Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS
LEGD Editora

PROJEÇÃO DO METANO (CH_4) GERADO EM ATERRO SANITÁRIO COM O USO DA METODOLOGIA ACM0001

Projection of methane (CH_4) generated in a lanfdill using the ACM0001 methodology

Proyección de metano (CH_4) generado em um vertedero utilizando la metodologia ACM0001

Ricardo de Carly Luz Andreazza
Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Sustentabilidade (PPGAS), Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (Uergs)
ricardoagrotecandreazza@gmail.com

Daniela Mueller de Lara
Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Sustentabilidade (PPGAS), Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (Uergs)
daniela-lara@uergs.edu.br

Marc François Richter
Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Sustentabilidade (PPGAS), Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (Uergs)
marc-richter@uergs.edu.br

Resumo: O estudo propôs realizar a estimativa do gás metano (CH_4) gerado nas condições previamente conhecidas pela atividade de aterro sanitário sendo este o aterro sanitário localizado no município de Minas do Leão – Rio Grande do Sul (RS), Brasil. Os resultados compostos apresentam 322.844 t/CH_4, e/ou 8.071.580 t/CO_{2e} acumulados no cenário recomendado, e 215.231 t/CH_4 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 CH_4 e CO_{2e} até o ano de 2030, consonante aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030, o CH_4 produzido por tipo de resíduos, além do CH_4 convertido para unidade volumétrica de Nm^3 para comparação com o biogás. Os valores indicaram que a fração de resíduos de alimentos é a maior produtora de CH_4. Via de regra, o metano em aterros sanitários varia de 45-60%. A presença de CH_4 no biogás pode oscilar entre 45-81% considerando os limites de cada cenário apresentado.

Palavras-chave: Resíduos Sólidos. Biogás. Gases de Efeito Estufa. CO_2 equivalente.

Abstract: The study proposed to carry out the estimation of the methane gas (CH_4) generated in the conditions previously known by the landfill activity being this one the landfill located in the municipality of Minas do Leão – RS, Brazil. The composite results present 322,844 t/ CH_4, and/or 8,071,580 t/CO_{2e} accumulated in the recommended scenario and 215,231 t/ CH_4 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 CH_4 and CO_{2e} up to 2030 consistent with the SDG 2030 agenda, CH_4 produced by type of waste in addition to CH_4 converted to volumetric unit of Nm^3 for comparison with biogas. The values indicated that the food waste fraction is the largest producer of CH_4. As a rule, methane in landfills ranges from 45-60%. The presence of CH_4 in biogas can range from 45-81% considering the limits of each scenario presented.

Keywords: Solid Waste. Biogas. Greenhouse gases. CO_2 equivalent.

Resumen: El estudio propuso realizar la estimación del gas metano (CH_4) generado en las condiciones previamente conocidas por la actividad del vertedero siendo este el vertedero localizado en el municipio de Minas do Leão - RS, Brasil. Los resultados compuestos presentan 322.844 t/ CH_4, y/o 8.071.580 t/CO_{2e} acumuladas en el escenario recomendado y 215.231 t/CH_4 y/o 5.380.749 t/CO_{2e} acumuladas en el escenario conservador entre el período de 2001 a 2021. Se empleó la metodología del proyecto de créditos de carbono para vertederos ACM0001: Quema o uso de gas de vertedero. También se produjeron otros resultados, como la proyección de CH_4 y CO_{2e} hasta 2030 coherente con la agenda SDG 2030, CH_4 producido por tipo de residuo además de CH_4 convertido a unidad volumétrica de Nm^3 para su comparación con el biogás. Los valores indicaron que la fracción de residuos alimentarios es la mayor productora de CH_4. Por regla general, el metano en los vertederos oscila entre el 45-60%. La presencia de CH_4 en el biogás puede oscilar entre el 45-81% considerando los límites de cada escenario presentado.

Palabras clave: Residuos sólidos. Biogás. Gases de efecto invernadero. CO_2 equivalente.

Submetido em: 29/03/2024
Aceito para publicação em: 01/11/2024
Publicado em: 08/11/2024

1. INTRODUÇÃO

A geração crescente de resíduos sólidos em aterros sanitários representa um problema ambiental significativo devido à liberação de gás metano (CH_4) na atmosfera, um dos gases de efeito estufa mais potentes, cuja capacidade de aquecimento é aproximadamente 28 vezes maior que a do dióxido de carbono (CO_2) ao longo de um período de 100 anos (SEEG, 2022; Gautam; Agrawal, 2021). Esse problema é intensificado pela alta quantidade de resíduos orgânicos depositados em aterros, que, ao se decomporem, liberam grandes volumes de metano, contribuindo para o aquecimento o global e acelerando as mudanças climáticas (Bonato *et al*., 2021).

O setor de resíduos é a segunda maior fonte geradora de metano (CH_4) (Richter *et al*., 2021) no Brasil, responsável por 15,8% das emissões em 2020 (3,17 Mt CH_4), cuja maior contribuição (66.6% do total emitido) vem da disposição final de resíduos sólidos (SEEG, 2022). Assim, uma das soluções com maior potencial à redução das emissões de CH_4 oriundas dos resíduos sólidos e direcionadas ao setor é a redução gradativa de resíduos orgânicos em aterros sanitários, recuperação ou queima de pelo menos 50% do biogás gerado e a erradicação de lixões a céu aberto (Araldi *et al*., 2021; SEEG, 2022; Silva Bello; Coelho, 2022).

Desse modo, torna-se necessidade de aprimorar, implementar modelos de previsão e de desenvolver tecnologias para a captação e queima de metano. 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 CH_4, advindos do processo de decomposição anaeróbica da matéria orgânica presente nos resíduos acumulados em aterros sanitários.

A quantificação da redução de metano (CH_4) em aterros sanitários é fundamental para estimar o impacto das emissões de gases de efeito estufa e medir a eficiência de tecnologias de captura e queima de metano. Além do cálculo simplificado baseado no peso dos resíduos sólidos, existem métodos mais avançados e precisos, como modelos matemáticos e simulações que consideram diversos fatores, como a composição dos resíduos, condições do aterro, taxas de sedimentação e eficiência do sistema de captura de captura gás (UNFCCC, 2019). Esses modelos permitem uma estimativa mais precisa da produção de metano e do

potencial de mitigação de emissões, especialmente quando o gás é queimado para energia ou simplesmente tratado para impedir sua liberação.

De acordo com Abrelpe (2021), 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 definição matemática de que a quantidade de metano gerado (C) é uma função exponencial do tempo (t) expressa por $C(t)=C_0.e^{-kt}$, onde t = tempo, e C = quantidade de CH_4 gerada ou de substrato degradável.

Nesse sentido, existem vários modelos propostos para a previsão da quantidade de CH_4 produzida ao longo da vida útil de um aterro. Geralmente, esses modelos acabam situando-se em 4 (quatro) categorias distintas: de ordem zero, de primeira ordem, multifásicos e de segunda ordem (Coops *et al*., 1995). Porém, cabe destacar que os modelos matemáticos, bem como as estimativas da geração de CH_4 em um aterro, não são simples, pois envolvem uma série de reações e condições ambientais, tornando essas estimativas complexas (Vieira; Candiani, 2021).

Diante do exposto, o presente estudo teve como objetivo estimar o gás CH_4 e o dióxido de carbono equivalente (CO_2e), produzidos pela disposição final de resíduos sólidos em aterro sanitário localizado no município de Minas do Leão (RS). Para isso, será empregado um modelo de primeira ordem com a metodologia ACM0001: Queima ou uso de gás de aterro – Versão 19.0 – Ferramenta 04 do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), a qual consiste em um mecanismo de flexibilização junto ao Protocolo de Kyoto, no sentido de auxiliar o processo de redução de GEE ou de captura de carbono.

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

2. METODOLOGIA

O presente trabalho realizou a estimativa do gás CH_4 gerado nas condições previamente conhecidas pela atividade de aterro sanitário da Central de Resíduos (CR) do

Recreio localizado no município de Minas do Leão, no estado do Rio Grande do Sul, Brasil. Situado na região sul do estado, este aterro encontra-se estrategicamente posicionado próximo à BR-290, uma das principais rodovias que cruzam o estado e facilitam o acesso para o transporte de resíduos provenientes de várias cidades da região metropolitana de Porto Alegre e arredores. O local está situado aproximadamente 80 km a oeste da cidade de Porto Alegre – RS. As coordenadas geográficas exatas do local são: 30° 8' 49" S (-30,1469) 52° 1' 33" W (-52,0258). Na Figura 1 apresenta-se o mapa geopolítico da localização do estudo

Figura 1 – Mapa geopolítico da localização do estudo.



Fonte: Autores (2024).

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. Possui uma área de 129 hectares, dos quais 84 em operação, retém uma capacidade total de 23 milhões de toneladas, com prazo estimado de 23 anos para o recebimento dos resíduos. A condição favorável gerada pela extração e mineração do carvão a céu aberto na Mina do Recreio (Local do aterro) possibilitou o desenvolvimento da atividade para a recomposição da paisagem, além de uma hidrogeologia do local adequada para a finalidade (CRVR, 2023).

O aterro sanitário contém uma planta de sucção forçada com 5 (cinco) 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 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. Além disso, foi realizado visita no local e coleta de informações sobre as características de um aterro sanitário. Para a análise dos dados foi empregado um modelo de primeira ordem com a metodologia ACM0001: Queima ou uso de gás de aterro – Versão 19.0 – Ferramenta 04 do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). O método ACM0001, também conhecido como "Metodologia de Projeto de Redução de Emissões de Metano em Aterros Sanitários", é uma das metodologias mais reconhecidas no contexto do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), estabelecido pelo Protocolo de Kyoto. Este método foi desenvolvido para quantificar e monitorar as reduções de emissões de metano (CH_4) provenientes da decomposição anaeróbica de resíduos sólidos em aterros sanitários.

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. A estimativa exponencial entre 2022 e 2030, dos resíduos dispostos no aterro até 2021, seguiu a mesma logicidade dos dados dos anos anteriores. Esse intervalo, considerou o período de cumprimento aos ODS 2030 da ONU.

Cabe salientar que 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.

3. DESENVOLVIMENTO e DISCUSSÃO

O referido aterro sanitário tem capacidade para receber 90.000 t/RSU por mês (conforme estabelecido na Licença de Operação 4268/2012-DL), e recebe, atualmente, resíduos sólidos de mais de 100 municípios do Estado do RS incluindo o município de Porto Alegre – RS. 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: 1) recebimento para destinação ambientalmente adequada dos resíduos sólidos, capturando o CH_4 produzido pelos mesmos; e, 2) 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 ºC, garantindo a destruição do CH_4 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.

3.1. Projeto MDL: Aterro Sanitário da Central de Resíduos do Recreio

A empresa responsável pelo aterro sanitário 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 MDL. Também protocolou em 2006 o primeiro pedido de validação para redução certificada de emissão (RCE) (em inglês: *Certified Emission Reductions* – CER) os "créditos de carbono", tendo 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 MDL-CRRLGP (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.

O segundo período de crédito da Central de Resíduos do Recreio *Landfill Gas Project* (CRRLGP), observado no Design do Projeto (PDD/MDL), versão 08.0 (2017), o creditou 7 anos de dezembro de 2014 a novembro de 2021, onde 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 CH_4 3.547.588 t/CO_{2e}, conforme a referida publicação (CDM-CRRLGP, 2017).

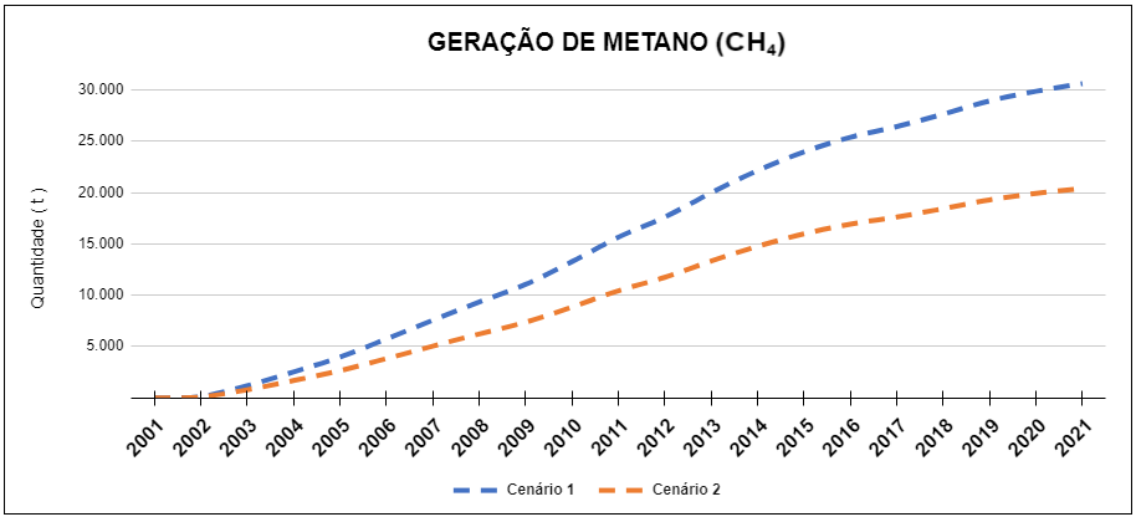
Os dados apresentados podem ser observado no relatório do MDL (2023) publicado em janeiro na página “cdm.unfccc”. Até este estudo, não foi encontrada a validação do terceiro período, na página da UNFCCC. Todas as informações descritas no trabalho são valores públicos e podem ser acessados nos históricos 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.

3.2. Projeção de metano (CH_4)

Os modelos cinéticos de primeira ordem incluem o efeito da idade sobre a geração de CH_4. 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 (Witte, 2018).

A estimativa do total de CH_4 produzido no Aterro Sanitário Central de Resíduos do Recreio, está ilustrada na Figura 2, para os anos de 2001 a 2021. O total de CH_4 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. Figura 9 (CH_4 gerado por cada tipo de resíduo) mencionam a representatividade de demais informações.

Figura 2 - Total da geração acumulada de metano produzido em toneladas entre 2001 e 2021 no aterro sanitário.



Fonte: Autores (2024).

O gráfico acima apresenta o resultado da projeção de CH_4 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 CH_4 apresenta duas séries históricas, Cenário 1 (Recomendado) e Cenário 2 (Conservador). O primeiro cenário com tracejado em azul considerou o valor de ϕ_y = 0,75 indicado pelo *CDM Tool 04*, classificado como valor Recomendado. O segundo cenário em cor laranja, possui ϕ_y = 0,50 classificado pelo autor como valor Conservador, devido a proximidade dos valores finais comparados ao PDD do Aterro sanitário. O parâmetro ϕ_y tem seu uso atrelado a correção de valores da equação.

Os resultados de CH_4 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/CH_4/ano. A faixa do cenário 2 apresentou 20.405 t/CH_4/ano. Entre os anos de 2001 e 2021 foram produzidas 322.844 t/CH_4 cenário 1, e com o cenário 2 totalizou 215.231 t/CH_4 resultando em uma diferença de 107.613 t/CH_4, entre os dados apresentados.

Ainda sobre o 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/CH_4/ano aplicando ϕ_y = 0,75 e 19.906 t/CH_4/ano sendo ϕ_y = 0,50.

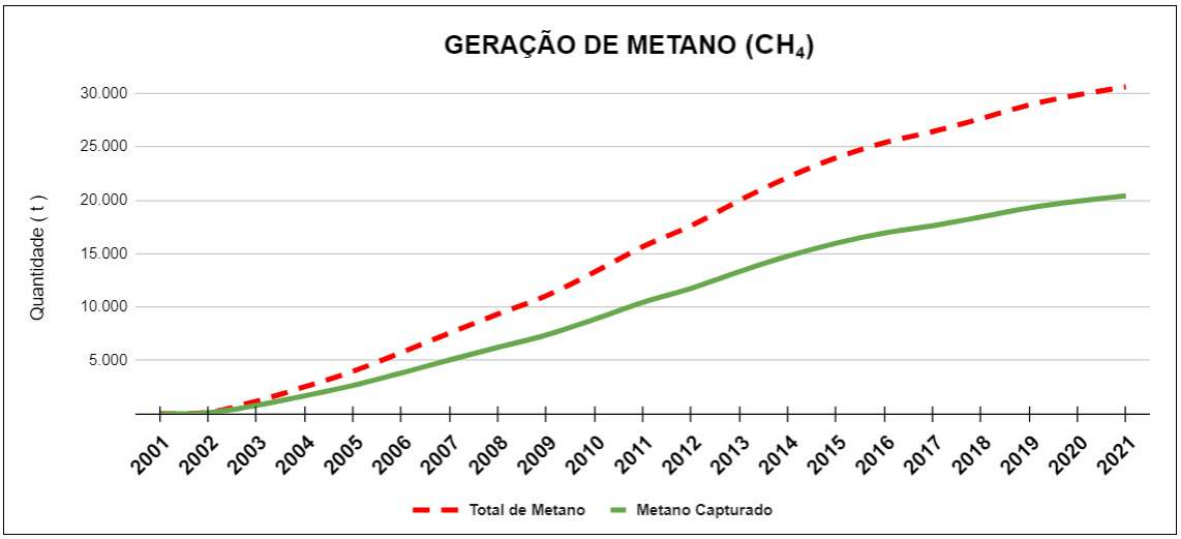
Torna-se evidente que o CH_4 produzido em sua totalidade não foi liberado para a atmosfera, devido a captação pelas redes de biogás. A estimativa do cenário 2 utilizada com o parâmetro ϕ_y = 0,50 obteve o resultado diante da proximidade da realidade do aterro, de acordo com os relatórios publicados de 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 ϕ_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 ϕ_y = 0,50 na Figura 3, com a quantidade reduzida do total de CH_4 produzido.

O parâmetro "Fração capturada de metano" *(Fy)*, 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 (ϕy)

sendo ϕy = 0,75 para o total de CH_4 produzido e converter o valor encontrado de ϕy = 0,50 para a Fração Capturada de Metano na equação, sendo Fy = 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 3 - Quantidade produzida e captura de metano em toneladas entre 2001 a 2021 no aterro sanitário.



Fonte: Autores (2024).

Observa-se a definição do potencial quantidade produzida de metano na cor tracejado 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 CH_4 presente no gás de aterro sanitário com o de biodigestores, resulta em 45% de CH_4 e 65% de metano no biogás nas duas origens, respectivamente. O valor chama atenção pela eficiência no procedimento operacional ao analisar Fy = 33% na equação refletir em 77% do metano capturado, acima do teor do CH_4 presente no biogás, coletado pela empresa Biotérmica entre 2016 a 2021.

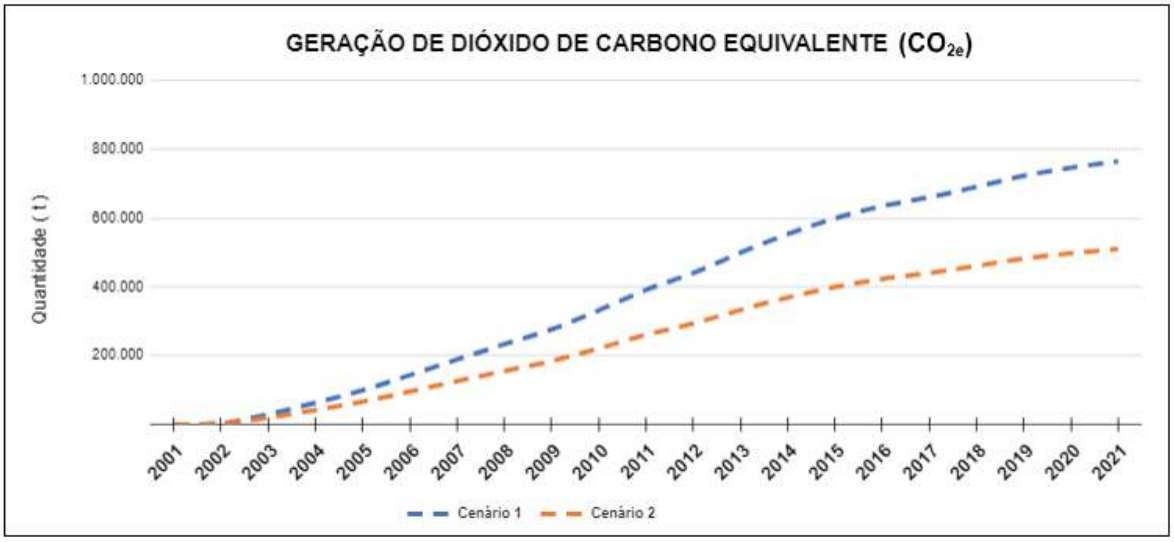
Quando dispostos adequadamente em aterros sanitários, toda a matéria orgânica acumulada tem um grande potencial para produção de biogás, rico em gás CH_4, o qual pode ser usado como fonte de energia. Este aproveitamento reduz os impactos ambientais de sua liberação descontrolada na atmosfera e oferece recursos energéticos e receitas financeiras para a sociedade em geral (Nascimento *et al*., 2019).

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 4 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 4 – Total de carbono equivalente (CO_{2e}) em toneladas entre 2001 a 2021 no aterro sanitário.



Fonte: Autores (2024).

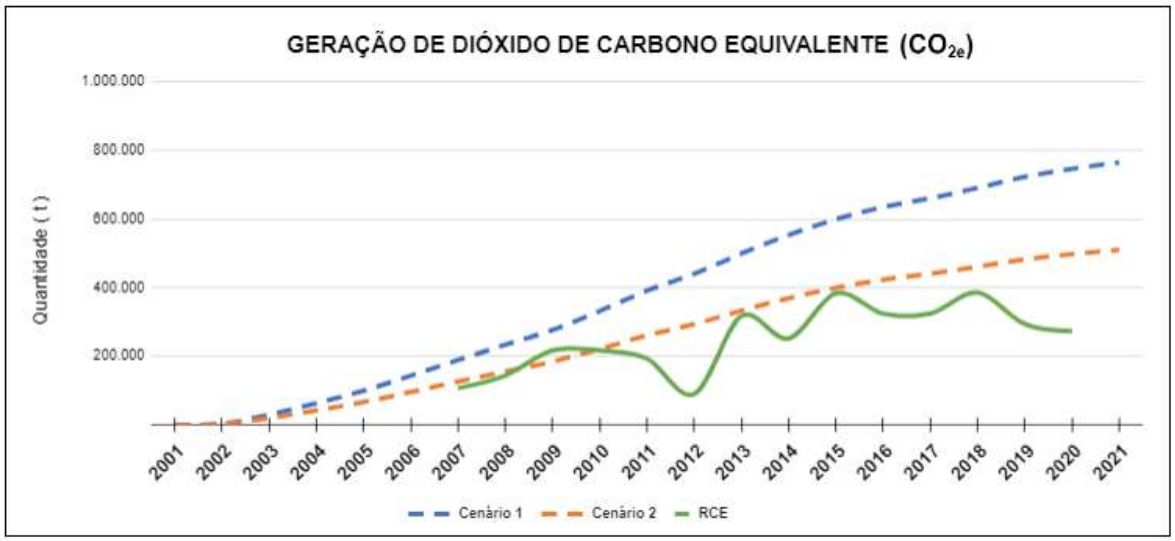
Observa-se para o ano de 2021 o total de 765.182 t/CO_{2e}/ano com o parâmetro $\phi_{y,}$ cenário 1 (0,75) do MDL. No mesmo ano, sendo o cenário 2 (0,50), o resultado foi de 510.121 t/CO_{2e}/Ano. No período de 2001 e 2021 foram produzidas 8.071.580 t/$CO_{2e,}$ no cenário 1, e com a faixa de cenário 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 (Potencial de Aquecimento Global, , em português – PAG), na unidade de CO_{2e}. Nestes resultados foi utilizado o PAG de cada gás, ou GWP (*Global Warming Potential*, em inglês). Tais valores de referência são apresentados nos relatórios do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). Cada gás de efeito estufa é capaz de reter calor em determinada intensidade, sendo comparada à capacidade do CO_2 de realizar a mesma função (FGVces, 2022).

Avaliando o período do estudo de 2001 a 2021, foram encontradas alterações de GWP para CH_4. 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 CH_4 com as RCE's no aterro sanitário.



Fonte: Autores (2024).

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.

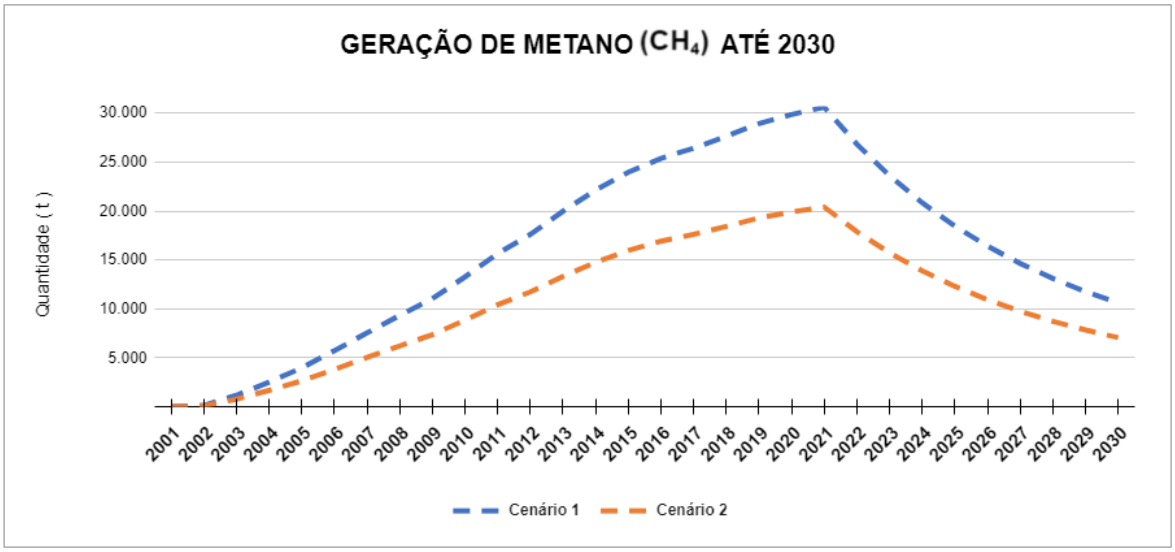
É importante salientar que o valor excedente das RCE's, necessariamente não seja CH_4 emitido para atmosfera pois este ter sido convertido em sua grande parte, mas não certificado pelo MDL, em razão das exigências previstas de verificação. Entre as quais, o atingimento da temperatura mínima acima de 500 ºC 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.

3.4. Projeção de Metano 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 da Agenda 2030 (Bem Machado; Richter, 2020).

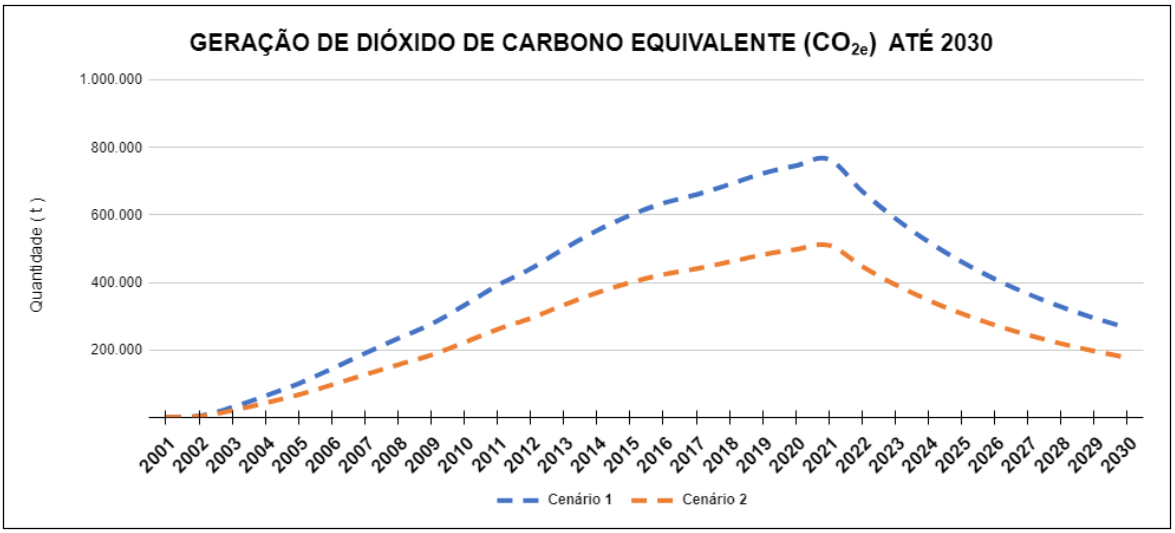
Figura 6 - Projeção de metano em toneladas entre 2022 e 2030 no aterro sanitário.



Fonte: Autores (2024).

A partir dos resíduos sólidos depositados no ano de 2001 até 2021, a cor tracejada azul representa total de 156.287 t/CH_4 e 104.190 t/CH_4 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/CH_4 e 11.577 t/CH_4, de acordo com cada um dos modelos. Observa-se para o ano de 2022 o total de 26.835 t/CH_4/Ano ao cenário 1. O resultado do cenário 2, resultou em 17.890 t/CH_4/Ano. A produção de CH_4 apresentou queda entre os anos de 2021 e 2022, com a redução de 3.772 t/CH_4 e 2.515 t/CH_4 em cada cenário.

Figura 7 - Projeção de carbono equivalente entre 2022 e 2030 no aterro sanitário.



Fonte: Autores (2024).

A Figura 7 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 CH_4 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).

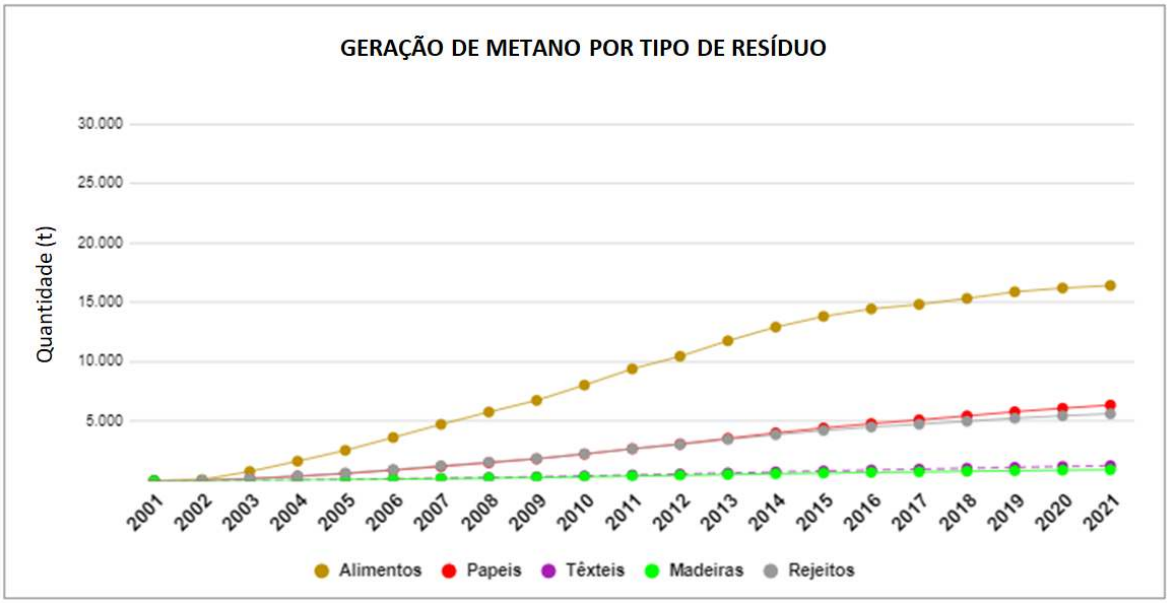
3.5. Projeção por Índice de Tipo de Resíduo (j)

A apresentação do índice de tipo de resíduo de CH_4 produzido somado por cada tipo de resíduo, representou o total de 322.845 t/CH_4 e 215.231 t/CH_4 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 CH_4 (Figura 8).

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



Fonte: Autores (2024).

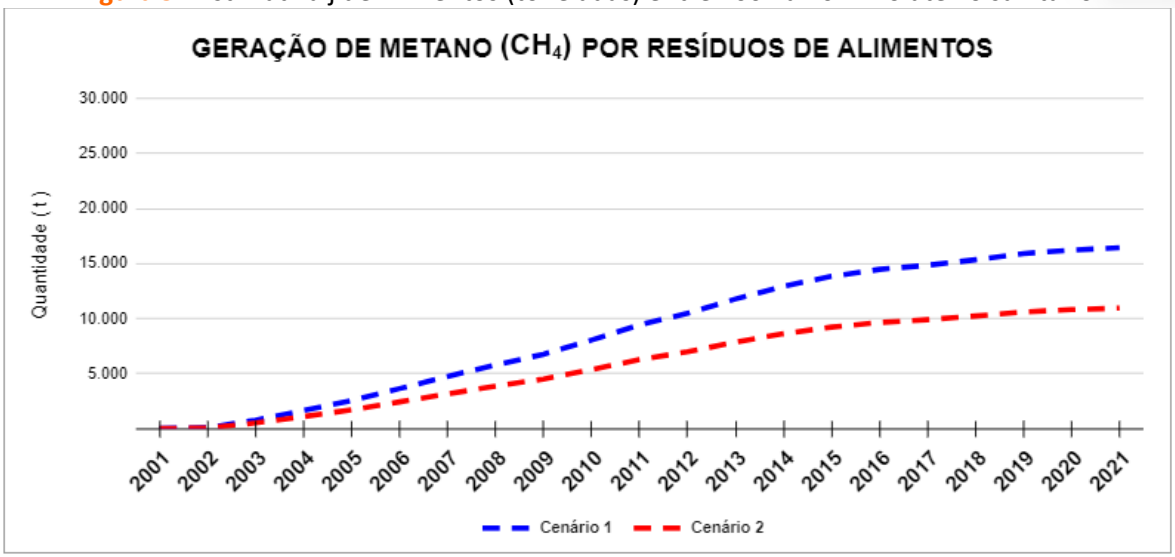
A exponencialidade de cada ano de metano produzido na série histórica, tem influência de acordo com a fração de carbono orgânico degradável que cada fração possui. A faixa da cor amarela para Alimentos, sendo resíduos orgânicos destinados ao aterro sanitário, seguido por Papéis em vermelho, Jardins/Rejeitos em cinza, Têxteis em lilás e por fim, Madeiras e derivados na cor verde.

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/CH_4 e 10.952 t/CH_4, respectivamente.

Entre os anos de 2001 e 2021 (Figura 9), foram produzidas 185.623 t/CH_4 e 123.748 t/CH_4 com média de 8.839 t/$CH_{4/ano}$ e 5.893 t/$CH_{4/ano}$, 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.

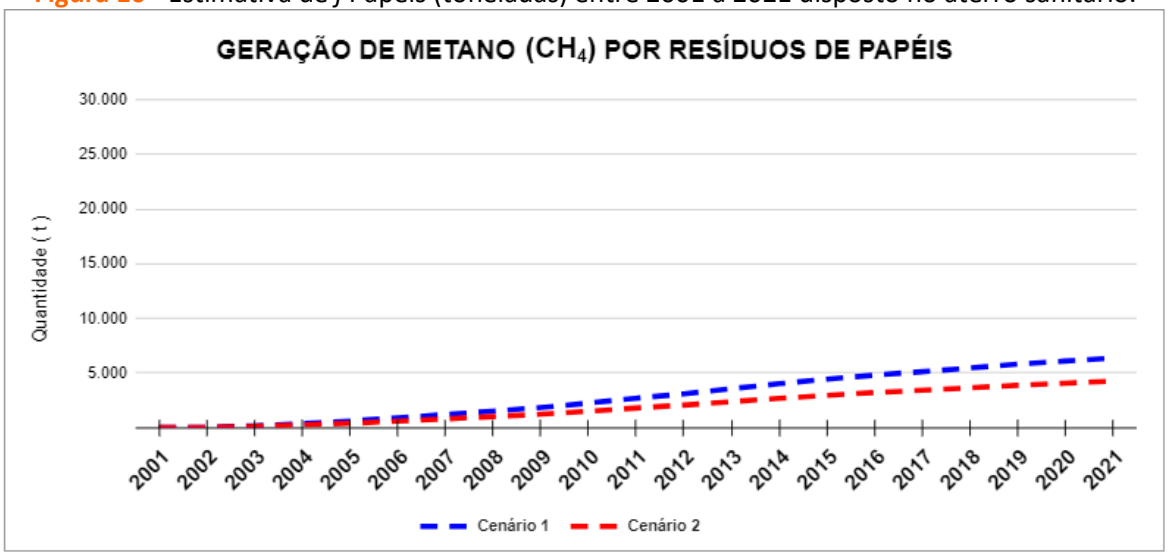
Figura 9 - Estimativa j de Alimentos (toneladas) entre 2001 a 2021 no aterro sanitário.



Fonte: Autores (2024).

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 azul e no cenário 2 com a cor tracejado em vermelho, o ano de 2021 gerou 6.364 t/CH_4 e 4.243 t/CH_4, respectivamente. Entre os anos de 2001 e 2021, foram produzidas 60.217 t/CH_4 e 40.144 t/CH_4 com uma média ao ano de 2.867 t/$CH_{4/ano}$ e 1.912 t/$CH_{4/ano}$, respectivamente.

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



Fonte: Autores (2024).

Papéis, detém a terceira maior parcela gravimétrica de resíduos sólidos, por meio de papéis em geral como também o papelão, possuem elevada presença na geração de resíduos

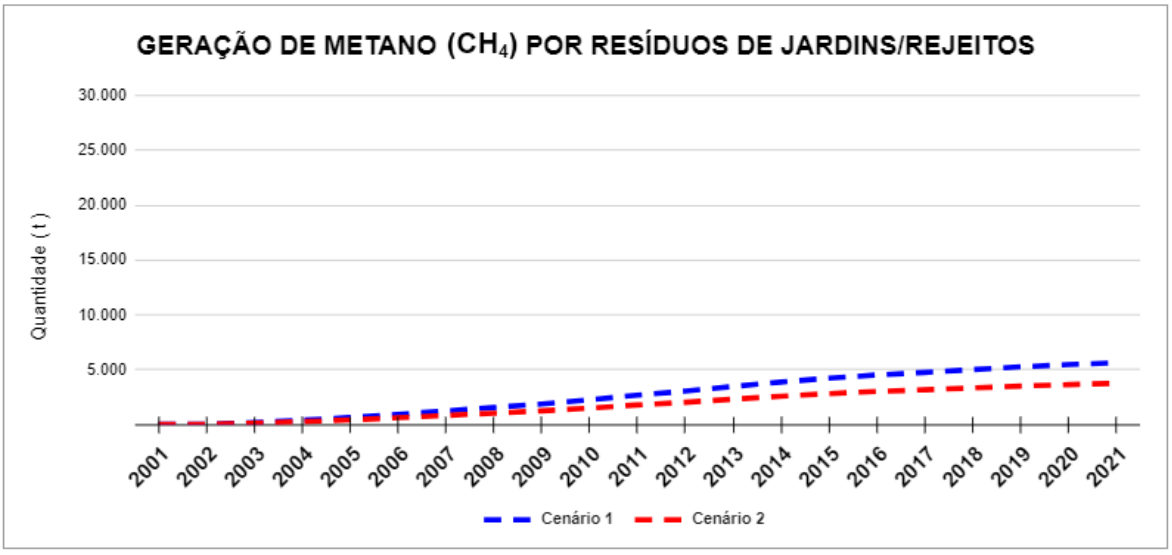
sólidos domiciliares, além da alta significância de valoração através da coleta seletiva com uso devido para a remanufatura da reciclagem como o ciclo da celulose. Esta fração é rica em carbono, em razão de ser também o segundo tipo *j* com maior fração de DOC_j por peso com 0,40 entre as demais frações previstas.

A estimativa gerada por fração *j* jardins correspondeu a terceira maior quantidade de CH_4. Considerando as premissas anteriores, o cenário 1 na cor tracejado em azul, gerou 5.633 t/CH_4, e no cenário 2 em cor tracejado em vermelho foram gerados 3.755 t/CH_4. Seguinte a Figura 11 entre 2001 a 2021, foram produzidas 57.023 t/CH_4 e 38.017 t/CH_4, com uma média de 2.715 t/CH_4 e 1.810 t/CH_4, 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 CH_4 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 11 - Estimativa de *j* Jardins (toneladas) entre 2001 a 2021 disposto no aterro sanitário.

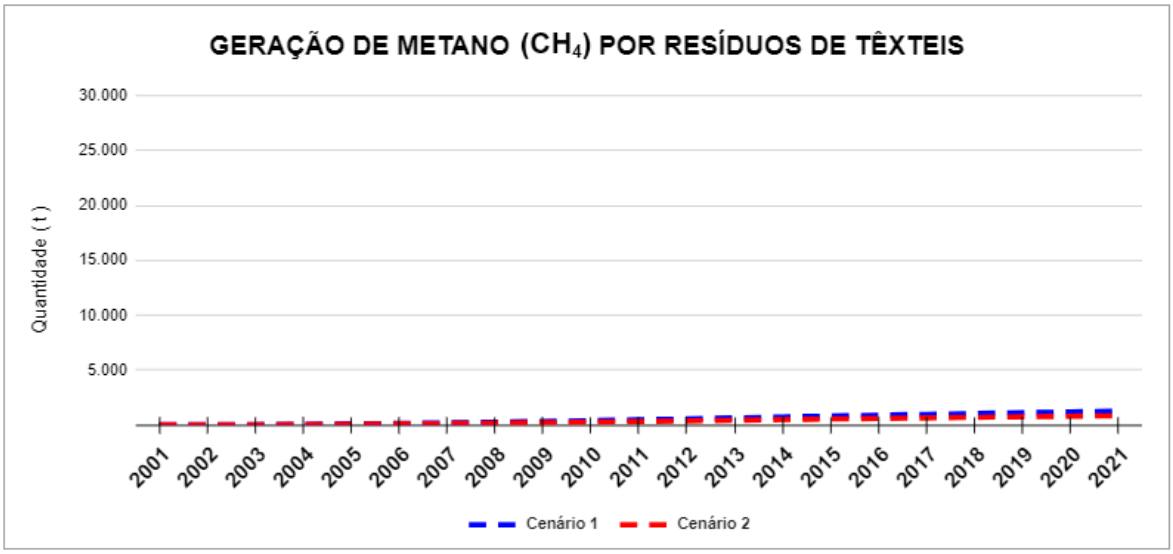


Fonte: Autores (2024).

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/CH_4, e no cenário 2 com a cor tracejado em vermelho o total de 841 t/CH_4. A série de 2001 a 2021 totaliza 11.267 t/CH_4 e 7.513 t/CH_4, com média de 537 t/CH_4 e 358 t/CH_4, respectivamente.

Aproximadamente metade do valor anual de 2021 foi atingido em 2012 com 557 t/CH_4. 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 (toneladas) entre 2001 a 2021 disposto no aterro sanitário.

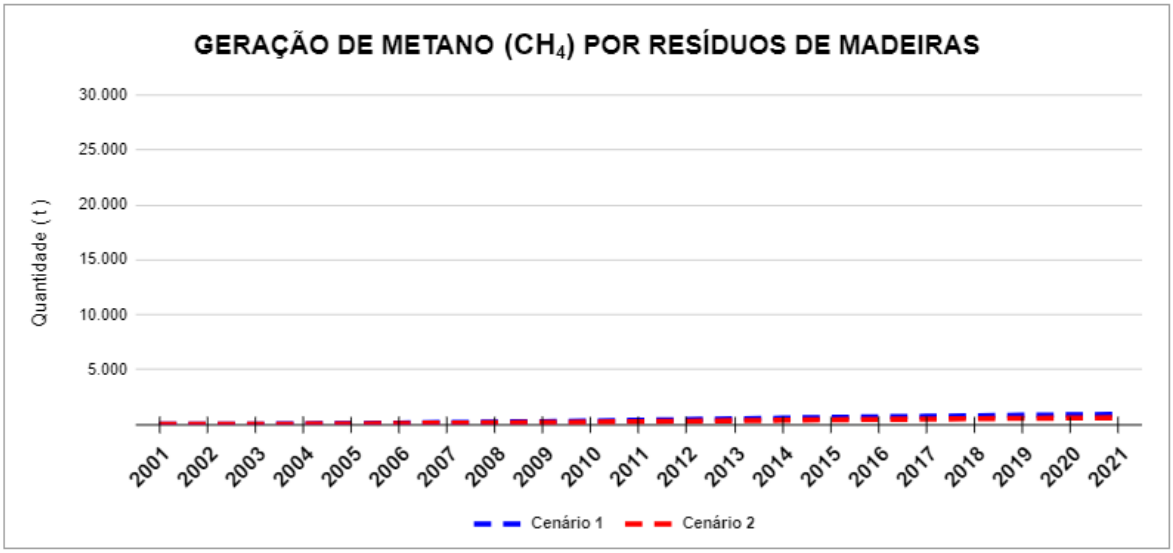


Fonte: Autores (2024).

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/CH_4, enquanto no cenário 2 com a cor tracejado em vermelho gerou 5.809 t/CH_4, respectivamente. A Figura 13 apresenta a série completa dos modelos entre os anos de 2001 e 2021, totalizando 8.715 t/CH_4 e 5.812 t/CH_4 com a média de 415 t/CH_4 e 290,45 t/CH_4.

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 CH_4 na série histórica está também na baixa presença gravimétrica sendo em menos de 2% dos resíduos sólidos.

Figura 13 - Estimativa de *j* Madeiras e derivados em toneladas entre 2001 a 2021 disposto no aterro sanitário.



Fonte: Autores (2024).

Os resultados da estimativa de t/CH_4 vistos anteriormente foram convertidos da unidade de toneladas (t) para unidade volumétrica de Normal Metro Cúbico (Nm^3), delineado em 2 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 Nm^3/CH_4 com a média de 19.449.044 Nm^3/CH_4 por ano. A coluna do Cenário 2, $\varphi_y = 0,50$ totalizou 272.288.738 Nm^3/CH_4 com a média de 12.966.130 Nm^3/CH_4 por ano. Observou-se que para o ano de 2021 o cenário 1 teve 38.720.915,70 Nm^3/CH_4 enquanto o cenário 2, gerou 25.814.365,50 Nm^3/CH_4, resultando na diferença de 12.906.550,2 Nm^3/CH_4 a menos para o último modelo citado. Visando o potencial uso de CH_4/Nm^3 para biogás produzido, o comparativo com a quantidade de CH_4 e biogás disponibilizada pela empresa Biotérmica (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	-
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	-

A análise dos dados apresentados na Tabela 1, que estima a geração de metano (CH_4) em toneladas (t) e metros cúbicos normais (Nm³) no aterro sanitário da Central de Resíduos do Recreio, revela tendências importantes tanto para os cenários 1 e 2 quanto para a produção de biogás ao longo dos anos. Os dados mostram um aumento constante na produção de metano nos primeiros anos de operação do aterro, com um crescimento acentuado especialmente entre 2001 e 2016. Em 2001, a produção de metano era de apenas 2 t, enquanto em 2016 chegou a 25.380 t no cenário 1. Além disso, a partir de 2017, observa-se uma leve desaceleração no crescimento, mas ainda dentro de valores elevados. No cenário

1, a produção de metano em 2020 foi de 29.858 t, e em 2021, aumentou para 30.607 t, antes de cair para 26.835 t em 2022.

Os dois cenários refletem diferentes suposições sobre a decomposição de resíduos e a geração de metano. No geral, o cenário 1 apresenta valores de metano consistentemente mais altos do que o cenário 2, indicando uma maior eficiência na geração de CH_4 sob as condições modeladas. No ano de 2024, por exemplo, o cenário 1 estimou 20.842 t de metano, enquanto o cenário 2 teve 13.894 t, mostrando uma diferença significativa.

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 Al Seadi *et al*. (2013), a porcentagem de 50% CH_4 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% CH_4 e 40% CO_2, com uma densidade de 1,2143 kg/m³.

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 H_2 + CO_2, e acetoclásticas, responsáveis por Acetato. Ambas irão promover a liberação de CH_4 e CO_2.

Os valores do metano recomendado ficaram próximos dos dados de biogás (Nm³) disponibilizados pela Biotérmica. O percentual de CH_4 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. 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 CH_4 (t) para CH_4 (Nm^3), também apresentaram o cenário 2 com maior proximidade e consistência. A estimativa de CH_4 (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 CH4. Ainda, recomenda-se o aperfeiçoamento da equação de decaimento de primeira ordem para futuros trabalhos, ao clima subtropical ref. à 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**. 2021. Disponível em: https://abrelpe.org.br/atlas-brasileiro/. Acesso em: 14 fev. 2024.

AL SEADI, T. *et al*. Biogas digestate quality and utilization. In: **The biogas handbook**. Woodhead publishing, 2013. p. 267-301.

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.

ARALDI, R. *et al*. Inovação e desenvolvimento sustentável: Um estudo de caso sobre os efeitos do uso do aplicativo para gestão de resíduos sólidos em São José do Herval-RS. **Desenvolve Revista de Gestão do Unilasalle**, v. 10, n. 3, p. 1-14, 2021.

BONATO, S. *et al*. Administração pública no âmbito da gestão de resíduos sólidos: um diagnóstico no município de Soledade/RS. **Revista Metropolitana de Sustentabilidade**, v. 11, n. 1, p. 128-153, 2021.

CARVALHO, R. Q. *et al*. **Oportunidades enterradas**: geração elétrica a partir do biogás de resíduos sólidos urbanos. Vitória - ES: EDUFES, 2019.

CDM-CRRLGP. **Project design document form for CDM project activities (Version 05.0)**. 2014. Disponível em: https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/DNV-CUK1158844635.31/view. Acesso em: 4 fev. 2024.

CDM-CRRLGP. **Validation report form for renewal of crediting period for CDM project activities (Version 01.0)**. 2015. Disponível em: https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/DNV-CUK1158844635.31/history. Acesso em: 4 fev. 2024.

CDM-CRRLGP. Central de Resíduos do Recreio Landfill Gas Project (CRRLGP). **Project design document (PDD) form for CDM project activities**. **Version 08.0**. 2017. Disponível em: https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/DNV-CUK1158844635.31/view?cp=2. Acesso em: 22 fev. 2024.

COELHO, Ulisses Raad *et al*. Biogás: aproveitamento energético e gestão ambiental em aterro sanitário. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 3, p. 540-553, 2021.

COOPS, O. *et al*. Validation of Landfill Gas Formation Models. In: Proceedings from Sardinia 95, Fifth International Landfill Symposium, CISA, S. Margherita di Paula, Calgiari, Italy, 2–6 October 1995

CRVR, 2023. Unidade de Valorização Sustentável. UVS Minas do Leão. https://crvr.com.br/area-de-atuacao/central-de-residuos-do-recreio/. Acesso em: 12 mar. 2024.

COSSU, R. *et al*. Biogas emissions measurement using static and dynamic flux chambers and infrared method. In: **SARDINIA... CISA**, p. 103-114, 1997.

DA SILVA BELLO, P. F.; COELHO, S. L. CAPTAÇÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO PARA REUTILIZAÇÃO SUSTENTÁVEL. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, v. 8, n. 6, p. 1342-1354, 2022. DOI: https://doi.org/10.51891/rease.v8i6.6063

DE BEM MACHADO, A.; RICHTER, M. F. SUSTENTABILIDADE EM TEMPOS DE PANDEMIA (COVID-19). **RECIMA21 – Revista Científica Multidisciplinar**, v. 1, n. 2, p. 264-279, 2020. DOI: https://doi.org/10.47820/recima21.v1i2.25

FGV, 2022. Centro de Estudos em Sustentabilidade (FGVces). **Nota técnica: valores de referência para o potencial de aquecimento global (GWP) dos gases de efeito estufa: versão 2.0, 2022**. Disponível em: https://repositorio.fgv.br/server/api/core/bitstreams/fd7bc5b9-a1b6-45f9-91b1-35624c63dd16/content. Acesso em: 17 mar. 2024.

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: 26 fev. 2024.

GAUTAM, M.; AGRAWAL, M. Greenhouse gas emissions from municipal solid waste management: a review of global scenario. **Carbon footprint case studies: municipal solid waste management, sustainable road transport and carbon sequestration**, p. 123-160, 2021.

INMET, 2022. **Instituto Nacional de Meteorologia**. Brasília-DF, 2022. Disponível em: https://portal.inmet.gov.br/normais. Acesso em: 11 mar. 2024.

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.

KELLEHER, B. P. *et al*. Advances in poultry litter disposal technology–a review. **Bioresource technology**, v. 83, n. 1, p. 27-36, 2002. DOI: https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00133-X

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

NASCIMENTO, M. C. B. *et al.* 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. DOI: https://doi.org/10.1590/S1413-41522019171125

PIÑAS, J. A. V. *et al*. Aterros sanitários para geração de energia elétrica a partir da produção de biogás no Brasil: comparação dos modelos LandGEM (EPA) e Biogás (Cetesb). **Revista Brasileira de Estudos de População**, v. 33, p. 175-188, 2016. DOI: https://doi.org/10.20947/S0102-309820160009

RICHTER, M. F.; DE LARA, D. M.; ANDREAZZA, R. de C. L. 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/revbea.2021.v16.12400

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. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2014.

SEEG. **Desafios e Oportunidades para Redução das Emissões de Metano no Brasil**, 2022. Sistemas de Estimativa e Emissão de Gases. Disponível em: https://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2024/07/SEEG-METHANE.pdf Acesso em: 11 mar. 2024.

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: 07 mar. 2024.

VIANA, T. A. P. **Análise das estimativas de emissão de metano por aterros sanitários em projetos de MDL no Brasil**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2011.

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. DOI: https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.002.0030

WITTE, J. *et al*. Direct catalytic methanation of biogas–Part I: new insights into biomethane production using rate-based modelling and detailed process analysis. **Energy Conversion and Management**, v. 171, p. 750-768, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.05.056

ZANK, J. C. C. *et al*. As características do biogás e avaliação de substituição de combustíveis. **Exacta**, v. 18, n. 3, p. 502-516, 2020. DOI: https://doi.org/10.5585/exactaep.v18n3.10802.