÕES DE METANO NO ATERRO SANITÁRIO
DA CENTRAL DE RESÍDUOS DO RECREIO EM MINAS DO LEÃO/RS
GERENCIADO PELA EMPRESA CRVR NO PERÍODO de 2001 a 2021

Março, 2023

SUMÁRIO

1 - FICHA DO PRODUTO TÉCNICO.....	133
1.1 DESCRIÇÃO DA FINALIDADE.....	133
1.2 AUTORIAS.....	133
1.3 INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES.....	133
2 – PLANILHA DE DADOS	134
2.1 PROJEÇÕES TOTAIS POR CENÁRIO.....	134
2.2 PROJEÇÕES POR ÍNDICE E TIPO DE RESÍDUO.....	135
2.3 PROJEÇÕES DE GASES ATÉ 2030.....	135

1 - FICHA TÉCNICA DO PRODUTO TÉCNICO

1.1 Descrição da finalidade do relatório:

Uso de um relatório técnico contextualizando dados da atividade de aterro sanitário que foram calculados projetando os valores de gases de efeito estufa voltados ao planejamento e conclusão dos resultados das estimativas de metano.

1.2 Avanços tecnológicos/grau de novidade:

Os resultados deste trabalho possuem relevância e grau de novidade diante da relevância do objeto a aterros sanitários e aos resultados de metano para aplicação do conhecimento produzido.

(X) Produção com médio teor inovativo: Combinação de conhecimentos pré estabelecidos.

1.3 Autorias:

Docentes:

Dr. Marc François Richter, orientador e professor permanente do PPGAS/UERGS; e Dra. Daniela Mueller de Lara, coorientadora e professora colaboradora do PPGAS/UERGS.

Discente:

Mestrando Ricardo de Carly Luz Andreazza, Mestrado profissional em Ambiente e Sustentabilidade (PPGAS/UERGS).

Conexão com a Pesquisa:

Projeto de Pesquisa vinculado à produção: Caracterização quali-quantitativa do Gás Metano.

Linha de Pesquisa vinculada à produção: Tecnologias Sustentáveis para o Desenvolvimento.

2 - PLANILHA DE DADOS

2.1 PROJEÇÕES TOTAIS POR CENÁRIO

Ano	CH ₄ (t)		CO _{2e} (t)		CH ₄ (Nm ³)		Biogás (Nm ³)
	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 1	Cenário 2	
2001	2	2	58	38	2.530	2.530	3.542
2002	128	85	3.192	2.128	161.933	107.534	226.730
2003	1.173	782	29.325	19.550	1.483.962	989.308	2.077.776
2004	2.517	1.678	62.931	41.954	3.184.257	2.122.838	4.458.450
2005	3.973	2.649	99.325	66.217	5.026.242	3.351.250	7.037.514
2006	5.727	3.818	143.184	95.456	7.245.228	4.830.152	10.144.436
2007	7.553	5.035	188.817	125.878	9.555.300	6.369.779	13.378.894
2008	9.328	6.219	233.200	155.466	11.800.853	7.867.657	16.523.014
2009	11.047	7.364	276.168	184.112	13.975.560	9.316.196	19.567.939
2010	13.263	8.842	331.581	221.054	16.779.021	11.186.014	23.493.218
2011	15.644	10.430	391.107	260.738	19.791.224	13.194.993	27.710.767
2012	17.604	11.736	440.092	293.394	22.270.820	14.847.214	31.182.584
2013	19.972	13.315	499.295	332.863	25.266.577	16.844.807	35.377.106
2014	22.136	14.757	553.405	368.937	28.004.254	18.669.081	39.210.275
2015	23.955	15.970	598.879	399.253	30.305.471	20.203.647	42.432.334
2016	25.380	16.920	634.494	422.996	32.108.238	21.405.492	44.956.487
2017	26.417	17.611	660.430	440.287	33.420.147	22.279.676	46.763.361
2018	27.637	18.425	690.922	460.615	34.963.569	23.309.468	48.954.390
2019	28.923	19.282	723.077	482.051	36.590.487	24.393.658	51.323.327
2020	29.858	19.906	746.461	497.641	37.773.356	25.183.081	52.888.525
2021	30.607	20.405	765.182	510.121	38.720.916	25.814.366	54.215.256
Total	322.844	215.231	8.071.125	5.380.749	408.429.944	272.288.738	571.925.925

2.2 PROJEÇÕES POR ÍNDICE E TIPO DE RESÍDUO

Ano	CH ₄ (t): Alimentos		CH ₄ (t): Jardins/ Rejeitos		CH ₄ (t): Papéis		CH ₄ (t): Têxteis		CH ₄ (t): Madeira e derivados	
	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 1	Cenário 2
2001	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0,03
2002	84	56	20	13	18	12	3	2	3	2
2003	774	516	182	122	165	110	27	18	24	16
2004	1.639	1.093	398	265	366	244	61	41	53	35
2005	2.552	1.702	638	426	596	397	100	67	86	57
2006	3.637	2.425	932	621	881	587	150	100	128	85
2007	4.739	3.159	1.245	830	1.192	795	205	136	173	115
2008	5.779	3.853	1.557	1.038	1.511	1.007	262	175	219	146
2009	6.758	4.505	1.865	1.244	1.836	1.224	322	215	266	177
2010	8.045	5.363	2.256	1.504	2.242	1.494	397	265	324	216
2011	9.411	6.274	2.678	1.786	2.686	1.791	479	320	389	259
2012	10.469	6.979	3.043	2.028	3.089	2.059	557	371	447	298
2013	11.779	7.852	3.473	2.315	3.558	2.372	647	431	515	343
2014	12.929	8.619	3.876	2.584	4.014	2.676	736	491	581	387
2015	13.831	9.221	4.229	2.819	4.432	2.954	822	548	641	428
2016	14.464	9.643	4.521	3.014	4.800	3.200	900	600	695	463
2017	14.840	9.893	4.750	3.167	5.116	3.411	971	647	740	494
2018	15.345	10.230	5.002	3.335	5.454	3.636	1.047	698	789	526
2019	15.898	10.599	5.261	3.508	5.800	3.867	1.124	750	839	560
2020	16.220	10.813	5.464	3.643	6.097	4.065	1.195	797	882	588
2021	16.428	10.952	5.633	3.755	6.364	4.243	1.262	841	921	614
Total	185.623	123.748	57.023	38.017	60.217	40.144	11.267	7.513	8.715	5.812

2.3 PROJEÇÕES DE GASES ATÉ 2030

Ano	CH ₄ (t)		CO _{2e} (t)		CH ₄ (Nm ³)		Biogás (Nm ³)
	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 1	Cenário 2	
2022	26.835	17.890	670.878	447.252	33.948.959	22.632.639	47.533.779
2023	23.608	15.739	590.211	393.474	29.866.481	19.911.409	41.817.681
2024	20.842	13.894	521.043	347.362	26.367.214	17.577.299	36.918.167
2025	18.463	12.309	461.584	307.723	23.357.541	15.572.116	32.704.161
2026	16.413	10.942	410.337	273.558	20.764.086	13.842.724	29.072.924
2027	14.642	9.761	366.044	244.030	18.523.594	12.348.641	25.935.889
2028	13.106	8.737	327.652	218.435	16.580.401	11.053.179	23.215.118
2029	11.771	7.847	294.274	196.183	14.891.492	9.927.240	20.850.386
2030	10.607	7.071	265.167	176.778	13.418.916	8.945.522	18.788.552
Total	156.287	104.190	3.907.190	2.604.795	197.718.684	131.810.769	276.836.657