

SIMULAÇÃO DA GERAÇÃO DE BIOGÁS: ESTUDO DE CASO ATERRO DE BRUSQUE/ SC

Biogas production' simulation: a case study of landfill in Brusque / SC

Mariane Wolff Pereira¹
Armando Borges de Castilhos Jr²

RESUMO:

Os resíduos sólidos quando tratados por processo anaeróbio, como ocorre em aterros sanitários, resultam na geração de efluentes líquidos e gasosos. O biogás gerado na decomposição possui elevada concentração de metano (45-60%) e gás carbônico (35-50%), apontado como um dos principais responsáveis pelo efeito estufa de origem antropogênica. Porém, o biogás apresenta elevado poder calorífico, podendo ser aproveitado para geração de energia ou de crédito de carbono. Para tanto, faz-se necessário o estudo das emissões deste gás a fim de verificar a viabilidade econômica de seu aproveitamento. O objetivo deste trabalho é identificar por meio de equipamentos analíticos, a composição do biogás e realizar estimativas de geração do mesmo para o aterro sanitário da cidade de Brusque/ SC, utilizando três equações: o Método Inventário do IPCC, Método de Projeto, e modelo LandGEM.

Palavras-chave: Resíduos sólidos urbanos; Aterro sanitário; Biogás.

ABSTRACT:

Solid waste treated by anaerobic processes, as in sanitary landfills, generates liquid and gaseous effluents. Biogas generated from waste decomposition has high concentrations of methane (45-60%) and carbon gas (35-50%), which is currently considered the main anthropogenic cause of the greenhouse effect. In addition, because of its high concentration of methane, biogas also has a high calorific value and can be used for power generation or sale of carbon credits. Therefore, a study on the emissions of this gas proves to be important in an attempt to analyze the economic viability of its use. This study aims to make estimates of the biogas generation at the sanitary landfill of the city of Brusque, Santa Catarina, Brazil. To do so, three equations available in the literature were used to measure the amount of methane emitted by the landfill over the years: the IPCC Inventory Method; the Project Method; and the LandGEM Model.

Keywords: Solid waste urban; Sanitary landfill; Biogas.

¹Universidade Federal de Santa Catarina. marianewolff@gmail.com

²Universidade Federal de Santa Catarina. armando.borges@ufsc.br

PEREIRA, M. W. CASTILHOS JR, A. B. de.

1. INTRODUÇÃO

Uma das técnicas mais utilizadas no Brasil para disposição final e tratamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos urbanos são os aterros sanitários, nesta tecnologia o tratamento acontece principalmente através da decomposição anaeróbia do material orgânico presente na massa de resíduos.

Em um primeiro momento, enquanto há presença de oxigênio, a decomposição acontece por bactérias aeróbicas, sendo dióxidos de carbono, água, nitritos e nitratos os principais subprodutos destas reações. No entanto, na maior parte do tempo, após cessão do oxigênio no meio, predomina a decomposição anaeróbia, os principais produtos resultantes são metano, dióxido de carbono, água, ácidos orgânicos, nitrogênio, amônia, sais de ferro e manganês e sulfato de hidrogênio. (MCBEAN; ROVERS; FARQUAR, 1995).

A taxa de geração e formação dos principais elementos que constituem o biogás varia ao longo do tempo de acordo com a fase de decomposição em que o resíduo se encontra. Segundo ESMAP (2004) a biodegradação biológica em aterros pode ser dividida em cinco fases, conforme ilustrado na Figura 1: fase I – aeróbia; II e III – fases ácidas; fases IV e V metanogênicas.

A Fase I tem seu início imediatamente após a deposição, onde o ar atmosférico está presente na massa de resíduo. À medida que o O₂ vai sendo consumido pelas bactérias aeróbicas, o CO₂ começa a ser gerado como subproduto deste processo. Água, nitritos e sais de ferro formam os produtos finais dessa etapa (CASTILHOS JR et al. 2003).

É importante destacar do quadro 1 em questão, primeiro, a relação de causalidade que está proposta na parte central da mesma. Ou seja, um órgão ambiental capacitado é condição necessária para garantir uma maior efetividade das políticas ambientais e com isto contribuir para a transição para a economia verde e para uma dinâmica sustentável de desenvolvimento. Em segundo plano, há de se atentar para a igual relevância que é dada neste processo a um conjunto de variáveis menos tangíveis que se optou por definir como subjetivas.

O reconhecimento da existência de uma dimensão subjetiva no processo de desenvolvimento de capacidades institucionais, obviamente, tem consequências teóricas e práticas nas discussões e na construção de propostas de capacitação de governos. A primeira delas é o reconhecimento de que para formular qualquer proposta de capacitação é necessário compreender e dimensionar quão relevantes para o alcance dos resultados são essas variáveis subjetivas. A segunda, é a necessidade de ajustar todo o instrumental de diagnóstico, planejamento e gerenciamento dos processos de capacitação para incorporar esta dimensão subjetiva aos processos de decisão. Neste sentido, por exemplo, os indicadores utilizados para mensurar a capacidade instalada de um governo precisariam ser refinados e aprimorados, sob pena de não representarem de modo fidedigno os avanços e os obstáculos do processo de capacitação.

Por fim, um desafio adicional está na necessidade de se convalidarem as relações de causalidade entre as ações de capacitação, o aprimoramento da governança e a promoção do desenvolvimento sustentável, como está sugerido no modelo esquemático apresentado anteriormente, sob pena de se não viabilizar o desenvolvimento de ferramentas capazes de gerenciar os processos de capacitação e seus resultados.

Se do ponto de vista da retórica é relativamente fácil defender a idéia de que a capacitação para boa governança deve ser meio e fim para governos comprometidos com a sustentabilidade, para quem precisa dispor de ferramentas capazes de medir ou avaliar a qualidade da governança, do grau de “esverdeamento” da economia e ou da sustentabilidade do desenvolvimento em um governo ou território, esta circularidade na argumentação é um problema relevante, cujo enfrentamento é condição para avançar a discussão.

PEREIRA, M. W. CASTILHOS JR, A. B. de.

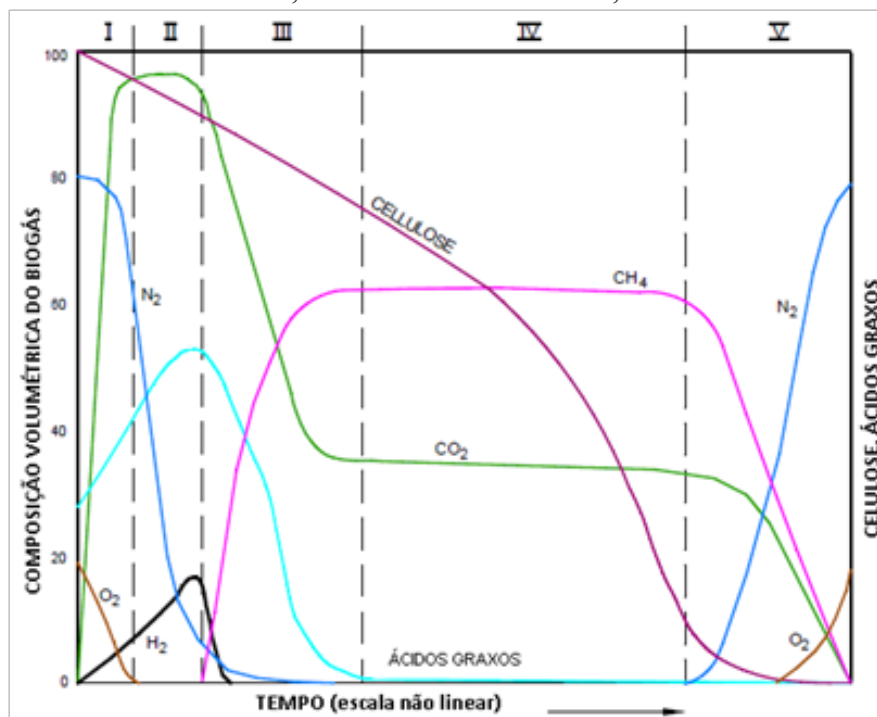


Figura 1: Análise qualitativa da geração dos principais compostos ao longo das fases de degradação.
Fonte: adaptada de ESMAP, 2004.

Nas Fases II e III, a concentração de CO₂ ainda representa a maior parte dos gases gerados no aterro devido aos processos acidogênicos e acetogênicos que resultam na formação de ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono, por este motivo o pH nesta fase encontra-se na banda ácida.

No final da Fase III a população das bactérias metanogênicas começa a crescer, resultando no início da geração de CH₄. A maior concentração de metano no biogás é gerada durante a Fase IV onde se espera encontrar CH₄ e CO₂ nas proporções 45 a 60% e 35 a 50% respectivamente, é a mais longa podendo durar até 40 anos. Na Fase V a concentração destes gases tende a cair devido ao fim da degradação dos resíduos orgânicos (ESMAP, 2004).

2. MODELOS DE GERAÇÃO DE BIOGÁS EM ATERROS SANITÁRIOS

Modelos matemáticos são considerados ferramentas úteis e econômicas para avaliar o potencial de geração de gás em um aterro sanitário, uma vez que seus resultados podem ser utilizados na avaliação do potencial de emissões e da viabilidade de projetos de gestão do biogás. Existem diversos modelos disponíveis que podem ser utilizados para gerar uma curva de produção de biogás ao longo do tempo (ESMAP, 2004).

2.1. Método de Inventário do IPCC

O Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC, em 1996 apresentou um método de cálculo simplificado que permite estimar a emissão de metano a partir de resíduos sólidos.

A quantidade de metano emitido por ano é dada pela equação 1:

$$Q(CH_4) = \frac{R \cdot L_0}{\rho(CH_4)} \quad (1)$$

Onde:

$Q(CH_4)$ = metano gerado por ano (m³ CH₄/ano);

R = quantidade de resíduos depositados por ano (Kg RSU/ano);

PEREIRA, M. W. CASTILHOS JR, A. B. de.

L_0 = potencial de geração de CH₄ dos resíduos sólidos (KgCH₄/KgRSU);

$\rho(\text{CH}_4)$ = massa específica do CH₄ (0,7167 Kg/m³).

O potencial de geração de metano (L_0) é calculado pela equação 2 :

$$L_0 = FMC \cdot COD \cdot CODf \cdot F \cdot \left(\frac{16}{12}\right) \quad (2)$$

Onde:

FMC = fator de correção de metano (adimensional);

COD = carbono orgânico degradável (kg de C/kg RSU);

CODf = fração de COD dissociada (%);

F = fração em volume de metano no biogás (%);

(16/12) = fator de conversão de carbono em metano (KgCH₄/KgC).

Segundo IPCC (1996) o FMC varia de acordo com o local de deposição dos resíduos, e para aterro sanitário é igual a um.

Para estimar a fração de carbono biodegradável (COD) utiliza-se a equação 3 que leva em consideração a composição dos resíduos e a quantidade de carbono em cada componente da massa de resíduos.

Onde:

$$COD = 0,4 \cdot A + 0,17 \cdot B + 0,15 \cdot C + 0,4 \cdot D + 0,3 \cdot E \quad (3)$$

COD = carbono orgânico degradável (kg de C/kg RSU);

Porcentagem em massa: A – papel e papelão, B – podas de parques e jardins, C – restos de alimentos, D – tecidos e E – madeira.

Caso não sejam conhecidas as frações dos resíduos, o IPCC (1996) recomenda utilizar o valor de COD = 12%.

Regattieri (2009) apresenta como valor padrão para fração de COD dissociada (CODf) um valor igual a 77%, e para a fração de metano no biogás 50%. Porém, o CODf pode ser calculado segundo a equação 4, onde T corresponde a temperatura em °C.

$$CODf = 0,014 \cdot T + 0,28 \quad (4)$$

2.2 Modelo LandGEM

Geralmente são utilizados modelos cinéticos de primeira ordem para estimar a produção de metano. Uma série de suposições sobre as condições do local em que o aterro está situado permitem sua adaptação e uso. O modelo de decaimento de primeira ordem empírica mais amplamente aceito e utilizado pela indústria e as agências reguladoras, é o Modelo LandGEM, considerado relativamente simples e direto (SILVESTRE, 2015).

Baseia-se na suposição de que há uma fração constante de material biodegradável no aterro por unidade de tempo, conforme apresentado na equação 5.

$$Q(\text{CH}_4) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 k \cdot L_0 \cdot \left(\frac{mi}{10}\right) \cdot e^{-k \cdot t_{ij}} \quad (5)$$

PEREIRA, M. W. CASTILHOS JR, A. B. de.

Onde:

 $Q(CH_4)$ = metano produzido no ano (m^3/ano); $i = 1$ - incremento de tempo anual; $j = 0,1$ - incremento de tempo anual; k = taxa de geração de metano (ano⁻¹); L_0 = potencial de geração de metano (m^3/t); m_i = massa de resíduos depositada anualmente no aterro (t); t_{ij} = tempo de atividade do aterro e/ou após o fechamento (anos).

O potencial de geração de metano (L_0) depende da composição dos resíduos e das condições do aterro para o processo de decomposição, sendo diretamente proporcional à quantidade de material orgânico presente na massa de resíduos (USEPA, 1991). Na Tabela 1 podem ser visualizados os valores máximos e mínimos sugeridos por ESMAP (2004).

Categorização do resíduo	Valor Mínimo (m^3CH_4/t)	Valor Máximo (m^3CH_4/t)
Relativamente inerte	5	25
Moderadamente degradável	140	200
Altamente degradável	225	300

Tabela 1: Valores sugeridos para L_0 . Fonte: ESMAP (2004).

A constante de decaimento (k) está relacionada com o tempo de geração do biogás, e é influenciada pelos parâmetros teor de umidade, composição dos resíduos, pH, temperatura e disponibilidade de nutrientes para o processo anaeróbico (ESMAP, 2004). Os valores sugeridos para k em função da precipitação anual estão apresentados na Tabela 2.

Precipitação anual (P, em mm)	Material relativamente inerte	Material moderadamente degradável	Material altamente degradável
< 250	0,01	0,02	0,03
250 < P < 500	0,01	0,03	0,05
500 < P < 1000	0,02	0,05	0,08
> 1000	0,02	0,06	0,09

Tabela 2: Valores de k (ano⁻¹), em função da precipitação. Fonte: ESMAP (2004).

2.3 Método de Projeto

Segundo Mendes (2005), este método foi publicado pela United States Environmental Protection Agency-USEPA em 1997 e é indicado para aterros sanitários na fase de projeto. Divide-se em duas etapas, a primeira, equação 6, enquanto o aterro recebe resíduo e a segunda, a equação 7, após seu fechamento.

$Q(CH_4) = F \cdot R \cdot L_0 \cdot (1 - e^{-kt})$	(6)
$Q(CH_4) = F \cdot R \cdot L_0 \cdot (e^{-kc} - e^{-kt})$	(7)

PEREIRA, M. W. CASTILHOS JR, A. B. de.

Onde:

$Q(\text{CH}_4)$ = metano gerado por ano ($\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{ano}$);

F = fração em volume de metano no biogás (%);

R = quantidade de resíduos depositados por ano ($\text{Kg RSU}/\text{ano}$);

L_0 = potencial de geração de CH_4 dos resíduos sólidos ($\text{m}^3\text{CH}_4/\text{KgRSU}$);

k = constante de decaimento (ano^{-1});

c = tempo decorrido desde o fechamento do aterro (ano);

t = tempo decorrido desde abertura do aterro (ano).

A USEPA sugere para este método como valores para constante de decaimento igual a 0,04 ano^{-1} quando precipitação média anual maior que 635 mm e quando menor que esta, $k = 0,02 \text{ ano}^{-1}$. Para potencial de geração de metano, indica utilizar $100 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{tRSU}$ (BORBA, 2006).

3. METODOLOGIA

3.1 Local de estudo

O aterro sanitário objeto de estudo está localizado na região rural do município de Brusque, Santa Catarina e é gerenciado pela empresa Recicle. Atende a demanda de sete municípios da região, além de receber resíduos de algumas empresas particulares. A população total atendida é de 316.716 mil habitantes segundo censo do IBGE 2010

O aterro iniciou operação em 1997 e em 2014 recebia em média 600 toneladas de resíduos sólidos urbanos por dia. Sua expectativa de vida útil é até 2031. Possui todos os elementos de engenharia e controle ambiental necessários a um aterro sanitário.

Em 2015, ano da coleta de dados o aterro possuía 23 drenos de biogás distribuídos em uma área de 117.182 m^2 de disposição.

3.2 Caracterização qualitativa do biogás gerado no aterro sanitário

Para determinar as características de composição dos drenos do aterro de Brusque e fazer uma análise qualitativa do biogás gerado, realizou-se o monitoramento de dois drenos durante dezembro de 2014 e maio de 2015, através de dez campanhas para amostragem.

As concentrações de metano, gás carbônico, oxigênio, monóxido de carbono e ácido sulfídrico, foram medidas utilizando o analisador de gases GEM5000 da empresa Landtec.

Os drenos utilizados no aterro sanitário estudado são construídos de pedra, como mostrado na Figura 2. Dessa forma confeccionou-se uma campânula metálica que permitisse isolar o dreno, fazendo com que o biogás saísse por um único ponto, tornando possíveis as medições.



Figura 2: Procedimentos de amostragem. Fonte: acervo dos autores.

PEREIRA, M. W. CASTILHOS JR, A. B. de.

Os processos para cada medição iniciavam-se no dia anterior, quando a empresa operadora do aterro apagava os drenos utilizados na pesquisa.

Para possibilitar o transporte e a instalação da campânula metálica sob os drenos foi necessária a utilização da retroescavadeira operada pelos funcionários do aterro sanitário. Cuidados foram tomados para que a campânula fosse encaixada no solo, evitando escapamento de biogás por outras saídas.

Depois de instalada a campânula aguardava-se meia hora até que o biogás preenchesse de forma homogênea toda a estrutura e tivesse sua vazão regularizada.

Para realizar as medições com o analisador de gases acoplavam-se ao aparelho duas mangueiras. A transparente é responsável pela sucção do gás, onde a extremidade livre é colocada no ponto onde se deseja fazer a medição como mostra a Figura 2. A outra mangueira, amarela, é a responsável pela saída do gás. Também se conectava ao aparelho um sensor de temperatura.

Antes de cada medição realizava-se uma purga de 30 segundos para evitar interferência nas leituras. O aparelho apresenta os resultados das medições de metano, gás carbônico e oxigênio como porcentagem do volume analisado. A análise do gás sulfídrico é expressa em ppm.

3.3 Estimativa teórica de geração de biogás no aterro

A estimativa teórica do biogás gerado no aterro sanitário foi realizada utilizando três diferentes métodos:

- Método de inventário do IPCC;
- Método de projeto;
- Modelo LandGEM.

O objetivo é além de conhecer o potencial de geração de biogás do aterro, comparar os três métodos adotados. Realizaram-se os cálculos considerando três cenários diferentes para os dados de entrada:

1) Calculou-se a geração de biogás no aterro utilizando como dados de entrada os valores padronizados e indicados na literatura de cada método. O objetivo é conhecer o comportamento de cada um deles caso sejam utilizados em um contexto onde não existam muitas informações preliminares sobre o aterro.

2) As três fórmulas foram aplicadas utilizando os dados obtidos para o aterro sanitário de Brusque, considerado para o valor de potencial de geração de metano (L0), o resultado encontrado por Silvestre (2015), através de um ensaio de atividade metanogênica (BMP), utilizando resíduos do mesmo aterro.

Uma vez que este valor de L0 utilizando resíduos do aterro de Brusque encontra-se abaixo do esperado e apresentado por outros autores em literatura optou-se por simular um terceiro cenário com outro valor de potencial de geração de metano.

3) Por fim, o método de projeto e o modelo LandGEM foram aplicados com os dados obtidos para o aterro em estudo, mas utilizando-se o valor de L0 obtido através de ensaio BMP por Santos et al. (2012) para resíduos do Aterro Sanitário Metropolitano de Salvador.

Para realizar os cálculos através do Inventário do IPCC e Método de Projeto, as equações citadas anteriormente foram aplicadas no software Excel. O modelo de decaimento de primeira ordem utilizado é o LandfillGasEmissionsModel(LandGEM), versão 3.02 está disponível para download online e foi desenvolvido pela United States Environmental Protection Agency(USEPA). É uma ferramenta automática de estimativa de geração de biogás.

4. RESULTADOS

4.1 Medições em campo dos gases emitidos pelos drenos

A Tabela 3 apresenta os resultados das análises estatísticas para estes drenos. O tamanho da população da amostra é 44 e o nível de confiança para o cálculo dos intervalos igual a 95%.

PEREIRA, M. W. CASTILHOS JR, A. B. de.

Medidas	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	H ₂ S (ppm)	CO (ppm)	T (°C)
Média:	48,8	34,8	4,4	10,6	3,2	33
Desvio padrão:	6,4	5,0	2,1	22,9	1,3	11
Coeficiente de variação:	13,1	4,3	48,0	216,5	40,8	34
Máximo:	58,4	44,2	9,6	114,0	8,0	68
Mínimo:	34,7	4,2	0,1	0,0	1,0	21
Intervalo de confiança:	1,9	1,5	0,6	6,8	0,4	3
(+) Intervalo de confiança:	50,7	6,3	5,0	17,3	3,6	37
(-) Intervalo de confiança:	46,9	3,4	3,8	3,8	2,8	30

Tabela 3: Resultados das análises estatísticas para os drenos 1 e 2. Fonte: elaborada pelos autores.

Observa-se grande variabilidade nos dados referentes às amostras de O₂, CO e principalmente H₂S. Nota-se uma correlação com as análises mais altas de H₂S e CO e mais baixos de O₂ como pode ser observado no Tabela 4:

Data	Dreno	H ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	H ₂ S (ppm)	CO (ppm)	T (°C)
2/dez	1	3,4	36,6	2,4	71,0	8,0	67,0
5/mar	2	7,0	42,9	0,1	114,0	7,0	60,9
4/abr	2	7,8	41,4	0,8	88,0	6,0	65,7

Tabela 4: Valores discrepantes de O₂, H₂S e CO. Fonte: elaborada pelos autores.

Nesses dias específicos de amostragem estes drenos não haviam sido apagados anteriormente pela empresa responsável pelo aterro e foram apagados no momento da chegada da equipe no local, gerando uma grande quantidade de calor e vapor, como pode ser observado na Figura 2. Considerando que os valores de H₂S maiores que 70 ppm ocorreram apenas nesses dias e nessas circunstâncias, é possível inferir uma correlação entre estes fatores. As temperaturas nestas amostragens encontram-se consideravelmente mais altas que a média encontrada de 33°C.

Ainda em relação à temperatura, é possível afirmar que a região do aterro em que se encontram os drenos 1 e 2 estão atuando as bactérias mesófilas que segundo Silva (2002) são capazes de se multiplicar entre 10°C e 45°C, sendo a temperatura ideal em torno de 30°C.

4.2 Simulações de geração de biogás

Um dado de entrada comum a todos os cenários e métodos é a projeção massa de resíduos recebida pelo aterro até o ano de fechamento. Para tal considerou-se a média ponderada das taxas de crescimento populacional das cidades que utilizam o aterro para destinação final de seus resíduos. As taxas utilizadas têm como base o crescimento entre os anos 2000 e 2010 fornecidos no último censo do IBGE (2010), o resultado é igual a 3,6% ao ano.

Para esta projeção considerou-se que a taxa de crescimento da disposição anual dos resíduos é igual à taxa de crescimento populacional, assumindo que a quantidade de resíduo por habitante não variou ao longo desses anos.

Estima-se que o aterro receberá até o ano 2031 um total de 6.224.360 toneladas de resíduos.

1) Para o primeiro cenário de cálculos no software LandGEM na aba “user inputs” o usuário tem a opção de determinar como parâmetros do modelo os valores padrões com duas opções, aterro convencional e aterro em

PEREIRA, M. W. CASTILHOS JR, A. B. de.

área árida. Adotou-se no modelo os valores para aterro convencional

Os dados de entrada são apresentados no Quadro 1.

Método: Inventário do IPCC			
Porcentagem de CH ₄ no biogás	F	50	% de CH ₄
Temperatura na zona anaeróbia	T	35	°C
Carbono orgânico degradável	COD	12	Kg C/kg RSU
Fração de COD dissociada	COD _f	77	(%)
Método: Método de Projeto			
Constante de decaimento	k	0,04	1/ano
Potencial de geração de metano	L ₀	100	m ³ de biogás/kgRSU
Porcentagem de CH ₄ no biogás	F	50	% de CH ₄
Método: LanGEM			
Constante de decaimento	k	0,05	1/ano
Potencial de geração de metano	L ₀	170	m ³ de biogás/kgRSU
Porcentagem de CH ₄ no biogás	F	50	% de CH ₄

Quadro 1: Dados de entrada para o cenário 1. Fonte: elaborada pelos autores.

2) No segundo cenário na falta de um estudo de composição gravimétrica para os resíduos do aterro avaliado, considerou-se o realizado pela Companhia de melhoramento da Capital – Comcap, para Florianópolis/SC, cidade próxima a Brusque. Os resultados de composição gravimétrica para os componentes considerados no Método de Inventário do IPCC podem ser vistos no Quadro 2.

Método: Inventário do IPCC			
Porcentagem de CH4 no biogás	F	48,8	% de CH ₄
Temperatura na zona anaeróbia	T	33	°C
Composição gravimétrica dos resíduos:			
Papel e papelão	14,3	%	
Resíduos de poda	9,26	%	
Restos de alimentos	37	%	
Têxteis e couro	3,64	%	
Madeira	0,89	%	
Método: Método de Projeto e Modelo LandGEM			
Constante de decaimento	k	0,06	1/ano
Potencial de geração de metano	L ₀	20,61	m³de biogás/kgRSU
Porcentagem de CH4 no biogás	F	48,8	% de CH ₄

Quadro 2: Dados de entrada para o cenário 2. Fonte: elaborada pelos autores.

3) Para o terceiro cenário, utilizaram-se os mesmos valores para constante de decaimento e fração de metano no biogás que o cenário anterior, diferenciando o potencial de geração do metano. Os valores são apresentados no Quadro3 a seguir:

PEREIRA, M. W. CASTILHOS JR, A. B. de.

Método: Método de Projeto e Modelo LandGEM			
Constante de decaimento	k	0,06	1/ano
Potencial de geração de metano	L_0	83,83	m ³ de biogás/kgRSU
Porcentagem de CH ₄ no biogás	F	48,8	% de CH ₄

Quadro 3: Dados de entrada para o cenário 3. Fonte: elaborada pelos autores.

4.2.1 Resultados dos modelos

Ao aplicar para os três métodos os valores de dados de entrada sugeridos pelas metodologias próprias de cada um deles, observa-se que a curva de geração de metano para o Método de Projeto fica consideravelmente menor aos resultados apresentados pelo Inventário do IPCC e Modelo LandGEM. Esse fato pode ser explicado pela constante de decaimento e o potencial de geração de metano sugerido para o Método de Projeto serem inferiores aos utilizados pela metodologia Scholl Canyon por IPCC (1996). Os resultados podem ser observados na Figura 3.

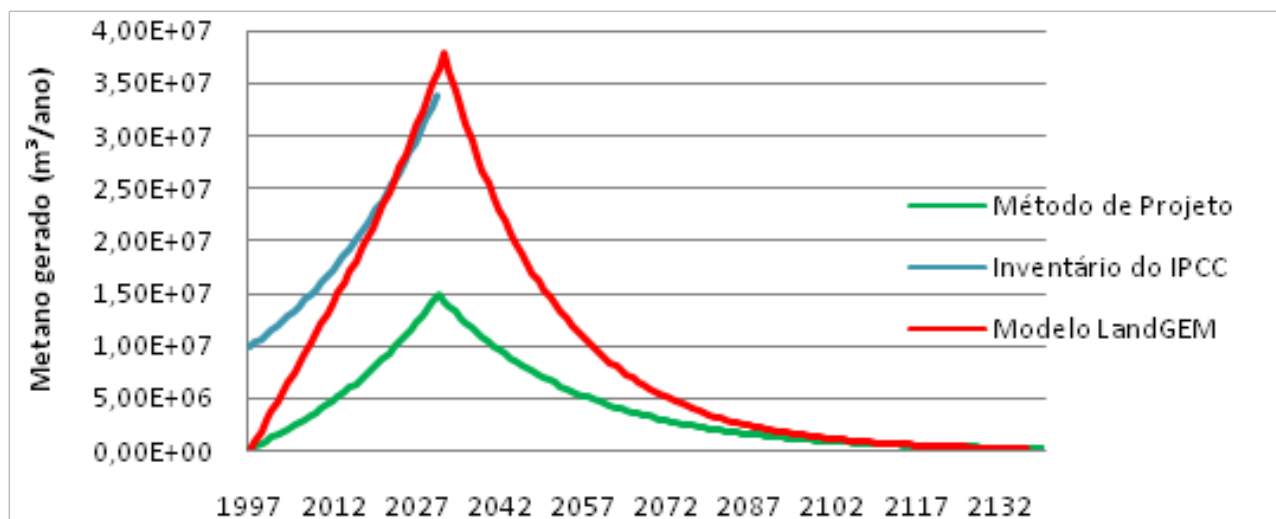


Figura 3: Curvas de estimativa de geração de metano cenário 1. Fonte: elaborada pelos autores.

A geração máxima obtida pelo modelo LandGEM neste cenário é 3,79.107m³ e ocorre no ano de 2032, 1 ano após fechamento do aterro. A geração máxima no Inventário do IPCC é 3,38.107. Para o Método de Projeto, a geração máxima é inferior e igual a 1,48.107, no ano de 2031, como pode ser visto na Figura 4.

Observa-se que pelo fato do Método do Inventário do IPCC não ter decaimento e não estimar a geração de metano após o encerramento das atividades de recebimento de resíduos no aterro torna-se difícil comparar os resultados obtidos por ele com os demais métodos.

Para o cenário 2, onde o Método de Projeto e Modelo LandGEM foram calculados utilizando o mesmo valor de constante de decaimento e potencial de geração de metano igual a 20,61 m³CH₄/tRSU, permaneceu a tendência de valores superiores para a curva do método Scholl Canyon que no Método de Projeto. As curvas são apresentadas na Figura 4.

PEREIRA, M. W. CASTILHOS JR, A. B. de.

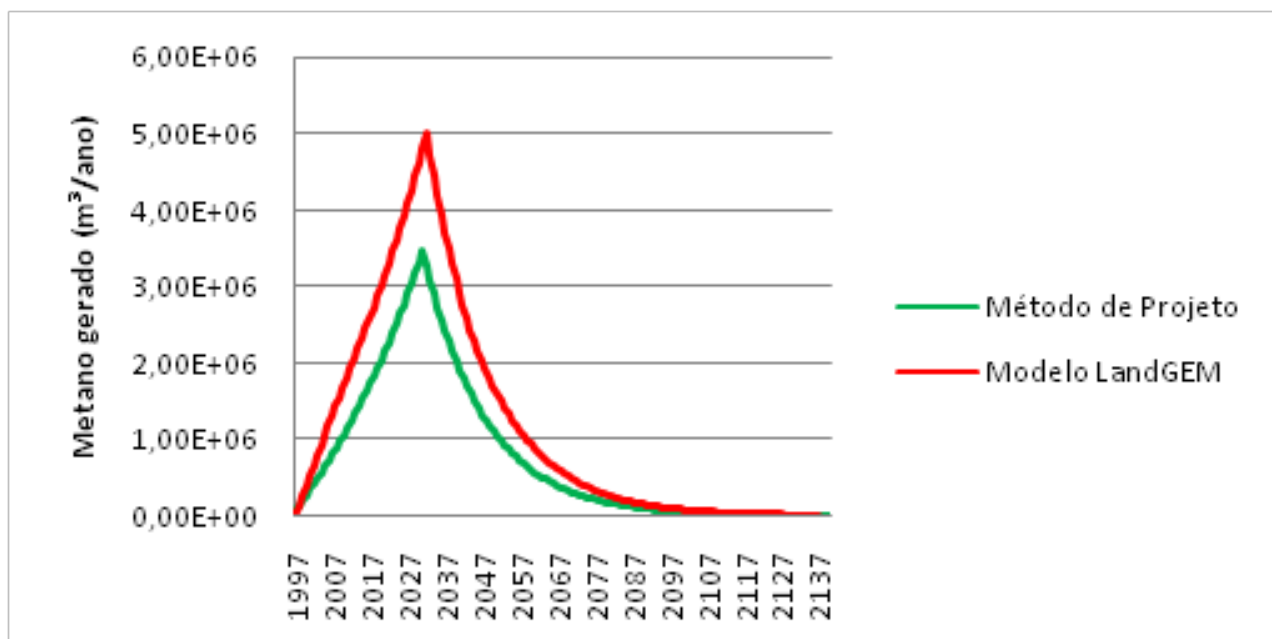


Figura 4: Curvas de estimativa de geração de metano cenário 2. Fonte: elaborada pelos autores.

Nesse cenário a estimativa de geração máxima para o Modelo LandGEM é 5,02.106 m³CH₄ no ano 2032. Já para o Método de Projeto é 3,4.106 m³CH₄ em 2031, 1,62.106 vezes menor que o primeiro. No Inventário do IPCC a geração de metano foi consideravelmente superior, igual a 3,87.107.

Ao se manter a constante de decaimento do cenário 2 e utilizar o potencial de geração de metano de 83,83 m³CH₄/tRSU, a o pico da curva de estimativa aumenta consideravelmente em relação ao cenário anterior, como pode ser observado na Figura 5 a seguir.

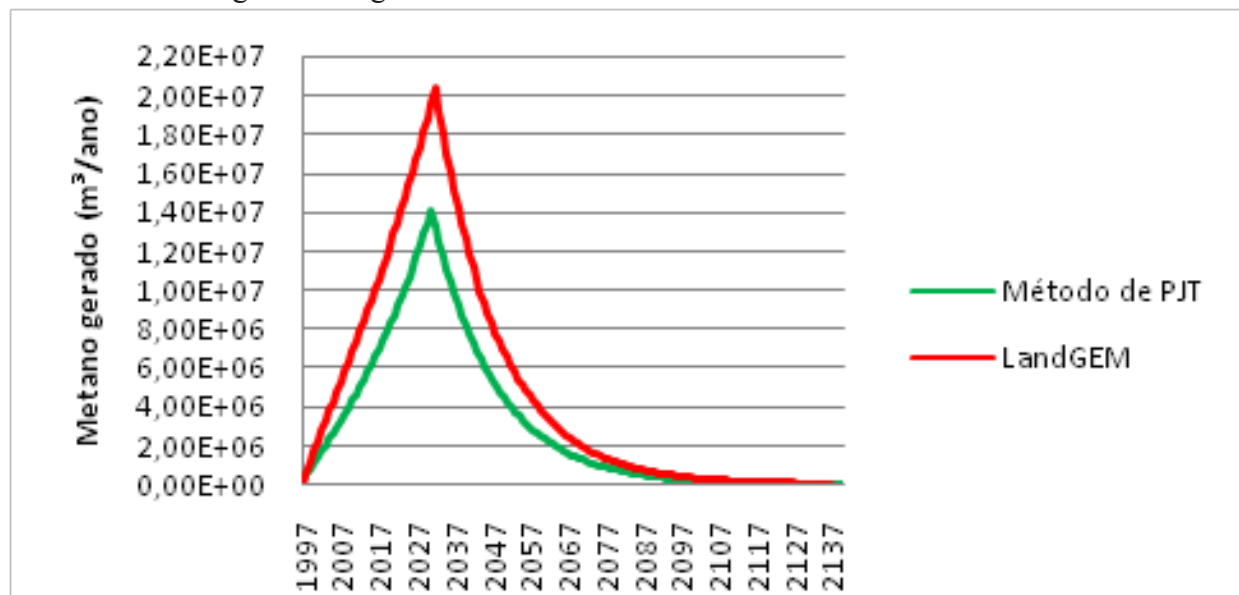


Figura 5: Curvas de estimativa de geração de metano cenário 3. Fonte: elaborada pelos autores.

A geração máxima dada pelo Software do Modelo LandGEM é igual a 2,04.107 m³CH₄/tRSU, enquanto para o Método de Projeto é 1,41.107 m³CH₄/tRSU, sendo 6,30.106 a diferença entre as duas estimativas.

Observa-se através dos resultados obtidos que a variável potencial de geração de metano L0 exerce grande influência nas curvas de estimativa de geração de metano, sendo imprescindível prudência na escolha do valor adotado.

Ao comparar as diferenças dos resultados obtido no cenário 1 com cenário 2 e 3 para os dois métodos com decai-

PEREIRA, M. W. CASTILHOS JR, A. B. de.

mento, observa-se que as diferenças são menores para o Método de Projeto. Dessa maneira, pode-se inferir que na falta de informações específicas mais detalhadas do aterro em estudo, utilizar os valores sugeridos por esta metodologia tende a garantir resultados mais aproximados e mais conservadores de geração de metano.

Por outro lado, o Modelo LandGEM apresenta maior complexidade de cálculo e possibilidades de simulação maiores que as outras equações utilizadas, e por isso é um modelo de uso mais recomendado pela USEPA e Banco Mundial.

A falta de padronização de utilização dos métodos permite que o usuário escolha àquele que entregue resultados que influenciem favoravelmente uma tomada de decisão, de acordo com suas pretensões.

O ideal é que a apresentação dos resultados venha acompanhada da justificativa para escolha do método de estimativa utilizando, tanto para avaliação do potencial poluidor do aterro, quanto para estudos de avaliação de capitação do biogás para geração de energia ou mercado de crédito de carbono.

5. CONCLUSÕES

Observa-se que a metodologia do Inventário do IPCC é adequada somente para utilizar em aterros ativos, uma vez que não leva em consideração o metano gerado após encerrar o recebimento de resíduos.

A utilização dos modelos aplicando os dados padronizados e não específicos para o aterro em estudo, mostrou uma tendência a superestimar a geração de metano, sendo que o Método de Projeto oferece resultados mais conservadores que o Modelo LandGEM.

Observou-se que o valor de potencial de geração de metano utilizado interfere muito na curva final obtida, devendo-se tomar cuidado especial ao adotar esta variável. Ao utilizar no Modelo LandGEM $L_0 = 20, 61 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{tRSU}$ estimou-se que o aterro emitiria em 140 anos um total de $1,66.108 \text{ m}^3\text{CH}_4$. Ao modelar com $L_0 = 83,83 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{tRSU}$ o resultado final de emissão é $6,74.108 \text{ m}^3\text{CH}_4$.

É recomendado o desenvolvimento de pesquisas que permitam a padronização de utilização dos métodos, uma vez que, a escolha da metodologia adotada é fator importante nos resultados obtidos.

PEREIRA, M. W. CASTILHOS JR, A. B. de.

REFERÊNCIAS

- BORBA, S. M. P. **Análise de Modelos de Geração de Gases em Aterros Sanitários**: Estudo de Caso [Rio de Janeiro]. (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil, 2006), Dissertação – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2006. 134 p.
- COMCAP; OROFINO, F. V. G. (Org.). **CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DE FLORIANÓPOLIS**: Relatório final. Florianópolis, 2002. 112 p.
- CASTILHOS JR, A. B.; MEDEIROS, P. A.; FIRTA, I. N.; LUPATINI, G.; SILVA J. D. Principais processos de degradação de resíduos sólidos urbanos. In: CASTILHOS JR, A. B. (Coord). **Resíduos Sólidos Urbanos: Aterro Sustentável para municípios de pequeno porte**. Rio de Janeiro: ABES, RIMA, 2003. p. 19-50.
- ENERGY SECTOR MANAGEMENT ASSISTANCE PROGRAMME (ESMAP). **The world bank handbook for the preparation of landfill gas to energy projects in Latin America and the Caribbean**. Waterloo, Ontario, 2004.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Demográfico 2010**. Diretoria de Pesquisas, Departamento de População e Indicadores Sociais, Brasília, 2010.
- IPCC - International Panel on Climate Change. Guidelines for National. **Greenhouse Inventories**: Reference Manual (Vol.3), 1996.
- MCBEAN, E. A.; ROVERS, F. A.; FARQUAR, G. J. **Solid waste landfill engineering and design**. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ 07458, 1995. 521p.
- MENDES, L. G. G; MAGALHÃES SOBRINHO, P. Métodos de estimativa de geração de biogás em aterro sanitário. **Revista Ciências Exatas**, Taubaté, v. 11, n. 2, p.711-76, 2005.
- REGATTIERI, C. R. **Quantificação de emissão de biogás em aterro sanitário**: Estudo de caso do aterro sanitário de São Carlos. 2009. 138 f. Tese (Doutorado) - Curso de Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.
- SANTOS, Átila Caldas et al. **Estimativa da geração de metano em aterro sanitário utilizando a composição de Resíduos Sólidos Urbanos e ensaios de BMP**. Salvador, 2012. p. 1 - 8.
- SILVA, M. C. **Avaliação da qualidade microbiológica de alimentos com a utilização de metodologias convencionais e do sistema Sim Plate**. São Paulo. Dissertação (Mestrado)- Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 2012.
- SILVESTRE, V. V. **LEVANTAMENTO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS DE ATERRO SANITÁRIO PARA APROVEITAMENTO SOB A FORMA DE ENERGIA ELÉTRICA**. 2015. 109 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Programa de Pós – Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.
- UNITED STATES ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY (USEPA). **Air emissions from municipal solid waste landfills – background information for proposed standards and guidelines**. Emissions Standards Division. EPA-450/3-90-011a. 1991.