

Relatório Técnico

 **ESTIMAGÁS**



GOVERNO DO ESTADO
RIO GRANDE DO SUL
SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE
E INFRAESTRUTURA

Eduardo Leite

Governador do Rio Grande do Sul

Gabriel Souza

Vice-governador do Rio Grande do Sul

Artur Lemos

Secretário-chefe da Casa Civil

Marjorie Kauffmann

Secretária do Meio Ambiente
e Infraestrutura

Marcelo Camardelli

Secretário adjunto do Meio Ambiente
e Infraestrutura

Esta publicação busca contextualizar a atividade de aterro sanitário e os dados de gases de efeito estufa descritos em um relatório técnico para o planejamento das estimativas de metano no Estado do Rio Grande do Sul.

Elaborado pela Assessoria do Clima/

Secretaria do Meio Ambiente e

Infraestrutura do Rio Grande do Sul

com colaboração do Programa de

Pós-Graduação em Ambiente e

Sustentabilidade da Universidade Estadual
do Rio Grande do Sul (PPGAS/UERGS).

Daniela Mueller de Lara, coordenadora.

Diogo Fernando Heck, assessor técnico.

Ricardo De Carly Luz Andreazza,

assessor técnico e ex-discente do

Mestrado Profissional em Ambiente e

Sustentabilidade da UERGS.

Elaborado em novembro de 2024.
Revisão 001/2024.

Este documento poderá ser atualizado
sempre que necessário.

Organizadores:

Daniela Mueller de Lara, coordenadora
Assessoria do Clima (SEMA)

Diogo Fernando Heck, assessor técnico
Assessoria do Clima (SEMA)

Marc François Richter – Professor no
Programa de Pós-Graduação em Ambiente e
Sustentabilidade (PPGAS/UERGS).

Ricardo De Carly Luz Andreazza, assessor
técnico – Assessoria do Clima (SEMA), ex-
discente do Programa de Pós-Graduação em
Ambiente e Sustentabilidade (PPGAS/UERGS).

Título:

Relatório Técnico de gás metano produzido em
Aterro Sanitário no Estado do Rio Grande do Sul.

*Todos os direitos reservados.

1. ed. 2024 – Assessoria do Clima/Secretaria do Meio
Ambiente e Infraestrutura do Rio Grande do Sul.
E-book – PDF – 32 p.

Sinopse:

Esta publicação busca orientar os usuários
para o uso do Relatório Técnico de gás metano
produzido em Aterro Sanitário no Estado do Rio
Grande do Sul.

ISBN 978-85-60231-83-6



Ficha Técnica do Produto Técnico

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.

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.

Autoria:

Dr. Marc François Richter, orientador e professor permanente do Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Sustentabilidade (PPGAS) – Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (Uergs);

Dra. Daniela Mueller de Lara, coorientadora e professora permanente do Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Sustentabilidade (PPGAS) – Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (Uergs);

Me. Ricardo de Carly Luz Andreazza, egresso do Mestrado profissional em Ambiente e Sustentabilidade (PPGAS/UERGS), e Assessoria do Clima (AsClima) da Secretaria do Meio Ambiente do RS (SEMA-RS).

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.



Índice

1. Introdução e contexto.....	7
2. Gás metano em Aterro Sanitário.....	8
3. Queima e captura de Metano: Case do Aterro Sanitário da Central de Resíduos do Recreio.....	9
4. Produção de Gases de Efeito Estufa.....	11
4.1 Metano (CH ₄)	11
4.2 Dióxido de Carbono equivalente (CO ₂ e)	14
4.3 Gases Estufa até 2030	17
5. Produção por índice de Tipo de Resíduo	19
5.1 Resíduos de Alimentos	20
5.2 Resíduos de Papéis	20

Índice

5.3 Resíduos de Jardins	21
5.4 Resíduos de Têxteis	22
5.5 Resíduos de Madeira	23
6. Produção de Biogás	24
7. Considerações Finais	27
ANEXOS	28
Anexo I: Total por Cenário.....	28
Anexo II: Total por índice e tipo de resíduo	29
Anexo III: Projeções de Gases até 2030	30
REFERÊNCIAS	30

1. Introdução e contexto

A Assessoria do Clima da Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura (SEMA) do Estado do Rio Grande do Sul (RS) foi estabelecida em fevereiro de 2023, em resposta à crescente preocupação global com as mudanças climáticas e à necessidade de ações concretas para lidar com seus impactos.

Comprometido com acordos globais, o Estado do RS demonstra determinação em alcançar suas metas de resiliência climática, transição energética justa e redução das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) até 2050.

As estratégias do Estado para enfrentar as mudanças climáticas, desenvolvidas no âmbito do ProClima 2050, são baseadas nos seguintes pilares:

Resiliência Climática – foco no fortalecimento da resiliência do Estado às mudanças climáticas, incluindo o desenvolvimento de infraestruturas resilientes, planos de gestão de riscos e estratégias de adaptação para proteger as comunidades e os recursos locais dos impactos do clima.

Transição Energética Justa – reconhecimento da importância da transição para fontes de energia limpa e sustentável, promovendo a produção e o uso de energias renováveis, a eficiência energética e a criação de empregos verdes, garantindo que essa transição seja socialmente justa e inclusiva.

Redução das Emissões de Gases de Efeito Estufa – estabelecimento de compromissos para a redução significativa das emissões de GEE. A implementação de ações concretas, como a transição energética, a promoção de práticas agrícolas sustentáveis, o estímulo à pesquisa e o estabelecimento de regulamentações para controlar as emissões industriais são exemplos de medidas empenhadas na mitigação das emissões.

Educação Ambiental e Conscientização – reconhecimento da educação ambiental como uma ferramenta fundamental para informar e engajar a população sobre as mudanças climáticas, os impactos ambientais e as ações que cada indivíduo e comunidade podem tomar para contribuir com a mitigação e a adaptação. Essas estratégias refletem o compromisso do Estado do Rio Grande do Sul em enfrentar as mudanças climáticas de maneira eficaz e sustentável, alinhando – se com os objetivos globais de proteção ambiental e desenvolvimento sustentável.

2. Gás metano em Aterro Sanitário

O trabalho é consequência de uma dissertação de mestrado e, diante da relevância do software, resultou em uma parceria institucional entre PPGAS/UERGS, CRVR, FEPAM e SEMA – RS para o desenvolvimento pleno e apoio à criação de política pública do setor.

A qualificação e quantificação das informações obtidas foram oriundas do Aterro Sanitário Central de Resíduos do Recreio (CRR), com capacidade para receber 90.000 t/RSU por mês (conforme estabelecido na Licença de Operação 4268/2012 – DL). O Aterro CRR 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. Os poços centrais e a rede de drenos otimizam 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, que também possui um sistema de separação de fases líquido – gás para extração de líquidos condensados, sendo posteriormente submetidos à 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 termoeletrônica (empresa Biotérmica).

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; 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 °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 1 – 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 Locais de Disposição Final (SWDS) (Solid Waste Disposal) do Estado do RS.

3. Queima e captura de Metano: Case do 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. Submetida 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 para o primeiro pedido de validação de Redução Certificada de Emissão (RCE), em inglês, *Certified Emission Reductions (CER)*, conseguindo a permissão de obtenção dos créditos de carbono 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 primeiro período de crédito de 7 anos, de 2007 a 2013, apresenta uma média de

redução ao ano de 107.881 t/CO_{2e}, 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 com 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 referenciados, 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 segundo 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} 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 avaliação 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 CH₄ 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.

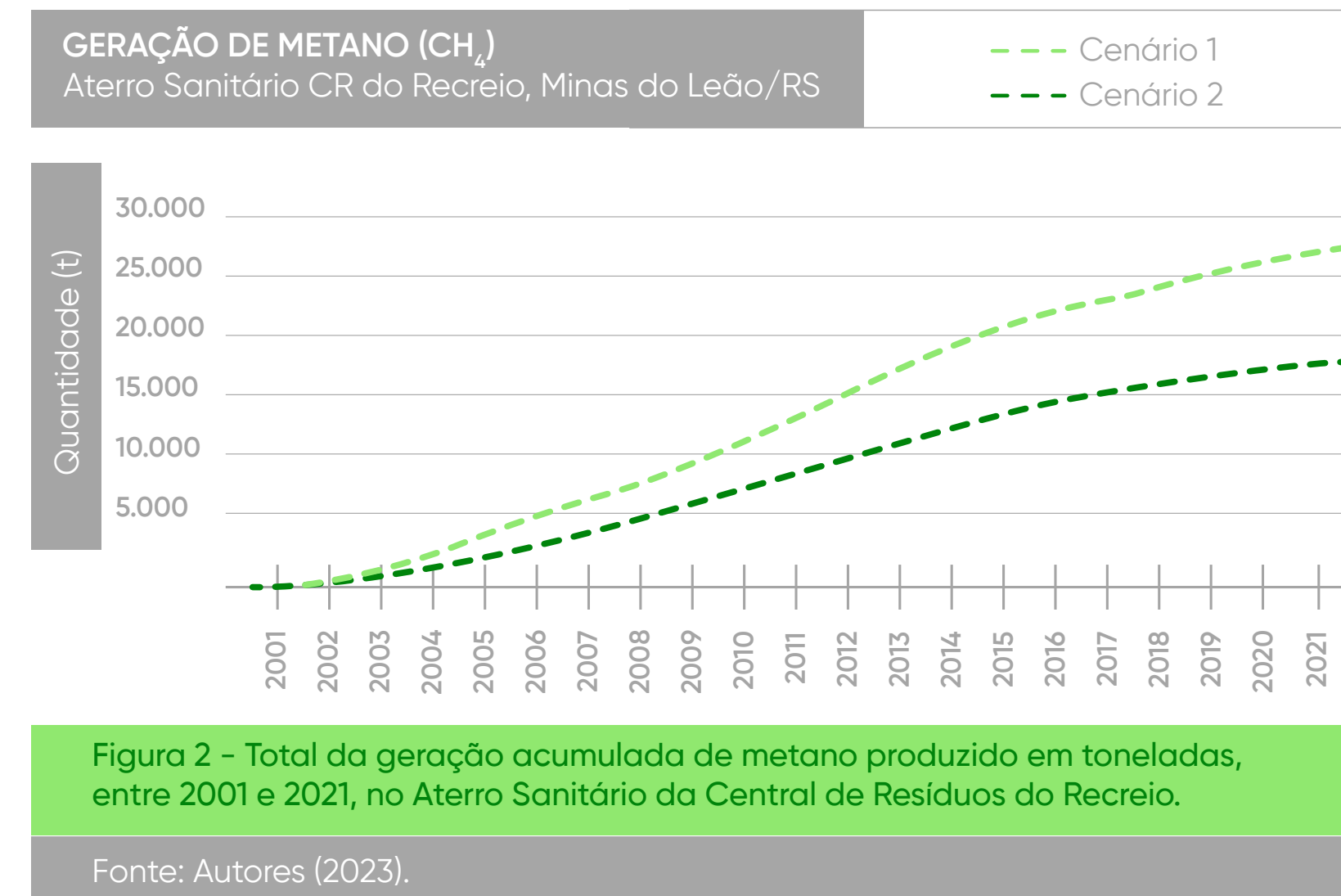


4. Produção de Gases de Efeito Estufa

4.1 Metano (CH₄)

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 CH₄ produzido no Aterro Sanitário Central de Resíduos do Recreio, no município de Minas do Leão, está ilustrada na Figura 2, 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 CH₄) e na Figura 12 (CH₄ gerado por cada tipo de resíduo) mencionam a representatividade de demais informações.



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 verde claro considerou o valor de $\phi_y = 0,75$ indicado pelo *CDM Tool 04*, classificado como valor Recomendado. O segundo cenário em cor verde escuro, 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 à 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 no 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

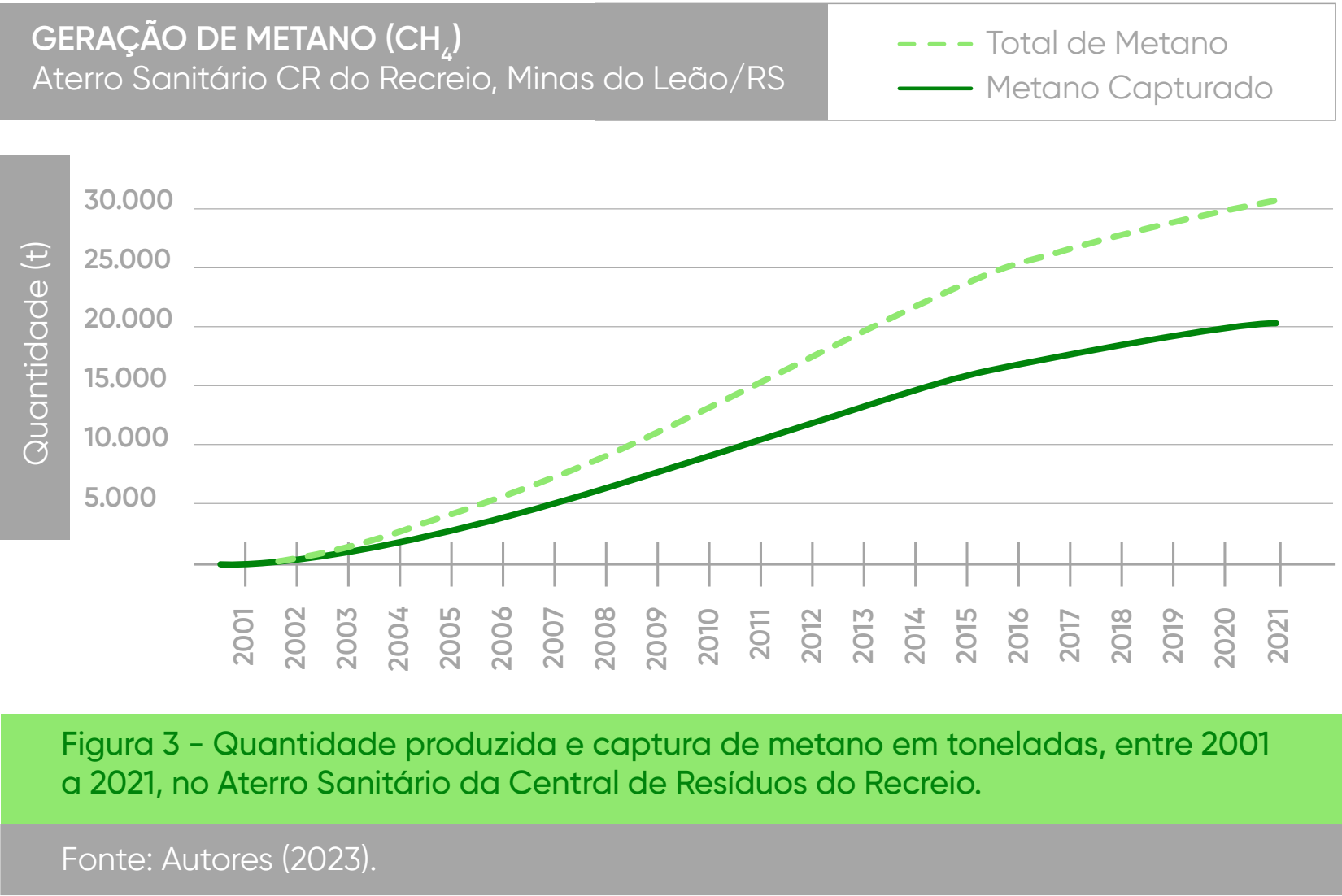
todo RSU de positado em aterro sanitário passa pelo decaimento de primeira ordem ao obter o estado gasoso e a sugestão de mitigação pela captura do metano contido no biogás.

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 à 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 RC pelo MDL. Ainda, uma parcela do aterro que gera biogás é queimada em campo, deixa de ser mensurada 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 do 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.



Observa-se a definição da potencial quantidade produzida de metano na cor tracejada em vermelho, e a quantidade capturada desse metano pelo aterro sanitário na cor verde, 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 (*Fração de metano capturado, evitando emissão para atmosfera no ano y*) = 33%, a equação reflete em 77% do metano capturado, acima do teor do metano presente no biogás, coletado pela empresa Biotérmica entre 2016 a 2021.

Quando disposta 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 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 4 apresenta os resultados para CO_{2e}, em toneladas estimadas entre 2001 e 2021, no mesmo local citado anteriormente. Foi utilizada a premissa do *Fator de Correção do Modelo (φy)*, com uso de φy = 0,75 para cenário 1 (recomendado) pelo *CDM Tool 04*, e o uso de φy = 0,50 para o cenário 2 (conservador) classificado pelo Autor.

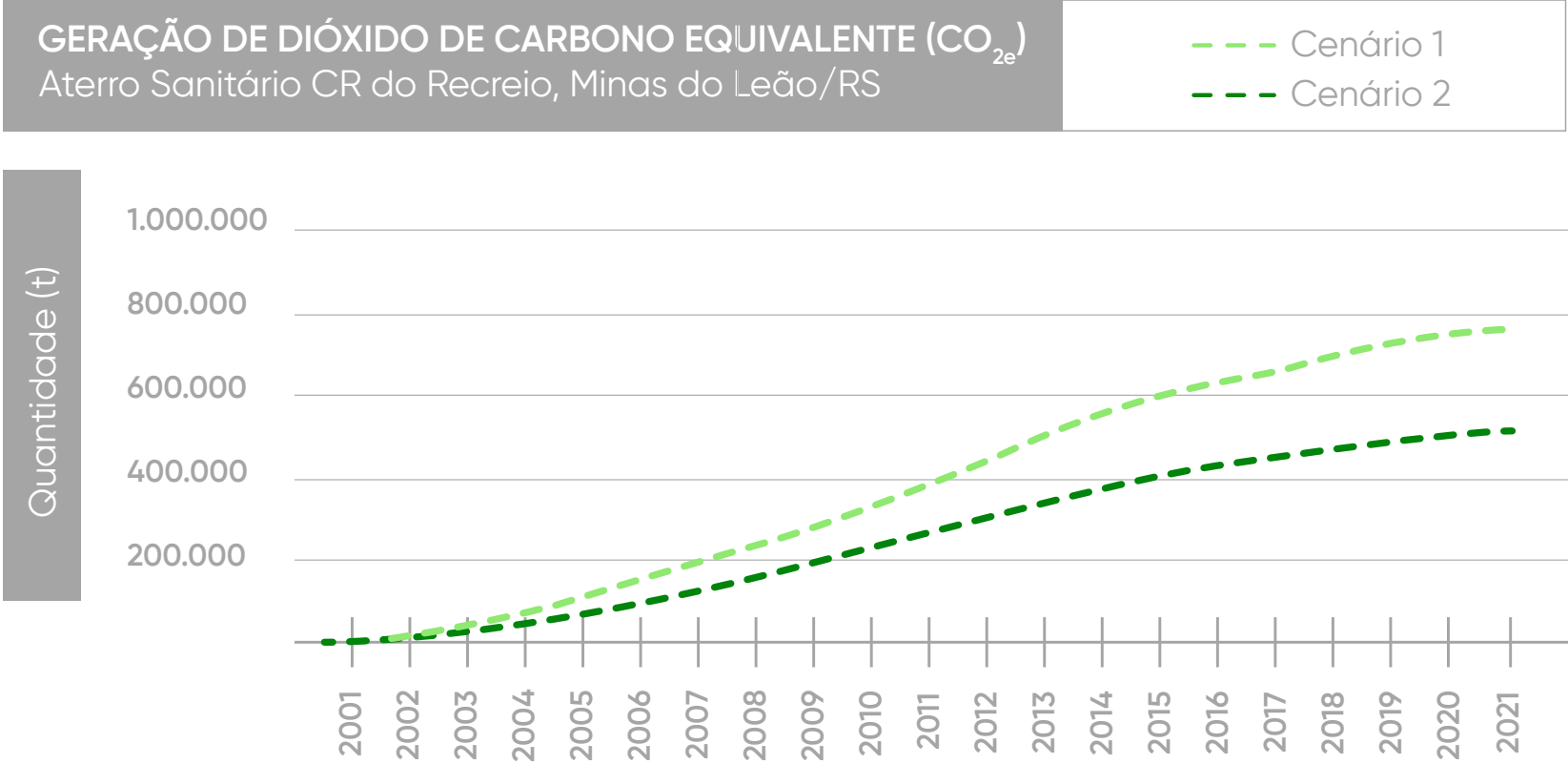


Figura 4 – Total de carbono equivalente (CO_{2e}) em toneladas, entre 2001 a 2021, no Aterro Sanitário da Central de Resíduos do Recreio.

Fonte: Autores (2023).

Observa-se para o ano de 2021 o total de 765.182 t/CO_{2e}/Ano com o parâmetro φy, 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}, que resultaram na diferença de 2.690.831 t/CO_{2e}, entre os dados apresentados.

Foram adotados os valores referenciais do parâmetro GWP (Global Warming Potential), 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 5, 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/>.

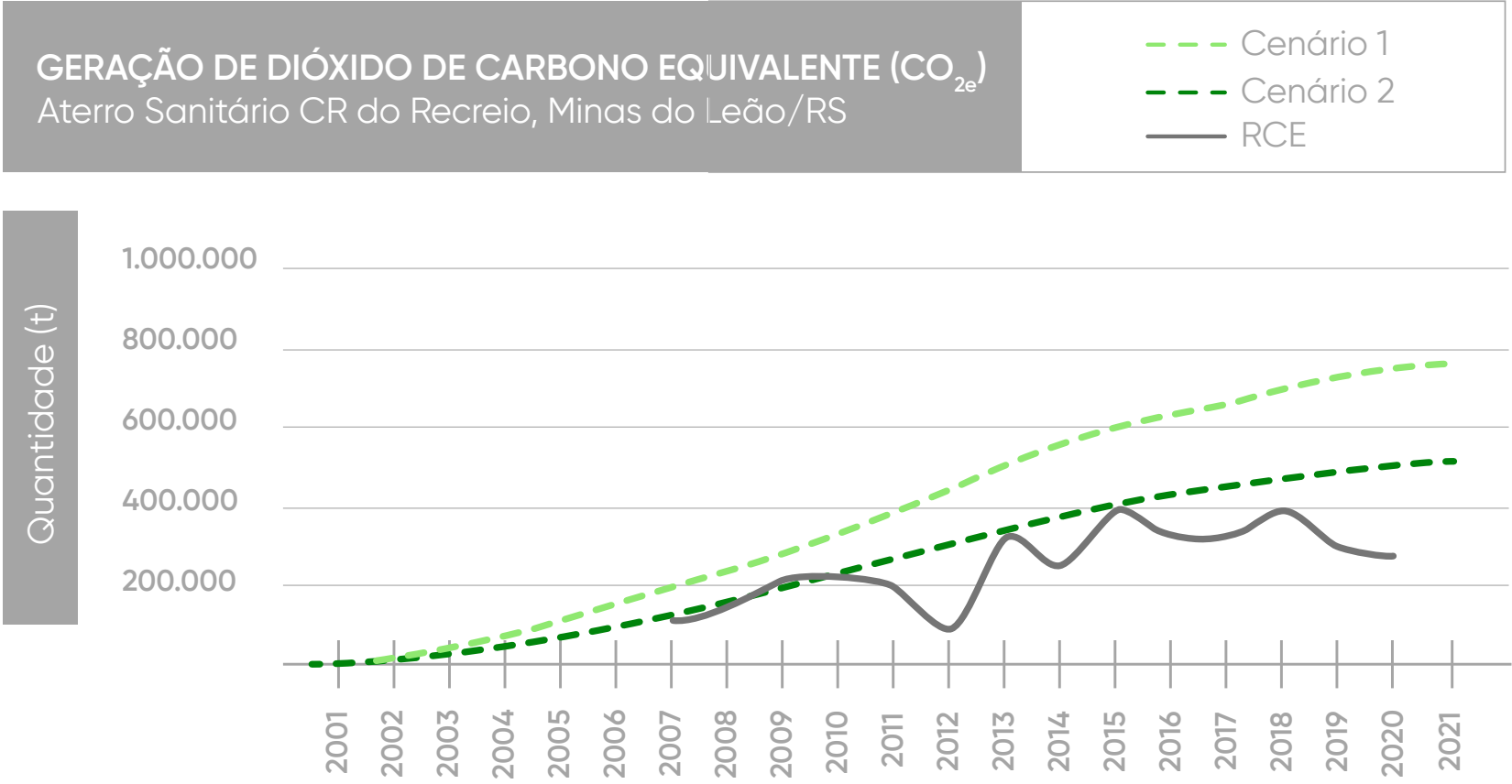


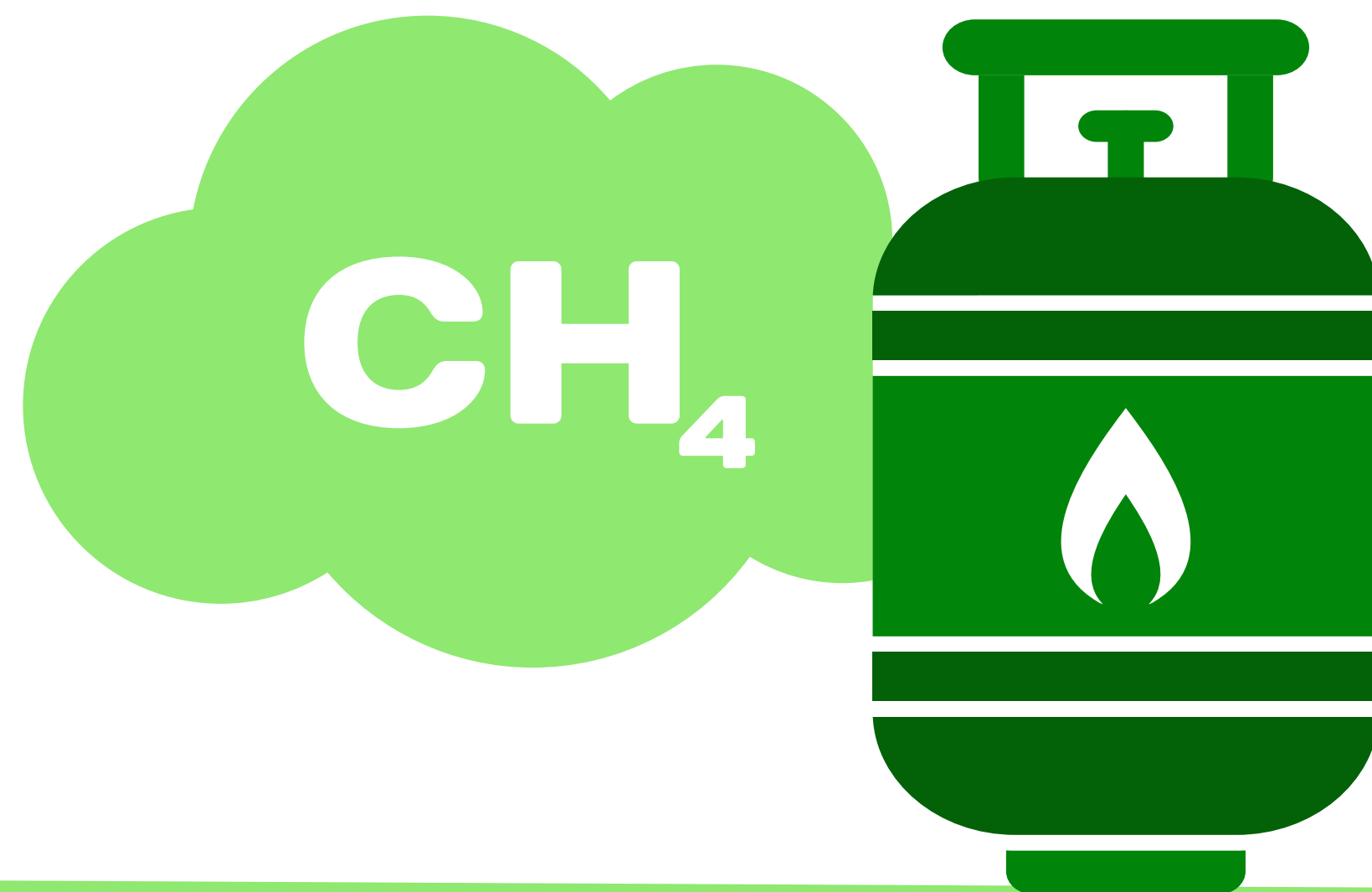
Figura 5 - Comparação da estimativa de CH₄ com as RCE's no Aterro Sanitário da Central de Resíduos do Recreio.

Fonte: Autores (2023).

A série histórica diante da linha na cor grafite 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 ciclo iniciado em 2007, obteve-se 106.610 t/CO_{2e}, enquanto em 2013, um aumento significativo para 317.385 t/CO_{2e}. Em 2015, foram 383.967 t/CO_{2e}. Neste segundo ciclo, houve uma queda em comparação ao ano de 2020, resultando em 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, pode agregar uma nova fonte de receita 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 verde escuro, 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.



Além das RCE's, existe uma parcela de CH₄ que não recebe certificado do MDL em razão do não cumprimento das exigências previstas para verificação, entre as quais o não atingimento da queima em temperatura mínima acima de 500 °C, é premissa para obter uma RCE, convertendo em CO_{2e} verificado.

O avanço gradual do aterro sanitário ocasiona instabilidade na captura do metano, mesmo que em pequenas proporções de gases, a partir de instalações de drenos verticais e conexão entre tubulações. Os gases são queimados, porém sem a obtenção das RCE's.

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, elevando a expectativa por parte de investidores e gestores, chegando ao fim do período sem ter atingido o valor previamente conhecido.

4.3 Gases Estufa até 2030

Além das estimativas durante o período de 2001 a 2021, a Figura 6 apresenta de forma hipotética a contar o recebimento dos RSU até 2021. Considerou-se o restante da década projetado aos ODS 2030 da ONU.

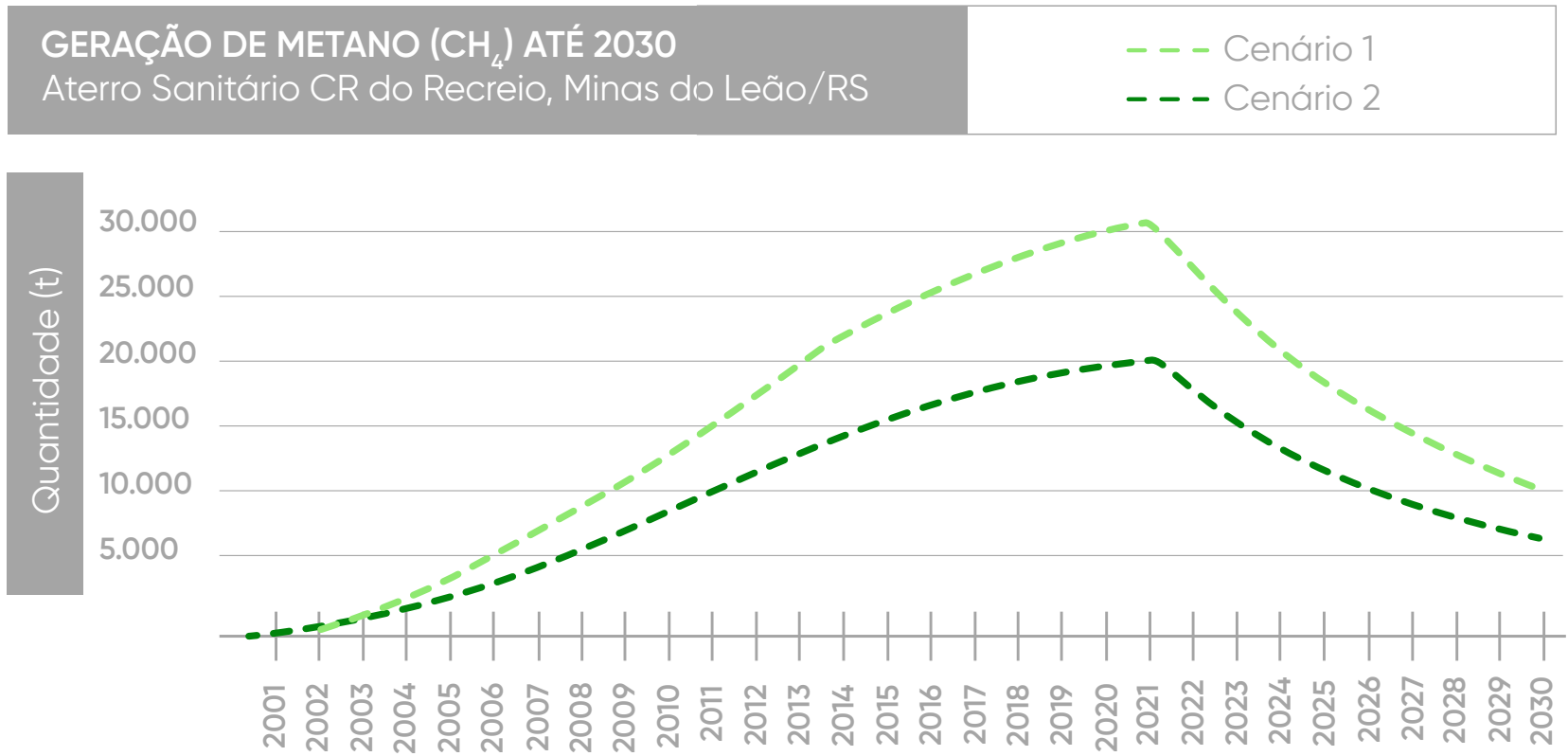


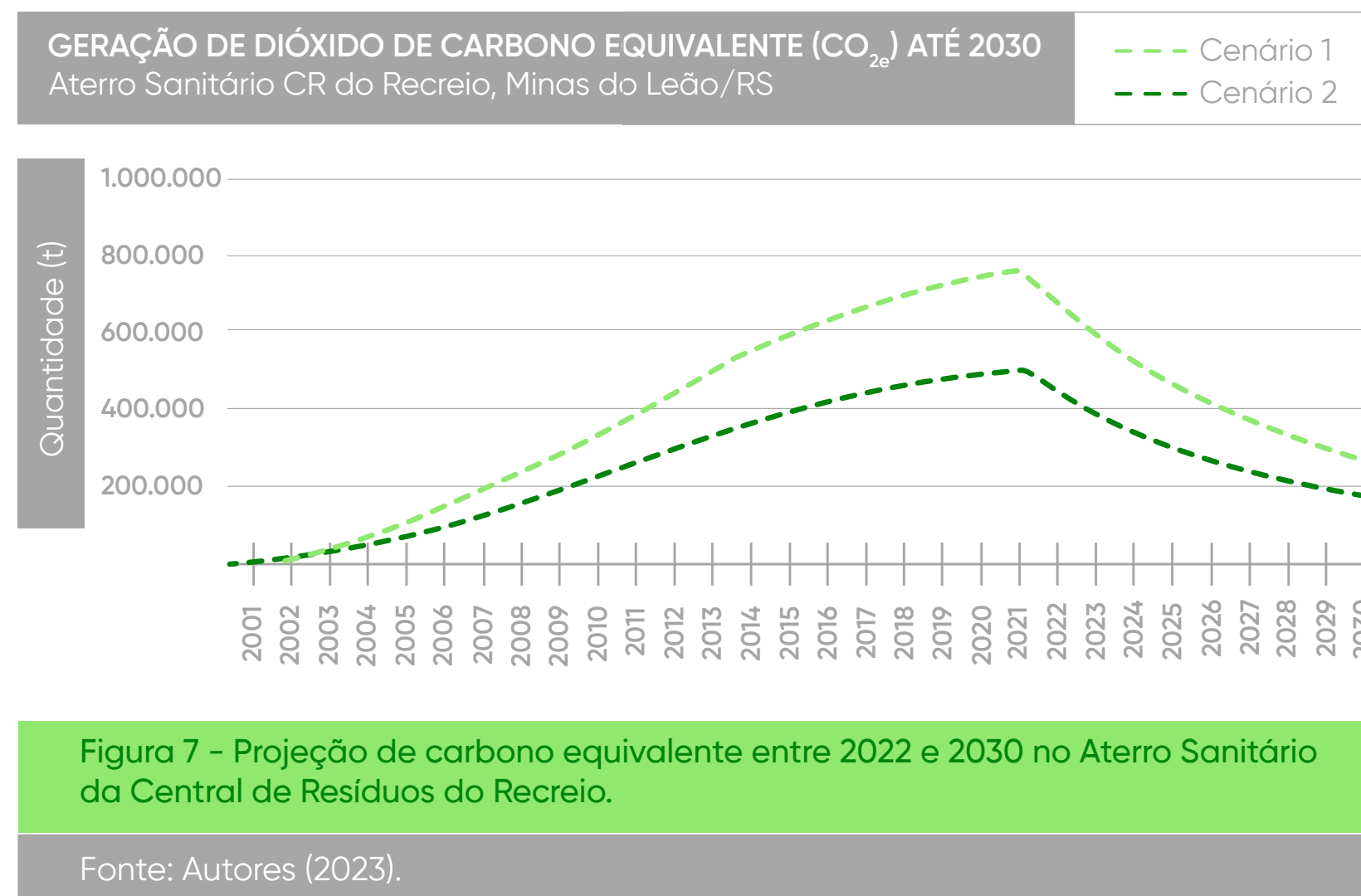
Figura 6 – Projeção de metano em toneladas entre 2022 e 2030 no Aterro Sanitário da Central de Resíduos do Recreio.

Fonte: Autores (2023).

A partir dos resíduos sólidos depositados no ano de 2001 até 2021, a cor tracejada verde claro representa total de 156.287 t/CH₄ e 104.190 t/CH₄ na cor tracejada verde escuro, 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) foi considerada novamente. Houve a média de 17.365 t/CH₄ e 11.577 t/CH₄, de acordo com cada um dos modelos.

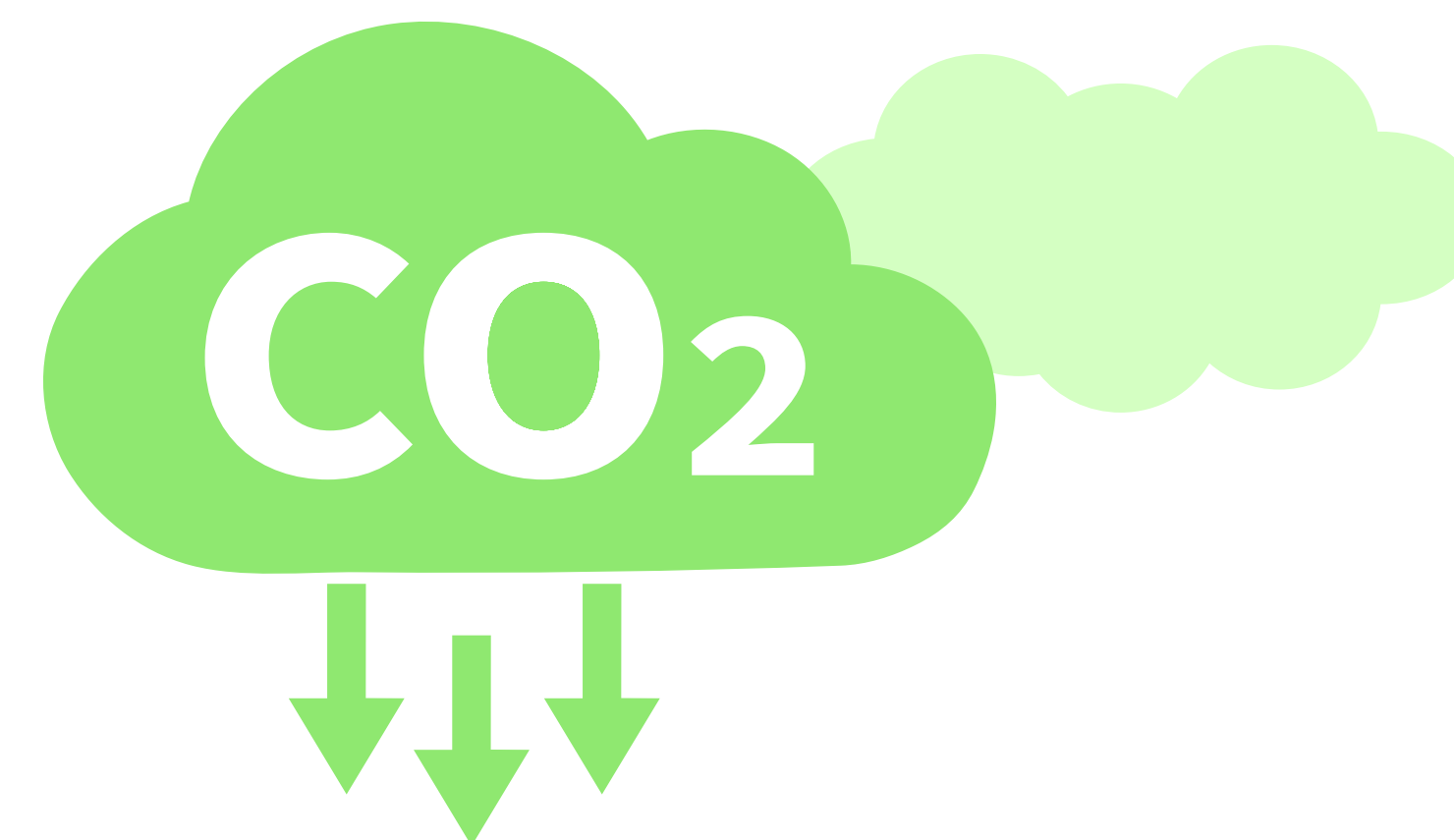
Observa-se para o ano de 2022 o total de 26.835 t/CH₄/Ano ao cenário 1. O resultado do cenário 2 resultou em 17.890 t/CH₄/Ano. A produção de CH₄ apresentou queda entre os anos de 2021 e 2022, com a redução de 3.772 t/CH₄ e 2.515 t/CH₄ em cada cenário.



Na mesma lógica da Figura 6, o gráfico acima (Figura 7) apresenta a projeção para a unidade CO_{2e}, com a mesma proporcionalidade. Observa-se a linha com tracejado verde claro 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 tracejada verde escuro, 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).



5. Produção por Índice de Tipo de Resíduo

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.

Considerando a estimativa atrelada a cada tipo de resíduo, em seis tipologias classificadas, gerou-se 231 valores retroativos (2001 - 2021) e 189 futuristas (2022 - 2030), resultando em 420 valores entre as células e colunas para cada estimativa

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 8).

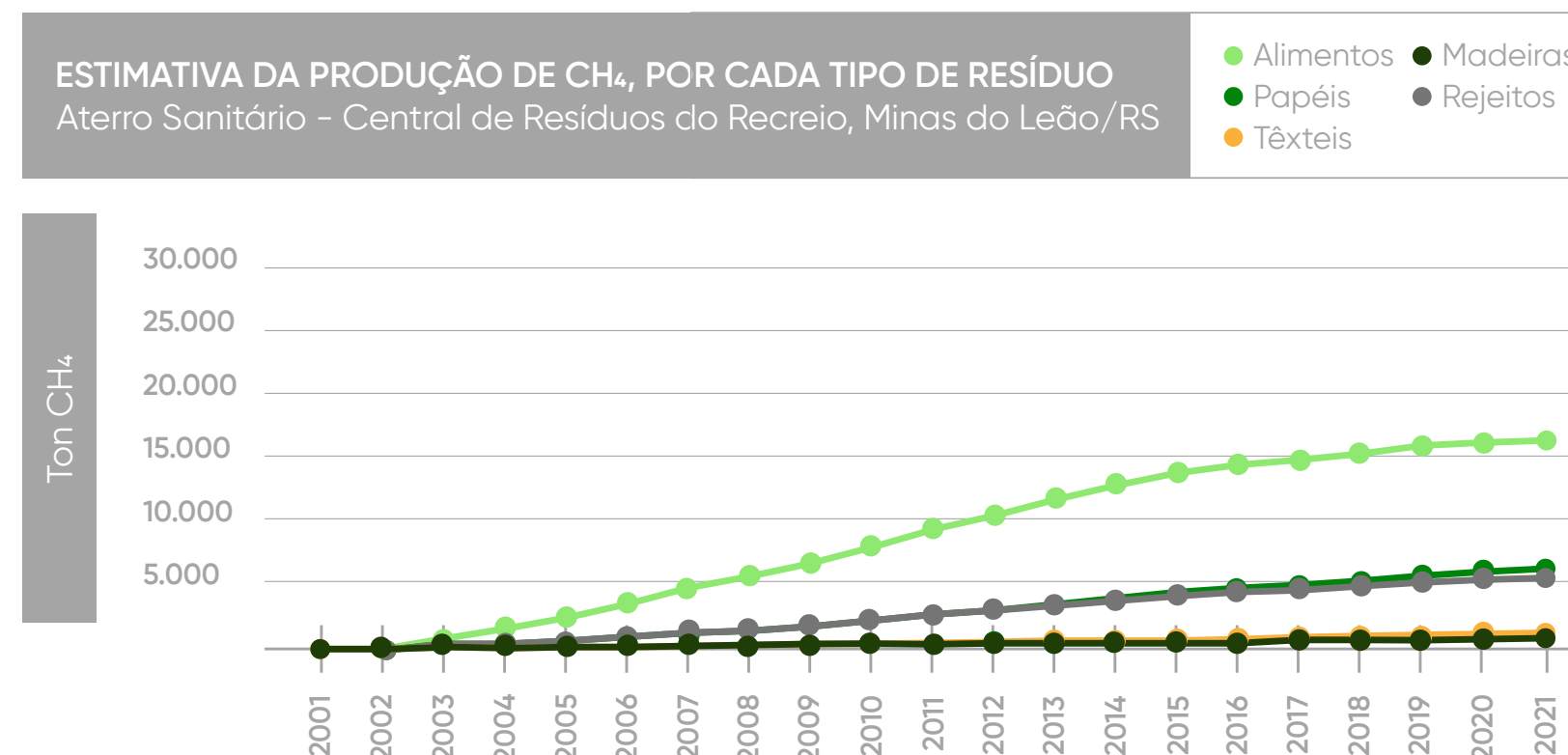


Figura 8 - Estimativa por Tipo de Resíduo (j) em toneladas, entre 2001 a 2021, disposto no aterro sanitário.

Fonte: Autores (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 verde claro para Alimentos, sendo resíduos orgânicos destinados ao aterro sanitário, seguido por Papéis em verde, Jardins/Rejeitos em cinza, Têxteis em laranja e por fim, Madeiras e derivados na cor verde escuro.

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 tracejada em verde claro e cenário 2 com a cor tracejada em verde escuro, o ano de 2021 gerou 16.428 t/CH₄ e 10.952 t/CH₄, respectivamente.

Entre os anos de 2001 e 2021 (Figura 9), 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.

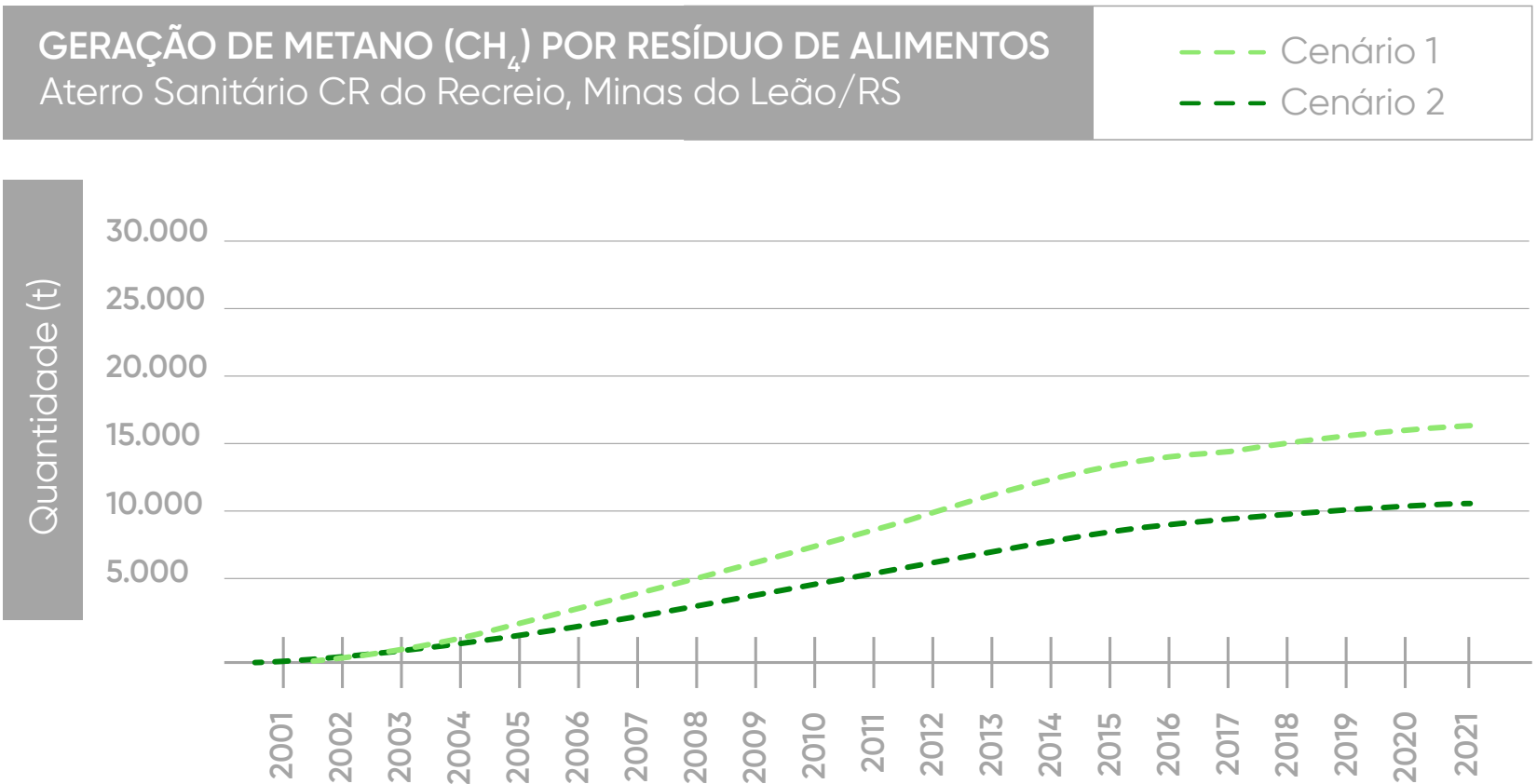


Figura 9 – Estimativa *j* de Alimentos em toneladas, entre 2001 a 2021, disposto no aterro sanitário.

Fonte: Autores (2023).

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 10). Levando em conta as premissas do cenário 1 com a cor tracejada em verde claro e do cenário 2 com a cor tracejada em verde escuro, 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 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, possui elevada presença na geração de resíduos sólidos domiciliares, além da alta significância de valorização 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.

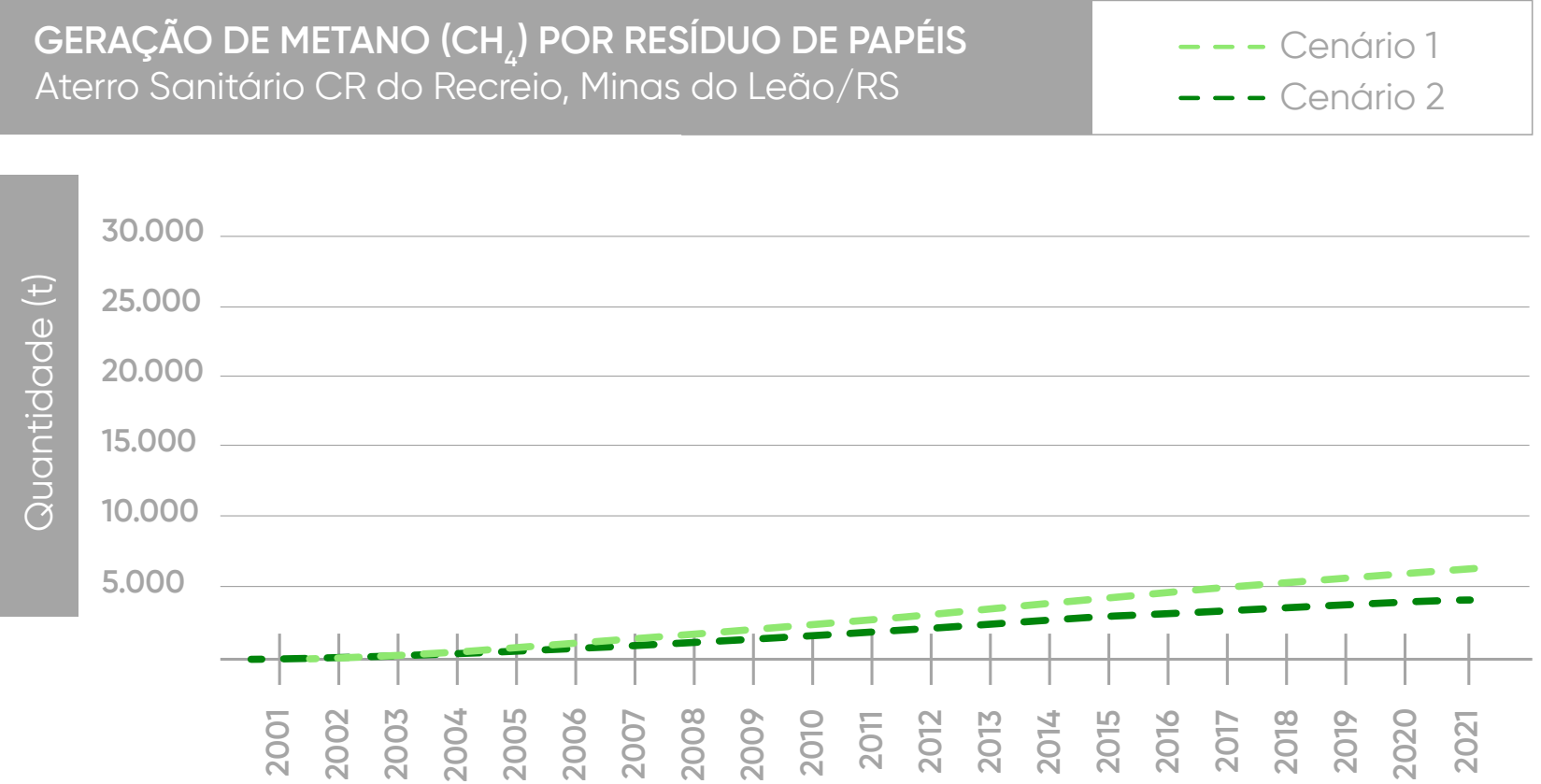


Figura 10 - Estimativa de *j* Papéis em toneladas, entre 2001 a 2021, disposto no aterro sanitário.

Fonte: Autores (2023).

5.3 Resíduos de Jardins

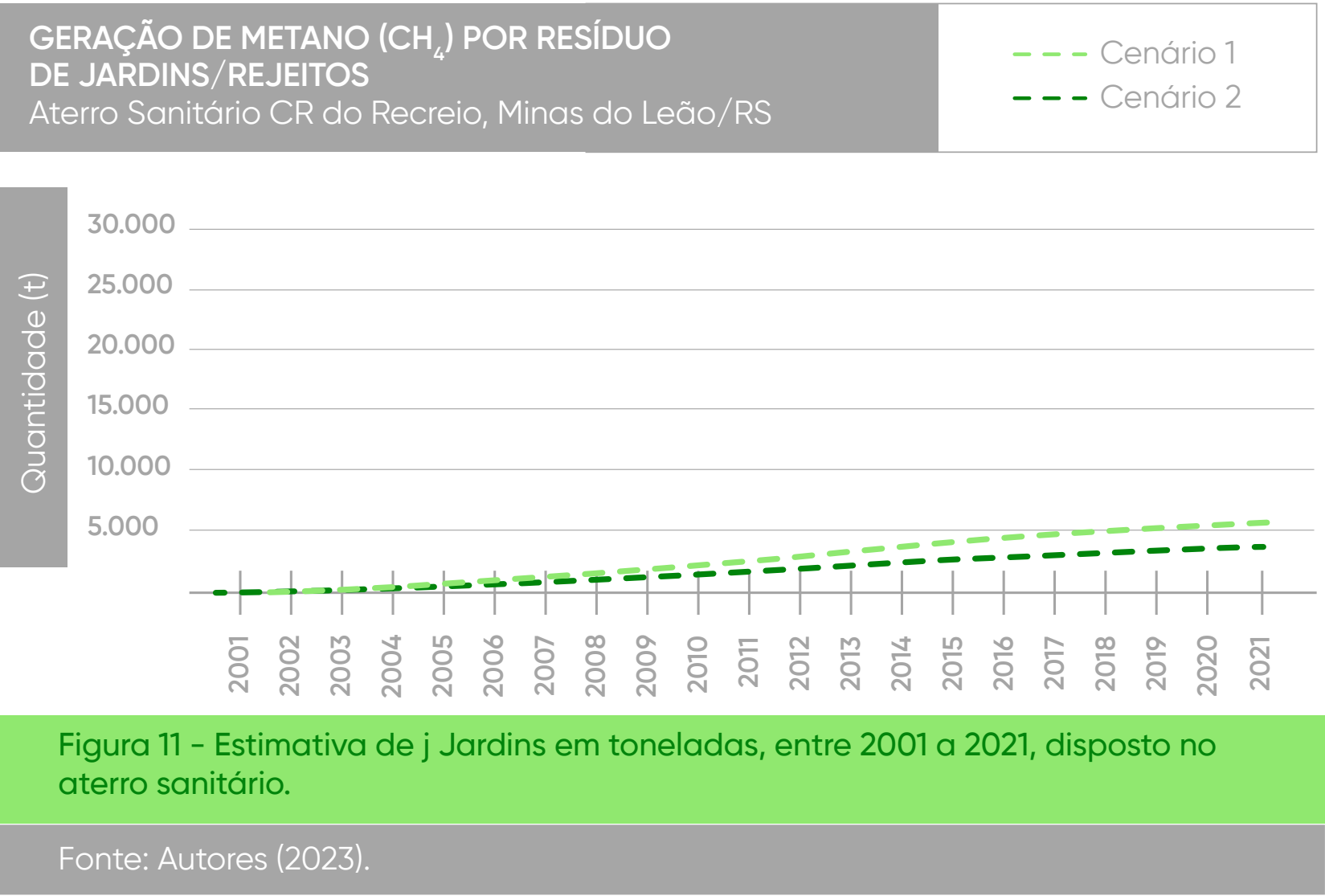
A estimativa gerada por fração *j* jardins correspondeu à terceira maior quantidade de metano.

Considerando as premissas anteriores, o cenário 1 na cor tracejada em verde claro gerou 5.633 t/CH₄, e no cenário 2 em cor tracejada em verde escuro foram gerados 3.755 t/CH₄. Segundo a Figura 11, 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 os 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.



5.4 Resíduos Têxteis

Observou-se na estimativa gerada por fração j Têxteis a segunda menor produção de metano. Considerando o ano de 2021, o cenário 1 com a cor tracejada em verde claro foram gerados 1.262 t/CH₄, e no cenário 2 com a cor tracejada em verde escuro 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 12 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.



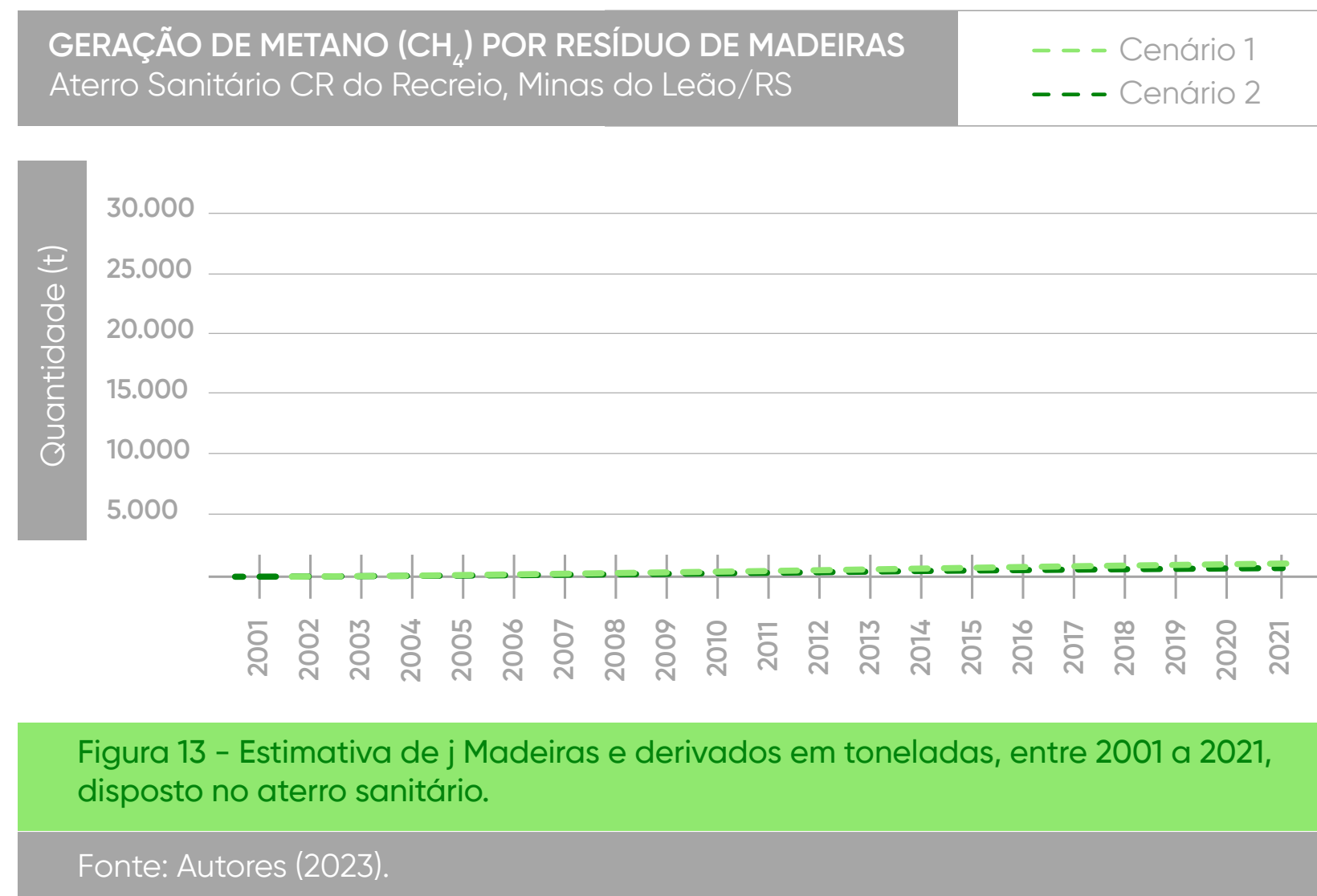
Figura 12 – Estimativa de j Têxteis em toneladas, entre 2001 a 2021, disposto no aterro sanitário.

Fonte: Autores (2023).

5.5 Resíduos de Madeira

A menor quantidade estimada de metano gerado por tipo de resíduo (*j*) é a fração Madeiras e derivados. Para o ano de 2021, no cenário 1 com a cor tracejada em verde claro, foram 8.15 t/CH₄, enquanto o cenário 2 com a cor tracejada em verde escuro gerou 5.809 t/CH₄, respectivamente. A Figura 13 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.



6. Produção de Biogás

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 (ϕy) aplicado na equação.

O primeiro cenário $\phi y = 0,75$, 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, $\phi y = 0,50$ 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 1.

Tabela 1 - 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	-

Ano	Cenário 1 Metano (t)	Cenário 2 Metano (t)	Cenário 1 Metano (Nm³)	Cenário 2 Metano (Nm³)	*Biotérmica Biogás (Nm³)
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: Autores (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 vista 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% ao longo dos anos. Já os valores do cenário 2 (Conservador), relacionados à presença do metano, estiveram na faixa 45–54%, oscilando menos do que o cenário 1 e, quando relacionados à quantidade de biogás disponibilizada pela Biotérmica, transmitiram maior aceitabilidade na comparação.

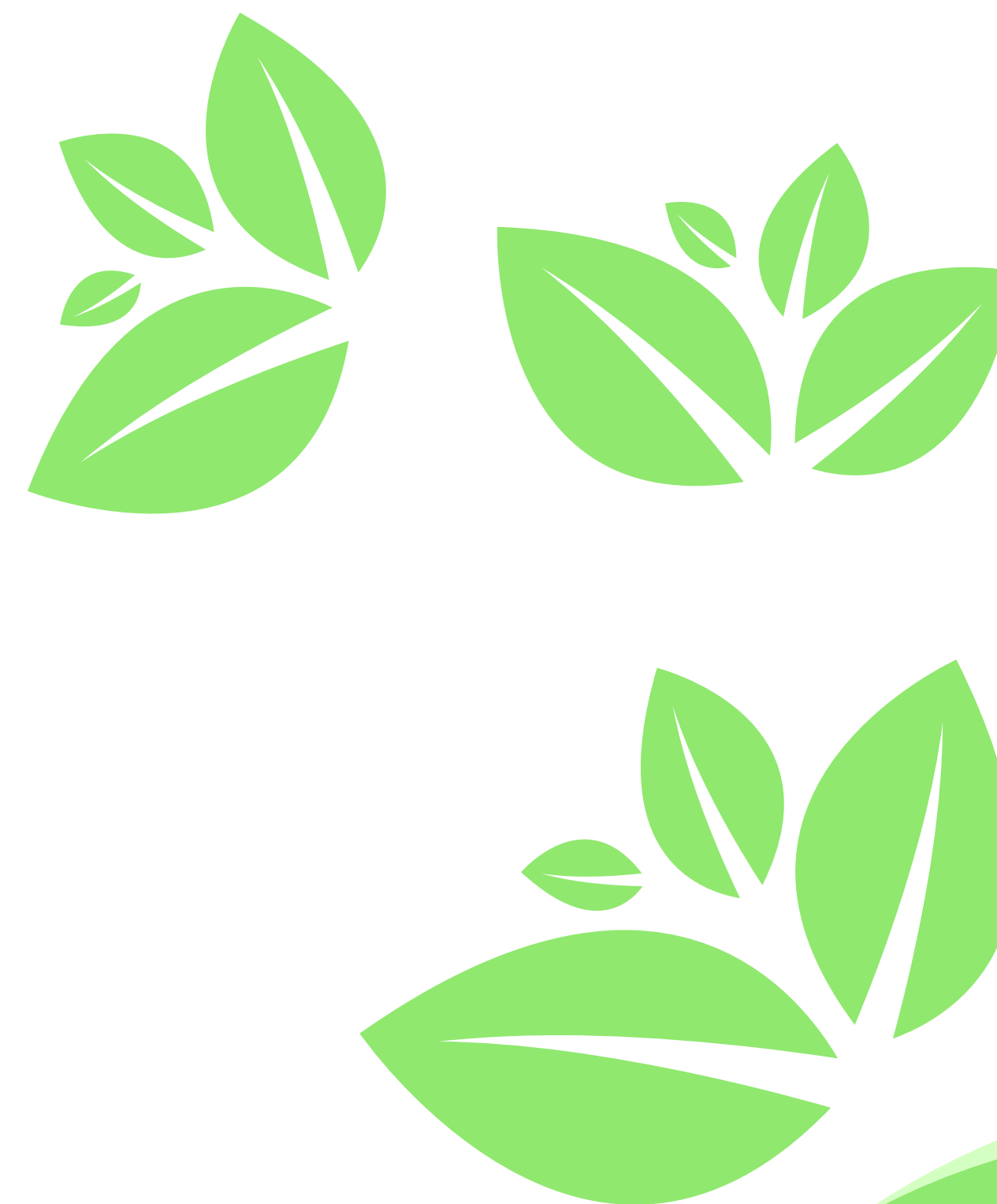
7. Considerações finais

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 ao 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 em frações de cada tipo de resíduos.

As conversões de metano (t) para metano (Nm^3) também apresentaram o cenário 2 com maior proximidade e consistência. A estimativa de metano (Nm^3) apresentou 45–54% de sua presença no Biogás comparado aos valores desenvolvidos pela empresa Biotérmica, que apresenta uma média de 52% de teor de CH_4 .

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.



Anexo I: Total 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

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	
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

Anexo II: Total 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): Madeiras 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

Anexo III: 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

Referências

ABRELPE (2021). 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.

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.

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.

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.

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_SEEG2022_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**, 12(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.



GOVERNO DO ESTADO
RIO GRANDE DO SUL
SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE
E INFRAESTRUTURA