



**MODELAGEM DA GERAÇÃO DE BIOGÁS APLICANDO METODOLOGIA
CDM PARA REDUÇÃO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA:
ESTUDO DE CASO DO ATERRO MTR SANTA MARIA MADALENA, RJ, BRASIL**

Iasmim Esteves Lattanzi

iasmimlattanzi@id.uff.br
Universidade Federal Fluminense –
UFF, Niterói, Rio de Janeiro, Brasil.

Dario de Andrade Prata Filho

darioprata@gmail.com
Universidade Federal Fluminense –
UFF, Niterói, Rio de Janeiro, Brasil.

**Oswaldo Luiz Gonçalves
Quelhas**

osvaldoquelhas@id.uff.br
Universidade Federal Fluminense –
UFF, Niterói, Rio de Janeiro, Brasil.

RESUMO

A grande quantidade de gases de efeito estufa (GEE) emitida por ação antropogênica torna-se um desafio que requer iniciativas para a sua mitigação, como parcerias público-privadas. Nos países em desenvolvimento, essa questão é ainda mais problemática, pois o crescente desenvolvimento econômico não é acompanhado por legislação e iniciativas que regulam o metano liberado na atmosfera. Este trabalho tem como objetivo medir a redução de GEE, aplicando uma metodologia de projeto *Clean Development Mechanism* (CDM) da Organização das Nações Unidas (ONU) a um aterro real. Os métodos utilizados foram um estudo de caso de um aterro sanitário no estado do Rio de Janeiro, Brasil, com aplicação do modelo LandGem da *United States Environmental Protection Agency* (EPA) para o dimensionamento dos gases produzidos e, finalmente, análise de projetos CDM para definir uma metodologia que se aplica ao caso. Os resultados mostram que, com a simples implementação de flares no aterro, há uma grande redução das emissões de metano, mas ainda é necessário maior interesse do poder público e privado pela aplicação de metodologias de mitigação de gases. A principal limitação desta pesquisa é o fato de haver poucas publicações na área de metodologias de projetos CDM, e que os dados usados para dimensionar os gases no modelo LandGem foram estimados através de previsões de população e resíduos. Por fim, este estudo pode ser amplamente aplicado em aterros sanitários de diferentes localidades, não restritos ao Brasil.

Palavras-chave: Aterro sanitário; Projetos CDM; LandGem; Gestão de resíduos.



1. INTRODUÇÃO

Nos países em desenvolvimento, a questão de resíduos sólidos urbanos é considerada uma problemática de cunho social e político. No Brasil, em relação à disposição final dos resíduos sólidos municipais, 60% dos municípios ainda dispõem seus resíduos em lixões ou aterros controlados, e somente 23,7% dos municípios possuem coleta seletiva (Ministério do Meio Ambiente, 2015). A Lei nº 12.305/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, estabeleceu que a União, em conjunto com os estados, deveria elaborar metas para eliminação e recuperação dos lixões, além de objetivos, como o aproveitamento energético de gases gerados nos aterros sanitários (Brasil, 2010).

O conjunto de gases produzidos em aterros, o biogás, é produzido através de fermentação anaeróbica da matéria orgânica, além de ser formado principalmente por metano, gás carbônico e outros gases, como sulfeto de hidrogênio. O metano (CH_4), que compõe de 50 à 55% do biogás, possui um potencial de aquecimento global até 32 vezes maior do que o dióxido de carbono, considerando um período de cem anos (Etminan et al., 2016). Nesse sentido, são necessárias soluções para mitigar sua liberação no meio ambiente.

Mundialmente, aterros sanitários são responsáveis por 18% das emissões antropogênicas de CH_4 (Bogner et al., 2008), o que demonstra a necessidade da adoção de soluções que limitem a liberação de metano na atmosfera. Pesquisas recentes mencionam estratégias na área de biotecnologia, como a elaboração de biofiltros capazes de oxidar até 80% do metano proveniente de aterros (Gebert; Gröngroft, 2006). Além disso, há estudos que mostram que o metano pode ser utilizado na geração de energia elétrica, aquecimento e até mesmo resfriamento (Gao et al., 2015).

Uma das vantagens do reaproveitamento do biogás nos países em desenvolvimento é a possibilidade de o projeto se certificar nos padrões do instrumento do Protocolo de Kyoto (PK), o *Clean Development Mechanism - CDM* (Barton et al., 2008). O principal objetivo do CDM é que os países desenvolvidos, relacionados no anexo I do acordo climático - alcancem o desenvolvimento sustentável, e ao mesmo tempo auxiliem os países em desenvolvimento a alcançarem um desenvolvimento sustentável a menores custos (UNFCCC, 1998). Em 2015, com o *Paris Agreement*, o acordo climático foi reafirmado com o objetivo de fortalecer a responsabilidade global de propor soluções para as mudanças climáticas, além de promover o desenvolvimento sustentável. Um dos principais objetivos é limitar o aumento da temperatura global em aproximadamente 1,5°C acima dos níveis pré-industriais (UNFCCC, 2015).

The United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) desenvolveu uma série de metodologias para regulamentar projetos nos padrões CDM, e assim reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE). Para mitigar as emissões, existem métodos que se aplicam a diversos setores, como indústrias, transporte, reflorestamento e manejo e disposição de resíduos (UNFCCC, 2018).

As parcerias entre países mediante o CDM se mostraram vantajosas, com ganhos econômicos, sociais e ambientais para o país sede do projeto (UNFCCC, 2011). Além disso, o Brasil é um dos países que mais possuem projetos CDM ativos, sendo a maior parte na área de energia e resíduos (Benites-Lazaro; Mello-Théry, 2019).

Para demonstrar as vantagens ambientais, econômicas e sociais em mitigar essas emissões, é necessário analisar as metodologias aplicáveis aos diferentes setores. Dessa forma, o presente trabalho visa demonstrar algumas das vantagens ambientais da mitigação do metano, através de um estudo de caso em um aterro real.

Foi feita a modelagem da produção de gases para demonstrar quantitativamente o potencial que há na mitigação do metano como fator para o desenvolvimento sustentável. Utilizou-se o modelo LandGem, formulado pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (United States Environmental Protection Agency - EPA, 2005), para a estimativa dos gases produzidos anualmente no aterro. Converteu-se a quantidade de metano produzido anualmente para carbono equivalente (CO_2e). Por fim, foi feita comparação das emissões de CO_2e do aterro com a implantação de flares, e emissões iniciais, ou seja, sem nenhum tipo de reaproveitamento dos gases. Após isso, foram feitas propostas baseadas nos resultados encontrados, para que haja uma integração da iniciativa privada e pública para a implementação do projeto.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Pesquisando na base Scopus com as palavras-chave *landfill "AND" CDM*, não se encontraram resultados abundantes que abrangessem os dois tópicos citados. Foram achados 85 documentos, entre os quais foram selecionados os que apresentam maior número de citações ligadas às palavras-chave, além dos mais recentes e pertinentes ao objetivo desse trabalho. Cerca de 80% dos artigos foram publicados a partir de 2008, o que demonstra ser uma temática recente e que ainda necessita ser explorada pela academia. Após essa triagem, foi possível observar uma limitação que revela escassez de literatura disponível sobre a ferramenta CDM *projects* ligada a aterros.

Com o crescimento das economias dos países em desen-



volvimento, há maior produção de resíduos, o que demanda parcerias entre os países para que haja redução dos GEE que afetam o planeta em nível mundial. Estudos como o de Bogner (2008) e Barton *et al.* (2008) demonstram o potencial da ferramenta CDM do Protocolo de Kyoto em reduzir as emissões do setor de resíduos.

Thompson *et al.* (2009), no primeiro estudo feito para comparar modelos de estimativa de geração de metano, demonstraram a eficácia do modelo LandGem em estimar gases emitidos em aterros sanitários. Usando somente a palavra-chave “LandGem” na Scopus, foram encontrados 96 documentos, sendo 35% publicados nos anos 2017, 2018 e 2019. Esse modelo é de fácil acesso, gratuito e de alta confiabilidade, por isso foi o escolhido para ser aplicado nesse estudo de caso.

Por serem temáticas recentes, apenas após 2005 começaram a ser publicadas as primeiras pesquisas do modelo LandGem e CDM *projects*. Desse modo, há materiais disponíveis para consulta que favorecerem as parcerias público/privada, no que tange à gestão de resíduos sólidos e as vantagens em mitigar emissões.

2.1 Mudanças climáticas e projetos CDM

Pesquisas indicam que o aumento das temperaturas nos últimos 30 anos do século 20 têm afetado a fenologia dos organismos, a taxa e distribuição das espécies, além da composição e dinâmica das comunidades (Walther *et al.*, 2002). Com estudos evidenciando de forma crescente os resultados das atividades antropogênicas nos ecossistemas, têm sido realizadas discussões e parcerias com o intuito de diminuir as mudanças climáticas que afetam os ecossistemas em escala mundial.

O CDM é um instrumento do Protocolo de Kyoto para que os países signatários e não signatários do acordo climático, firmado em 1997, possam se beneficiar mutuamente. O UNFCCC verifica a redução de dióxido de carbono emitido, através dos certificados de redução de emissão de GEE em projetos implementados nos países em desenvolvimento, ampliando a expectativa do desenvolvimento sustentável (UNFCCC, 1998). Com o *Paris Agreement*, em 2015, essa parceria entre os países foi ratificada, com a proposição de mecanismos mitigatórios de gases de efeito estufa - como pode ser observado no artigo 6, parágrafo 4 do acordo (UNFCCC, 2015):

A mechanism to contribute to the mitigation of greenhouse gas emissions and support sustainable development is hereby established under the authority and guidance of the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to

this Agreement for use by Parties on a voluntary basis. It shall be supervised by a body designated by the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to this Agreement, and shall aim: (a) To promote the mitigation of greenhouse gas emissions while fostering sustainable development; (b) To incentivize and facilitate participation in the mitigation of greenhouse gas emissions by public and private entities authorized by a Party; (c) To contribute to the reduction of emission levels in the host Party, which will benefit from mitigation activities resulting in emission reductions that can also be used by another Party to fulfil its nationally determined contribution; and (d) To deliver an overall mitigation in global emissions.

Estudos evidenciam que a redução das concentrações de metano afeta diretamente a temperatura próxima à superfície da terra (Jones *et al.*, 2018). Portanto, é necessário controlar a emissão de metano, principalmente na área de resíduos, em que aterros e águas residuais foram responsáveis por aproximadamente 18% das emissões antropogênicas de metano no mundo em 2004 (Rogner *et al.*, 2007).

Com a implementação de CDM *projects*, indicadores de desenvolvimento sustentável foram observados nas áreas econômica, ambiental e social, com aumento na geração de empregos, troca de tecnologia, redução de poluentes, redução da pobreza etc. (UNFCCC, 2011; Olsen; Fenhand, 2008). Além disso, no que tange à gestão de resíduos, a redução de emissões de GEE pode ser alcançada através da reciclagem, incluindo cooperativas informais de catadores (King; Gutberlet, 2013).

O Brasil foi o país que teve o primeiro projeto registrado no mecanismo CDM, em 2004. Foi na área de resíduos, no Rio de Janeiro, no aterro Nova Gerar, localizado no município de Nova Iguaçu. Além disso, é o país da América Latina com mais CDM *projects* registrados, dos quais a maior parte é na área de indústria energética e de gestão de resíduos (UNFCCC, 2019).

Existem 342 projetos registrados no Brasil; desses, 214 são da área de energia e 130 da área de resíduos (Benites-Lazaro; Mello-Théry, 2019) (Figura 1). Ainda há poucos indicadores para medir os cobenefícios dos CDM *projects*, porém há estudos recentes que demonstram benefícios em projetos de aterros sanitários no Brasil. São eles: a) participação de cooperativas e associações de catadores de resíduos nos projetos CDM; b) redução de impactos negativos relacionados a atividades do aterro; c) redução de impactos ambientais na área de entorno do aterro e eficiência no sistema de captura de biogás (Cruz *et al.*, 2017).

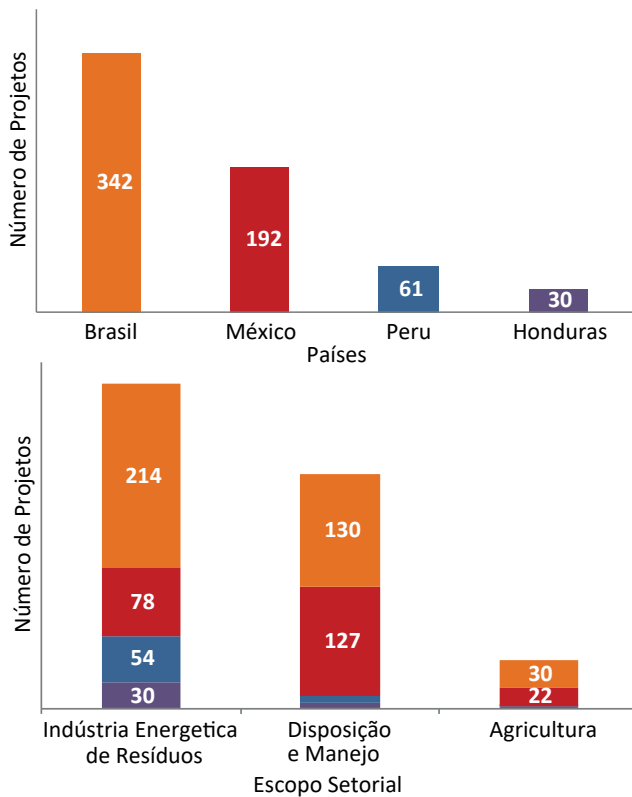


Figura 1. Principais projetos CDM por países e escopo setorial
 Fonte: Adaptado de Benites-Lazaro e Mello-Théry, 2019

O que ainda gera dificuldade em elaborações de novos projetos é a falta de conhecimento dos gestores de aterros, e das entidades públicas responsáveis em relação aos procedimentos para elaboração de projetos. Entretanto, já existem iniciativas do governo federal, como manuais para a elaboração de um *Project Design Document* (PDD), que é o primeiro passo para postulação de projetos CDM (Gomes Neto, 2007).

2.2 Modelo LandGem

Os gases presentes nos aterros são compostos principalmente de metano (40-60%) e dióxido de carbono (40-50%) (Hamini *et al.*, 2012). Para o cálculo dos gases do aterro foi utilizado o modelo LandGem, criado pela EPA. Esse modelo é específico para cálculo de gases em aterros sanitários que recebem resíduos sólidos municipais. O LandGem é baseado em uma equação de decomposição de primeira ordem (Equação 1), segundo a qual conforme há consumo de matéria orgânica, há proporcional produção de metano.

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^1 k L_0 \left(\frac{M_i}{10} \right) e^{-kt_{ij}} \quad (\text{Equação 1})$$

Em que as variáveis são:

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

i = incremento de tempo de um ano;

n = (ano de cálculo) – (ano de início de funcionamento do aterro);

j = 0.1 de incremento de tempo;

k = taxa de geração de metano (year^{-1});

L_0 = potencial de capacidade de geração de metano (m^3/Mg);

M_i = massa de aceitação de resíduos no ano i_{th} (Mg);

t_{ij} = idade da seção j_{th} de massa de resíduos aceito no ano i_{th} (anos decimais, ex., 3.2 anos) (EPA, 2005).

Resíduos orgânicos, como de alimentos ou resíduos de capinagem, contribuem para rápido decaimento de resíduos e alta produção de metano; madeira, papel, borracha e couro contribuem para médio decaimento e baixo decaimento, respectivamente, e não favorecem a produção de metano (Kumar; Sharma, 2014). Já o L_0 está relacionado à umidade do local e à proporção de orgânicos.

O modelo LandGem considera que os gases do aterro são compostos de uma proporção de 50% de metano e 50% de gás carbono, além de traços de outros componentes não metanogênicos (NMOC) (EPA, 2005). Em 2009, foi feito um estudo em que os autores analisaram emissões de 35 aterros canadenses e utilizaram diferentes modelos de estimativa de produção de metano. O modelo se classificou entre os três mais eficazes, com taxas de estimativas conservadoras (Thompson *et al.*, 2009).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

Foi escolhido o aterro municipal de resíduos sólidos MTR Santa Maria Madalena, que está localizado no município de Santa Maria Madalena, no estado do Rio de Janeiro, Brasil (22°2'57.00"S, 41°53'35.16"O).

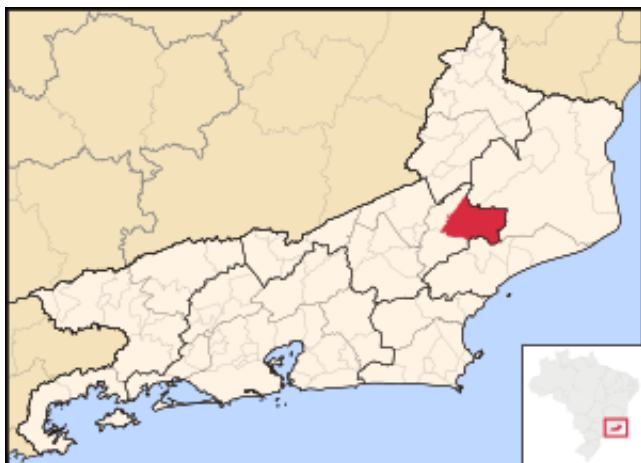


Figura 2. Estado do Rio de Janeiro, destaque do município de Santa Maria Madalena.

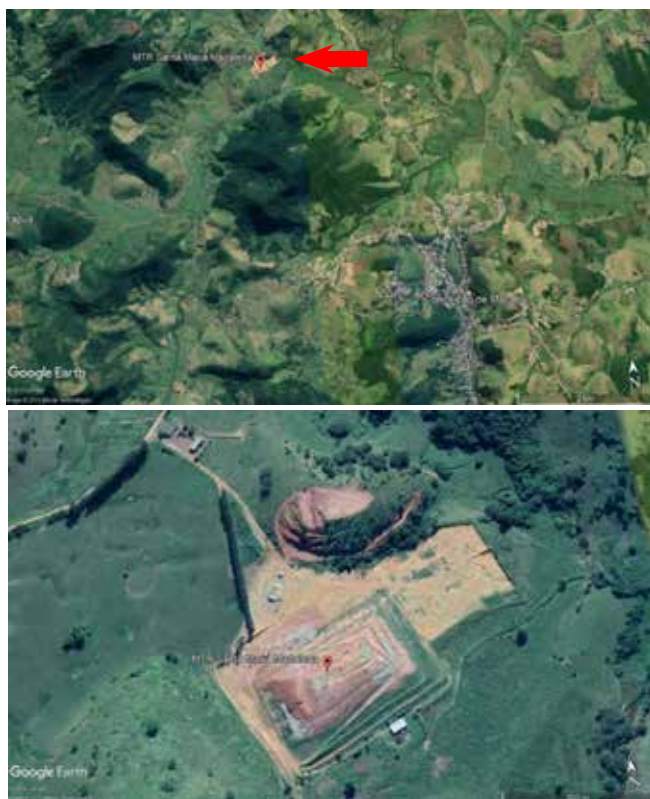


Figura 3. Localização MTR Madalena, 22° 2'57.00"S, 41°53'35.16"O.

Esse aterro não tem nenhuma estrutura para mitigação da liberação de metano e recebe resíduos, através de consórcio municipal, de 11 municípios do interior do estado: Bom Jardim, Cantagalo, Carapebus, Conceição de Macabu, Cordeiro, Duas Barras, Macuco, Quissamã, Santa Maria Madalena, São Sebastião do Alto e Trajano de Moraes. Esses municípios são considerados de pequeno porte, pois possuem populações variando de 5.000 a 25.000 habitantes.

Os resíduos de cidades do interior são altamente orgânicos, o que favorece a produção de metano; no estado do Rio de Janeiro, a proporção de orgânicos das cidades pequenas compreende 56,72% do total de resíduos (Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Estado do Rio de Janeiro, 2013).

Tabela 1. Gravimetria de resíduos de cidades de pequeno porte (até 100 mil habitantes), do interior do estado do Rio de Janeiro, Brasil

Categoria de resíduos	Composição
Matéria orgânica	56,72%
Papel, papelão	13,45%
Plástico	18,63%
Vidro	2,83%
Metal	1,58%
Outros	6,79%

Fonte: Adaptado de Plano Estadual De resíduos Sólidos do Estado do Rio de Janeiro, 2013.

3.2 Parâmetros e dados de entrada no modelo LandGem

Os dados de entrada do modelo, como exposto na Equação 1, são massa total de resíduos recebidos por ano (M_i), taxa de geração de metano (k) e a capacidade de geração de metano (L_0). Os valores de (k) variam de acordo com o pH, temperatura e tipo de resíduo.

3.2.1 Estimativa dos parâmetros

Os parâmetros L_0 e k foram estimados de acordo com as características locais e de proporção de resíduos orgânicos recebidos pelo aterro. A quantidade de orgânicos está diretamente relacionada à capacidade de geração de metano. A EPA e o *Handbook for the Preparation of Landfill Gas to Energy Projects in Latin America and the Caribbean* (World Bank, 2004), fornecem um estudo específico em aterros da América Latina, inclusive de aterros brasileiros, e sugerem que os valores de k e L_0 podem ser adotados de acordo com a precipitação e proporção de orgânicos de resíduos recebidos pelo aterro (Tabela 2).

Como são cidades de pequeno porte que enviam seus resíduos para o local, a gravimetria demonstra que a maior parte dos resíduos são orgânicos (Tabela 1). A partir desses dados, os resíduos foram considerados como moderadamente compostáveis. A precipitação média locacional de Santa Maria Madalena, necessária para estimar o valor do parâmetro k , foi analisada através de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A estação meteorológica de Santa Maria Madalena - A630, apresentou um índice de acúmulo de precipitação de 850 mm no último ano. Portanto, foi adotado um valor de $L_0 = 200$ e $k = 0,05$.



Tabela 2. Estimativa de parâmetros k e L_0 por categoria de resíduos e precipitação anual

Categoria de resíduo	k (ano-1)				L0	
	Precipitação Anual (mm)				Mínimo	Máximo
	<250	250-500	500-1000	>1000		
Relativamente inerte	0,01	0,01	0,02	0,02	5	25
Moderadamente compostável	0,02	0,03	0,05	0,06	140	200
Altamente compostável	0,03	0,05	0,08	0,09	225	300

Fonte: Adaptado de World Bank, 2004

3.2.2 Massa total de resíduos

Estimou-se a quantidade de resíduos recebida pelo aterro, provenientes de cada município. Para isso, utilizou-se dados de produção per capita e populacionais fornecidos pelo Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Rio de Janeiro (PERS), e Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Com dados dos censos populacionais do IBGE, dos anos de 1991, 2000 e 2010, foi possível elaborar uma taxa de crescimento e/ou decréscimo populacional de cada município, utilizando progressão geométrica. Já os dados de geração per capita de resíduos foram retirados do PERS de 2013 (Tabela 3).

Tabela 3. Índice de geração per capita de resíduos municipais.

Município	Índice Geração Per Capita
	(Kg/hab.dia)
Bom Jardim	0,70
Cantagalo	0,68
Carapebus	0,85
Conceição de Macabu	0,76
Cordeiro	0,71
Duas Barras	0,65
Macuco	0,61
Quissamã	0,65
Santa Maria Madalena	0,67
São Sebastião do Alto	0,73
Trajano de Moraes	0,72

Fez-se uma estimativa de resíduos produzidos anualmente por cada município, multiplicando as previsões populacionais municipais anuais pelas produções per capita de resíduos, disponíveis no PERS do estado do Rio de Janeiro (Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Estado do Rio de Janeiro, 2013). A quantidade final disposta no aterro MTR Santa Maria Madalena foi estimada pela soma dos resíduos anuais produzidos por cada município.

As quantidades totais de resíduos estimados anualmente, para uma durabilidade de 20 anos do aterro, que é o tempo estimado de sua atividade, podem ser observadas na Tabela 4. Posteriormente, como dados de entrada no modelo LandGem, foram utilizadas essas quantidades anuais do período de início da sua atividade, em 2007, ao ano previsto de encerramento, 2027.

Tabela 4. Estimativa anual de resíduos encaminhados para o aterro de Santa Maria Madalena

Anos	Produção de resíduo municipal por ano (tonelada)
2007	107864,81
2008	108608,66
2009	109372,56
2010	117490,70
2011	125579,83
2012	127581,58
2013	129647,68
2014	131780,64
2015	133983,11
2016	136257,83
2017	138607,67
2018	141035,59
2019	143544,71
2020	146138,27
2021	148819,62
2022	151592,30
2023	154459,95
2024	157426,39
2025	160495,60
2026	163671,72
2027	166959,07

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Segundo o manual de aplicação de metodologias CDM, o cenário base (BE_y) é o cenário atual do empreendimento; o cenário de projeto (PE_y) é o cenário com o projeto de redução de emissões implantado; e a redução de emissões (ER_y) é a diferença entre as emissões no cenário base e no cenário de projeto (Equação 2) (UNFCCC, 2012).

$$ER_y = BE_y - PE_y \text{ (Equação 2)}$$

Para o cálculo de metano produzido no BE_y , utilizou-se os valores encontrados no LandGem, já que esse modelo de decaimento de primeira ordem foi comprovado mais próximo às reais taxas de geração de metano (Bianek *et al.*, 2018; Thompson *et al.*, 2009). É considerada a constante ,



que representa o potencial de aquecimento global do metano no período de compromisso, para encontrar a quantidade de carbono equivalente ao metano. O valor dessa constante é estabelecido pela Organização das Nações Unidas (ONU), como: $= 21 \times$, ou seja, o CH_4 é 21 vezes mais nocivo que o CO_2 .

É possível capturar cerca de 80% do metano, através do sistema de coleta de gases do aterro, e destruí-los em flares, sendo a eficiência de redução de 90% do metano em flares fechados, e 50% em flares abertos (Tayyeba et al., 2011; UNFCCC, 2006). Para cálculo de CO_2e no PE_v , foi considerado um cenário de projeto com flares fechados.

É possível observar a diferença entre a quantidade de carbono emitido sem a instalação de flares (BE_v) e com a instalação de flares fechados (PE_v). (Tabela 5 e Gráfico 1). O pico de geração de emissão de CO_2e é logo após o fechamento do aterro, em 2028.

Tabela 5. Estimativa de metano gerado anualmente desde 2007 à 2028, com respectivos valores de CO_2e no cenário base e cenário de projeto

Year	Metano (Mg/year)	BE_v	PE_v	ER_v
		CO_2e (Mg/year)	CO_2e (Mg/year)	CO_2e (Mg/year)
2007	0	0	0	0
2008	2520,20	52924,23	14818,78	38105,45
2009	4932,48	103582,04	29002,97	74579,07
2010	7242,52	152092,98	42586,03	109506,94
2011	9455,76	198570,94	55599,86	142971,08
2012	11577,35	243124,44	68074,84	175049,59
2013	13612,23	285856,85	80039,92	205816,93
2014	15565,08	326866,71	91522,68	235344,03
2015	17440,38	366247,93	102549,42	263698,51
2016	19242,38	404090,01	113145,20	290944,81
2017	20975,16	440478,31	123333,93	317144,38
2018	22821,70	479255,64	134191,58	345064,06
2019	24775,74	520290,60	145681,37	374609,23
2020	26683,38	560350,94	156898,26	403452,68
2021	28548,44	599517,20	167864,81	431652,38
2022	30374,63	637867,26	178602,83	459264,43
2023	32165,55	675476,60	189133,45	486343,15
2024	33924,69	712418,39	199477,15	512941,24
2025	35655,41	748763,71	209653,84	539109,87
2026	37361,03	784581,70	219682,88	564898,82
2027	39044,75	819939,73	229583,12	590356,61
2028	40709,69	854903,54	239372,99	615530,55

Considerando as emissões do aterro com a manutenção do cenário atual (BE_v), ou seja, sem nenhum aproveitamento ou destruição do metano, teríamos um total de 854.903,54

mega gramas (Mg) de carbono equivalente (CO_2e) sendo gerados no pico de produção de gases. Já no cenário com o projeto de sistema de flares fechados implementado (PE_v), é possível observar uma redução de 72% na emissão de CO_2e (ER_v), gerando um total de 239.372,99 Mg, em que as emissões evitadas estão diretamente relacionadas à eficiência de captura do sistema e a capacidade dos flares. Após o fechamento do aterro ainda há considerável emissão de gases por cerca de 80 anos.

A ONU classifica como projetos de larga escala quando a diferença entre as emissões anuais de CO_2e no cenário base, que é o cenário atual do aterro (BE_v), e no cenário com projeto implementado (PE_v), são maiores do que 60kt. Portanto, é sugerida a metodologia ACM001, de larga escala, cujo foco é a destruição do GEE (UNFCCC, 2018).

A metodologia ACM001 é direcionada a projetos de captura e combustão de metano de aterros sanitários. São consideradas algumas condições importantes para sua aplicação, como: a) a gestão de resíduos sólidos não deve ser controlada com intuito de gerar mais metano; b) as emissões calculadas para o cenário base (BE_v) devem desconsiderar regulamentações e requisitos legais nacionais de emissão de GEE (não se aplica ao Brasil, pois não há legislação nacional que regulamenta emissões de metano em aterros); c) deve-se considerar o efeito da oxidação do metano no cenário base (BE_v) e a ausência desse efeito no cenário com o projeto implementado (PE_v) (Figura 4 e Figura 5). Os parâmetros a serem monitorados são: a) quantidade de metano capturado; b) fração de metano que compõe os gases emitidos pelo aterro; c) eficiência do flare; d) se houver implantação de projeto de recuperação do metano para geração de eletricidade, deve-se monitorar a geração da energia elétrica; e) monitoramento no caso de uso para abastecimento de gás natural para rede de abastecimento de consumidores, veículos, ou gasoduto.

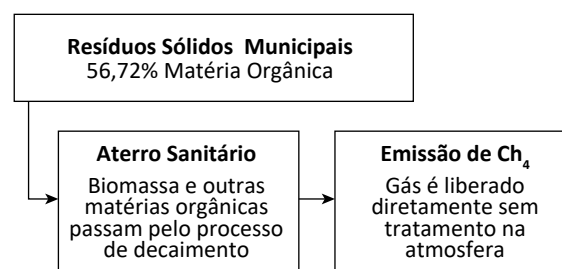


Figura 4. Cenário base em que os resíduos são dispostos no aterro e o metano é liberado diretamente na atmosfera

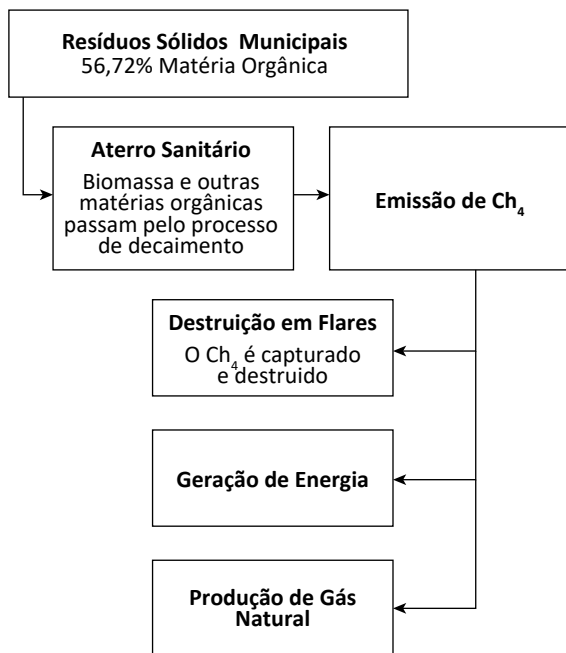


Figura 5. Cenário de projeto em que o metano é capturado e destruído em flares ou utilizado para geração de energia ou na produção de gás natural.

5. CONCLUSÕES

Esse estudo introduz um método que pode ser aplicado a diferentes tipos de aterros em razão da aplicabilidade do modelo LandGem e da apresentação de metodologias nos parâmetros CDM, que são viáveis não somente a gases, como à toda gestão de resíduos.

A análise da literatura e o cálculo da quantidade de gás emitida no aterro de Madalena possibilitaram avaliar características do biogás em aterros de cidades de pequeno porte, assim como vantagens ambientais com a implementação de um projeto de mitigação da emissão de gás metano.

Cidades interioranas possuem uma quantidade de resíduo orgânico consideravelmente alto, o que favorece a produção do metano. Além disso, fatores como alta precipitação na região estudada são favoráveis à produção desse gás.

A legislação brasileira obriga o responsável pelo aterro a continuar o seu gerenciamento mesmo após o seu fechamento. Portanto, aplicar uma metodologia que mitiga o metano produzido seria vantajoso ambientalmente, pois o gás tem o seu pico de produção um ano após o fechamento do aterro, e continua sendo produzido por um período de até 80 anos após o encerramento das atividades.

A gama de metodologias da ONU pode ser aplicada à diferentes tipos de atividades, porém é um tema que necessita

ser explorado pela academia, com abordagem de estudos de casos com aplicações reais e vantagens econômicas para os gestores de aterros sanitários. Do ponto de vista ambiental, o estudo de caso explorado nesse artigo mostrou que a quantidade de CO₂e que deixou de ser emitida somente com a instalação de flares foi alto: em torno de 72%.

Iniciativas que unam o poder público e privado são fundamentais para que esses projetos saiam do papel, bem como parcerias entre os países subdesenvolvidos e desenvolvidos, para que estejam dispostos a financiar as reduções de emissões de GEE.

REFERÊNCIAS

- Barton, R. J., Issaias I., Stentiford I.E. (2008), "Carbon – Making the right choice for waste management in development countries", *Waste Management*, Vol. 28, pp. 690-698.
- Benites-Lazaro, L. L.; Mello-Théry, N. A. (2019), "Empowering communities? Local Stakeholder's participation in the Clean Development Mechanism in Latin America", *World Development*, Vol. 114, pp. 254-266.
- Bianek, J., Schirmer, W. N., Cabral, A. R. et al. (2017), "Comparação entre Metodologias USEPA e IPCC para Estimativa Teórica de Produção de Biogás em Aterro Municipal", *BIOFIX Scientific Journal*, Vol. 3, pp. 34-40.
- Bogner, J., Pipatti, R., Hashimoto, S. et al. (2008), "Mitigation of global greenhouse gas emissions from waste: conclusions and strategies from the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Fourth Assessment Report, Working Group III (Mitigation)", *Waste Management & Research*, Vol. 26, pp. 11–32.
- Brasil (2010), Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF, Diário Oficial da União, 03 ago. 2010.
- Cruz, S., Paulino S., Paiva D. (2017), "Verification of outcomes from carbon market under the clean development mechanism (CDM) projects in landfills", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 142, pp. 145-156.
- Etminan, M., Mhyre, G., Highwood, E. J. (2016), "Radiative forcing of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide: a significant revision of the methane radiative forcing", *Geophysical Research Letters*, Vol. 43, pp. 12614-12623.
- Gao, P., Dai Y., Tong Y. et al. (2015), "Energy matching and optimization analysis of waste to energy CCHP (combined cooling, heating and power) system with energy and energy level", *Energy*, Vol. 79, pp. 522-535.
- Gebert, J.; Grönröft, A. (2006), "Performance of a passively vented field-scale biofilter for the microbial oxidation of landfill methane", *Waste Management*, Vol. 26, pp. 399–407.
- Gomes Neto, O. G. (2007), "Diretrizes para elaboração de propostas de projetos", In: *Mecanismos de Desenvolvimento Limpo aplicado a resíduos sólidos*, Vol. 5, IBAM, Rio de Janeiro.



- Hamini, R. H.; Reinhart R. D.; Mackie R. K. (2012), "Determination of first-order landfill gas modeling parameters and uncertainties", *Waste Management*, Vol. 32, pp. 305-316.
- Jones, A.; Haywood, J. M.; Jones, C. D. (2018), "Can reducing black carbon and methane below RCP2.6 levels keep global warming below 1.5°C?", *Atmospheric Science Letters*, Vol. 19, e821.
- King, F.M.; Gutberlet J. (2013), "Contribution of cooperative sector recycling to greenhouse gas emissions reduction: A case study of Ribeirão Pires, Brazil", *Waste Management*, Vol. 33, pp. 2771-2780.
- Kumar, A.; Sharma P.M. (2014), "Estimation of GHG emission and energy recovery potential from MSW landfill sites", *Sustainable Energy Technologies and Assessment*, Vol. 5, pp.50-61.
- Ministério do Meio Ambiente (2015), *Resíduos Sólidos, Levantamento MMA 2015*.
- Olsen K.H.; Fenhann J. (2008), "Sustainable development benefits of the Clean Development Mechanism projects: A new methodology for sustainable assessment based on text analysis of the project design documents submitted for validation", *Energy Policy*, Vol. 36, pp. 2819-2830.
- Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Estado do Rio de Janeiro (2013), Relatório Síntese, Ministério do Meio Ambiente, Disponível em https://www.mma.gov.br/images/arquivo/80058/PERS/RJ%20PERS_2013ago.pdf [acesso em 09 de maio de 2019]
- Rogner, H-H.; Zhou, D.; Bradley, R. et al. (2007), "Introduction", In: Metz, B., Davidson, O.R., Bosch, P.R. et al. (eds), *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 95-116.
- Tayyeba, O.; Olsson, M.; Brandt, N. (2011), "The best MSW treatment option by considering greenhouse gas emissions reduction: a case study in Georgia", *Waste Management & Research*, Vol. 29, pp. 823-833.
- Thompson, S.; Sawyer, J.; Bonam, R. et al. (2009), "Building a better methane generation model: Validating models with methane recovery rates from 35 Canadian landfills", *Waste Management*, Vol. 29, pp. 2085-2091.
- United Nations Framework Convention on Climate Change – UNFCCC (1998), Kyoto Protocol, United Nations, available at: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf> (Access: 25 Oct. 2018).
- United Nations Framework Convention on Climate Change – UNFCCC (2006), Methodological "Tool to determine project emissions from flaring gases containing methane", Executive Board 28, Meeting Report, Annex 13, available at: <https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAmethodologies/tools/am-tool-06-v1.pdf> (Access: 25 Oct. 2018).
- United Nations Framework Convention on Climate Change – UNFCCC (2011), Benefits of the clean development mechanism, available at: https://cdm.unfccc.int/about/dev_ben/ABC_2011.pdf (Access: 25 Oct. 2018).
- United Nations Framework Convention on Climate Change – UNFCCC (2012), Methodological tool "Project emissions from flaring", Executive Board 68, Meeting Report, Annex 15, available at: <https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAmethodologies/tools/am-tool-06-v2.0.pdf> (Access: 25 Oct. 2018).
- United Nations Framework Convention on Climate Change – UNFCCC (2015), Paris Agreement, available at: https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf (Access: 25 Oct. 2018).
- United Nations Framework Convention on Climate Change – UNFCCC (2018), CDM Methodology Booklet, 10 ed., available at: https://cdm.unfccc.int/methodologies/documentation/meth_booklet.pdf#AMS-III.G. (Access: 08 Mar. 2019).
- United Nations Framework Convention on Climate Change – UNFCCC (2019), Project Search, available at: <https://cdm.unfccc.int/Projects/projsearch.html> (Access: 08 Feb. 2019).
- United States Environmental Protection Agency – EPA (2005), Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User's Guide, EPA-600/R-05/047, available at: <https://www3.epa.gov/ttnatcat1/dir1/landgem-v302-guide.pdf> (Access: 23 Oct. 2018).
- Walther, G.-R.; Post E.; Convey P. et al. (2002), "Ecological responses to recent climate change", *Nature*, Vol. 416, pp. 389-395.
- World Bank (2004), Handbook for the preparation of landfill gas to energy projects in Latin America and the Caribbean, World Bank, available at: <http://documents.worldbank.org/curated/en/954761468011430611/Handbook-for-the-preparation-of-landfill-gas-to-energy-projects-in-Latin-America-and-the-Caribbean> (Access: 03 Nov 2018).

Recebido: 12 dez. 2019

Aprovado: 21 dez. 2019

DOI: 10.20985/1980-5160.2019.v14n4.1596

Como citar: Lattanzi, I. E.; Prata Filho, D. A.; Quelhas, O. L. G. (2019), "Modelagem da geração de biogás aplicando metodologia CDM para redução de emissões de gases de efeito estufa: estudo de caso do Aterro MTR Santa Maria Madalena, RJ, Brasil", *Sistemas & Gestão*, Vol. 14, No. 4, pp. 483-491, disponível em: <http://www.revistasg.uff.br/index.php/sg/article/view/1596> (acesso dia mês abreviado. ano).