

Artigo Técnico

Emissão de gases do efeito estufa de um aterro sanitário no Rio de Janeiro

Greenhouse gases emissions from a landfill in Rio de Janeiro

Priscila Falcão de Sá Borba¹, Eduardo Monteiro Martins², Sergio Machado Correa³, Elisabeth Ritter⁴

RESUMO

A emissão de metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂) em aterros sanitários representa uma das mais importantes fontes de gases de efeito estufa em regiões metropolitanas. O presente trabalho quantificou a taxa de emissão de gases do efeito estufa (GEEs) pela camada de cobertura intermediária do aterro sanitário de Seropédica, Rio de Janeiro, Brasil, assim como a concentração desses gases na atmosfera acima das células do aterro. Um total de 21 amostras na camada de cobertura e 31 na atmosfera acima do aterro foi coletado. Foram utilizadas duas câmaras de fluxo de 0,66 m² de área e 33,2 L de volume, e amostras foram retiradas com seringas de polipropileno de 60 mL em intervalos de 5 minutos, durante 15 minutos. As amostras foram coletadas em locais com e sem fissura na camada de cobertura intermediária. A análise das amostras foi feita por cromatografia de fase gasosa, por múltiplos detectores. As taxas de emissão dos GEEs observadas variaram entre 0,1 e 575,0 g m⁻² dia⁻¹ para CH₄ e entre 0,1 e 316,0 g m⁻² dia⁻¹ para CO₂. As concentrações no ar ambiente variaram entre 3,5 e 1500 ppm e entre 333 e 655 ppm, para CH₄ e CO₂, respectivamente. As maiores emissões foram constatadas nos pontos que continham as maiores fissuras no momento da coleta.

Palavras-chave: gás de aterro; gases de efeito estufa; emissões; aterro sanitário; camada de cobertura intermediária.

ABSTRACT

The emission of methane (CH₄) and carbon dioxide (CO₂) from landfills is one of the most important sources of greenhouse gases in metropolitan areas. This study quantified the emission rate of greenhouse gases (GHGs) by the intermediate cover layer of Seropédica landfill, in Rio de Janeiro, Brazil, as well as the concentration of these gases in the atmosphere above the landfill cells. A total of 21 samples from the cover layer and 31 samples from the atmosphere above the landfill was collected. Two flow chambers with 0.66 m² and 33.2 L were used, and the samples were collected with 60 mL polypropylene syringes at five-minute intervals, for 15 minutes. The samples were collected in areas with and without cracks in the intermediate cover layer. Sample analysis was performed by gas chromatography, by multiple detectors. GHGs emission rates varied from 0.1 to 575.0 g m⁻² day⁻¹ for CH₄ and 0.1 to 316.0 g m⁻² day⁻¹ for CO₂. The ambient air concentrations ranged from 3.5 to 1500 ppm and 333 to 655 ppm for CH₄ and CO₂, respectively. Higher emissions were found in areas containing the larger cracks at the time of collection.

Keywords: landfill gas; greenhouse gases; emissions; landfill; intermediate soil cover.

INTRODUÇÃO

Os aterros sanitários são, atualmente, a forma de disposição de resíduos sólidos mais utilizada em diversos países (YANG *et al.*, 2014), inclusive no Brasil. Entre suas características construtivas, um aterro sanitário deve conter estruturas de drenagem e de tratamento de gases e lixiviado, drenagem superficial de águas pluviais, impermeabilização da fundação e camada de cobertura diária, intermediária e final dos resíduos (ABNT, 1984; 1997; 2010).

Quando se utiliza esse tipo de disposição, os resíduos são aterrados e as frações biodegradáveis se decompõem por meio de uma

complexa série de reações microbianas e químicas, além de alterações físicas, sendo o resultado final a produção do biogás (SPOKAS *et al.*, 2006). O biogás é constituído basicamente de metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) e gases traços, tais como diversos compostos orgânicos voláteis não metânicos, que podem ser tóxicos (HRAD *et al.*, 2012). O CH₄ e o CO₂ são os principais gases indutores do aumento do efeito estufa no planeta (ARONICA *et al.*, 2009).

De acordo com Bogner *et al.* (2008), a emissão do CH₄ no setor dos resíduos equivale a 18% das emissões antropogênicas de CH₄ em todo o mundo. A estimativa é que sejam emitidas de 35 a 69 toneladas de CH₄

¹Doutoranda, Departamento de Engenharia Sanitária, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) - Rio de Janeiro (RJ), Brasil.

²Professor Adjunto, Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente, UERJ - Rio de Janeiro (RJ), Brasil.

³Professor Associado, Faculdade de Tecnologia, UERJ - Rio de Janeiro (RJ), Brasil.

⁴Professora Associada, Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente, UERJ - Rio de Janeiro (RJ), Brasil.

Endereço para correspondência: Priscila Falcão de Sá Borba - Rua São Francisco Xavier, 524, sala 5029-F - Maracanã - 20550-900 - Rio de Janeiro (RJ), Brasil - E-mail: borba_priscila@outlook.com.br

Recebido em: 02/08/16 - **Aceito em:** 22/12/16 - **Reg. ABES:** 167438

para a atmosfera por meio dos aterros sanitários. Assim, são fundamentais a determinação das taxas de emissão em diferentes aterros sanitários do mundo; estudos de dispersão; avaliação dos impactos ambientais; e avaliação das medidas mitigadoras propostas para minimizar os impactos ao meio ambiente (DI BELLA; DI TRAPANI; VIVIANI, 2011).

A emissão de biogás em aterro sanitário depende de diversos fatores, como as características climáticas locais, a eficiência do sistema de captação de gases e da camada de cobertura e a composição gravimétrica dos resíduos aterrados (BÖRJESSON; SUNDH; SVENSSON, 2004; STERN *et al.*, 2007; SCHEUTZ *et al.*, 2011; LOREIRO; ROVERE; MAHLER, 2013).

As camadas de cobertura têm como uma de suas funções conter a passagem dos gases formados para a atmosfera (STAUB *et al.*, 2011); elas podem ser constituídas por um solo de baixa permeabilidade ou até mesmo geossintético. Porém, mesmo com a aplicação dessas estruturas, a emissão de gases é observada em diversos aterros (SPOKAS *et al.*, 2006; ZHU *et al.*, 2013; SCHROTH *et al.*, 2012; SCHEUTZ *et al.*, 2014; MACIEL; JUCÁ, 2011; DI BELLA; DI TRAPANI; VIVIANI, 2011; SILVA; FREITAS; CANDIANI, 2013). Além disso, devido às características da disposição de resíduos aplicada no Brasil, os aterros sanitários têm grandes dimensões e utilizam camadas de cobertura intermediária por longos períodos, chegando a dois ou três anos.

O objetivo deste trabalho foi quantificar as emissões de GEE na camada de cobertura intermediária e as concentrações na atmosfera do maior aterro sanitário em operação do estado do Rio de Janeiro, situado no município de Seropédica.

METODOLOGIA

O local de estudo foi a Central de Tratamento de Resíduos Sólidos (CTR) de Seropédica, que está situada no estado do Rio de Janeiro e possui área útil de cerca de 2.226.000 m².

A CTR recebe resíduos dos municípios de Seropédica, Itaguaí e Rio de Janeiro, com uma média atual de 14 mil toneladas por dia. A composição gravimétrica dos resíduos sólidos gerados no município do Rio de Janeiro é formada por matéria orgânica putrescível (55%), materiais plásticos (18%) e papéis e papelões (16%), que constituem cerca de 90% do lixo domiciliar. Os outros 10% são compostos principalmente de vidro, metais e folhas (RIO DE JANEIRO, 2012).

Os estudos foram realizados na célula 1 da CTR, onde foram dispostos resíduos entre os anos de 2011 e 2013, abrangendo uma área superficial de pouco mais de 140.000 m² e 80 poços verticais de biogás, com distância média de 60 m entre si. No momento da coleta das amostras, apenas cerca de 40% dos poços verticais estavam operando com captação ativa dos gases, os quais se localizavam nos taludes e nas bermas da célula. Os drenos de captação passiva se situavam no platô superior da célula.

Essa célula tinha 65 m de altura e previsão de atingir 110 m ao fim das atividades no local. As amostras de gás foram coletadas em seu platô superior, caracterizado por uma área aproximada de 85.000 m², representando cerca de 60% da área total da célula, como apresentado na Figura 1.

Durante a operação da CTR de Seropédica, a cobertura diária das células de resíduos é realizada com uma camada de solo de 50 cm de espessura. O solo utilizado como camada de cobertura intermediária foi classificado como areia siltosa, contendo 60,0% de areia, 30,0% de silte e 10,0% de argila, com índice de plasticidade de 22,1% e resultados de ensaio de compactação Proctor Normal indicando massa específica seca máxima de 15,19 kN m⁻³ e umidade ótima de 23,5% (JOAQUIM JR. *et al.*, 2015). Em pesquisa efetuada em uma célula experimental dentro da área de estudo, verificou-se que a massa específica *in situ* era de 12,39 kN m⁻³, indicando um grau de compactação da camada de cobertura de 92% (JOAQUIM JR. *et al.*, 2015).

A escolha dos pontos para a coleta de gases na camada de cobertura intermediária do platô superior da célula 1 foi realizada levando em consideração imperfeições existentes, de maneira a recobrir a maior área total do aterro (SILVA; FREITAS; CANDIANI, 2013). Com isso, foram coletadas amostras em pontos com fissuras e onde a superfície da camada estava íntegra (DEVER *et al.*, 2013). Na Figura 2 é apresentado o posicionamento dos pontos de amostragem na camada de cobertura, GEE CL1 a GEE CL 21, na cor preta. Ressalta-se que tais pontos se localizavam entre poços de captação passivos de gases. Foram coletadas amostras de GEE em 21 pontos na camada de cobertura e em 31 locais no ar acima da célula do aterro.

As amostras foram coletadas entre os meses de julho de 2014 e janeiro de 2015, em dias com diferentes condições climáticas. Na Tabela 1 é apresentado o resumo das características meteorológicas do aterro



Figura 1 – Área de coleta de amostras no aterro sanitário de Seropédica.

nos dias de coleta. As amostras coletadas nos meses de julho, agosto e setembro de 2014 ocorreram em dias de sol entre nuvens, sendo observada a ocorrência de chuva nos dias anteriores. A coleta realizada em outubro de 2014 ocorreu em um dia com grande intensidade de vento e umidade relativa do ar mais baixa; a temperatura foi se elevando ao longo do dia, chegando a 40,8°C. As coletas de novembro de 2014 foram as únicas realizadas com chuva, umidade relativa elevada, temperatura amena e ausência de vento, em alguns momentos do dia. A coleta de janeiro de 2015 foi caracterizada por elevadas temperaturas e umidade relativa baixa, com sol e formação de poucas nuvens ao longo do dia.

A coleta de amostras de gases na camada de cobertura foi realizada utilizando duas câmaras de fluxo (HRAD; HUBER-HUMER; REICHENAUER, 2012; SAQUING *et al.*, 2014; DI TRAPANI; DI BELLA; VIVIANI, 2013; MACIEL; JUCÁ, 2011) quadradas e metálicas, com altura de 5 cm, área de 0,66 m² e volume de 33,2 L (SILVA; FREITAS; CANDIANI, 2013), segundo o desenho esquemático apresentado na Figura 3.

Para a amostragem dos GEE foram utilizadas seringas de polipropileno de 60 mL equipadas com válvula de abre-e-fecha. As amostras foram coletadas em intervalos de 5 minutos, sendo a primeira coleta no momento em que a placa é cravada no solo; o tempo total de amostragem foi de 15 minutos, sendo coletadas 4 amostras em cada ponto. (CHAKRABORTY *et al.*, 2011; JHA *et al.*, 2008; YUE *et al.*, 2014; EINOLA; KARHU; RINTALA, 2008; ABICHOU *et al.*, 2006). As seringas foram conectadas à câmara de fluxo utilizando uma mangueira plástica para a retirada de amostras. A fim de selar a câmara de fluxo no momento da cravação, de forma a proteger principalmente as extremidades, utilizou-se o solo de cobertura do aterro e água, para que não houvesse escape dos gases ali confinados; a parte superior foi coberta para não ser aquecida pelo sol.

Para a amostragem dos GEE no ar ambiente, a coleta foi feita a 1,5 m de altura do solo, com o uso de seringas de polipropileno de 60 mL e amostras horárias de ar atmosférico durante o tempo de permanência



Figura 2 - Posicionamento dos pontos de amostragem na camada de cobertura.

Tabela 1 - Resumo das características meteorológicas do aterro nos dias de coleta de amostras.

Data de coleta	Amostras na camada de cobertura	Amostras no ar atmosférico	T (°C)	UR (%)	VV (m/s)
Jul/2014	CL1 a 4	AA1 a 8	23,8-27,1	52-61	2,8-3,3
Ago/2014	CL5 e 6	AA9 a 12	26,3-37,3	24-43	2,6-3,3
Set/2014	CL7 a 9	AA13 a 17	28,5-32,1	56-64	1,6-1,8
Out/2014	CL10 a 12	AA18 a 22	27,9-40,8	21-45	4,0-6,9
Nov/2014	CL13 a 16	AA23 a 26	27,5-29,4	75-84	0,0-5,7
Jan/2015	CL17 a 21	AA27 a 31	31,6-47,5	25-57	2,0-4,1

T: temperatura; UR: umidade relativa; VV: velocidade do vento.

sobre a célula do aterro (HEGDE; CHANG; YANG, 2003; SAQUING et al., 2014; SILVA; FREITAS; CANDIANI, 2013).

As amostras foram armazenadas em caixas de isopor até a chegada ao laboratório, onde foram analisadas por cromatografia gasosa para a determinação das concentrações de CO_2 e CH_4 (ABICHOU et al., 2006; CHAKRABORTY et al., 2011, JHA et al., 2008; LÓPEZ; LOBO, 2014; SILVA; FREITAS; CANDIANI, 2013). Para tanto, foi utilizado um equipamento Agilent® 7890A com três detectores: detector de condutividade térmica (DCT) para medir CO_2 em altos níveis de concentração, oxigênio (O_2) e nitrogênio (N_2); detector de captura de elétrons (DCE) para determinar as concentrações de óxido nitroso (N_2O); e detector por ionização de chama (DIC) para medir CH_4 e CO_2 em baixas concentrações.

O sistema cromatográfico utiliza dois canais com colunas empacotadas 1/8 (HayeSep Q80/100). O primeiro canal usa duas válvulas para *flame ionization detector* (FID) e DCT em série para medir CO_2 usando o metanizador para converter CO_2 em CH_4 . O outro canal com duas válvulas foi usado para medir N_2O no micro DCE. Duas pré-colunas foram usadas para reter compostos pesados e enviar O_2 e água para o meio externo. O “loop” de 1,0 mL foi mantido na temperatura de 60°C e as válvulas, a 100°C. O DIC foi operado a 250°C; o DCE, a 350°C; e o DCT, a 200°C. Hélio foi usado como fase móvel a 21 mL min⁻¹. Os coeficientes de determinação (R^2) para as curvas em triplicata foram de 0,99 para CO_2 e CH_4 e 0,98 para N_2O .

Para a calibração do cromatógrafo, foram realizados levantamentos preliminares a fim de conhecer a concentração dos GEE emitidos pela camada de cobertura.

Para a obtenção dos dados de temperatura, umidade relativa do ar, pressão atmosférica e intensidade do vento, foi utilizado o equipamento termo-higro-anemômetro-luxímetro digital portátil, modelo Thal-300.

Cálculo das emissões

As diferentes concentrações obtidas nos mesmos pontos, devido aos intervalos de 5 minutos entre as coletas, foram utilizadas para definir a concentração em relação ao tempo por meio de regressão linear

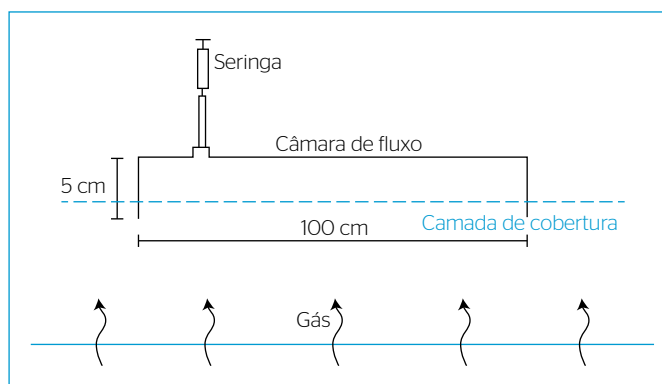


Figura 3 - Ilustração esquemática da câmara de fluxo utilizada.

(HEGDE; CHANG; YANG, 2003). A partir desse resultado foi calculado o fluxo emitido por cada um dos pontos para os GEE, utilizando a Equação 1 (BISZEK; PAWŁOWSKA; CZERWIŃSKI, 2006; ASADI et al., 2013; ENVIRONMENT AGENCY, 2010).

$$F = \frac{V_c C}{A t} \quad (1)$$

Em que:

F representa a taxa de emissão do gás a ser analisado ($\mu\text{g m}^{-2} \text{min}^{-1}$); V, o volume da câmara (m^3); A, a secção transversal da câmara (m^2); C, a concentração obtida a partir da análise cromatográfica ($\mu\text{g m}^{-3}$); e t, o tempo de duração do ensaio (min).

Cálculo do dióxido de carbono equivalente emitido

Para o cálculo da quantidade de CO_2 equivalente emitida devido à disposição dos resíduos no ano de estudo, foi utilizado o Programa Brasileiro GHG Protocol (FGV EAESP, 2016). No programa, devem ser preenchidos dados de entrada como características operacionais e climáticas do local de disposição, idade e composição gravimétrica dos resíduos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados climatológicos dos dias de coleta de amostras foram avaliados. Observou-se que a menor temperatura medida no aterro foi de 23,8°C, registrada durante a coleta do mês de julho de 2014, e a maior, de 47,5°C, em janeiro de 2015. O maior valor de umidade relativa foi observado em dia de chuva (novembro/2014), com 84%, e o menor valor, em dia de muito vento (outubro/2014), com 21%. Os altos índices de umidade relativa do ar influenciam na umidade do solo da camada de cobertura, afetando a quantificação da taxa de emissão do aterro.

Emissões de gases do efeito estufa

A Tabela 2 apresenta a classificação dos locais onde foram realizadas as coletas de amostras de GEE na camada de cobertura. Os locais de coleta foram classificados como solo com fissura e solo sem fissura. Os pontos CL1, CL4, CL5 e CL16 foram classificados como com fissura.

A Tabela 3 apresenta os resultados calculados para as emissões de GEE da camada de cobertura.

Entre os pontos com fissura, o CL1 apresentou a maior taxa de emissão de CH_4 , com 574,6 g $\text{m}^{-2} \text{dia}^{-1}$, sendo 3,2 vezes mais elevada do que a do ponto CL4, que apresentou a menor emissão dos pontos com fissura, com 181,4 g $\text{m}^{-2} \text{dia}^{-1}$. Para o CO_2 , o ponto que apresentou maior taxa de emissão foi o CL5, com 316,1 g $\text{m}^{-2} \text{dia}^{-1}$, sendo 4 vezes mais elevada do que a do menor ponto, CL4, com 78,1 g $\text{m}^{-2} \text{dia}^{-1}$. A fissura do ponto CL5 foi classificada como média em relação às demais. A média de emissão de CH_4 para os pontos com fissura foi de 329 g $\text{m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ e a média de CO_2 , de 191,5 g $\text{m}^{-2} \text{dia}^{-1}$.

Entre os pontos sem fissura, o CL18 apresentou a maior taxa de emissão de CH₄, com 59,5 g m⁻² dia⁻¹, diferença de 59,4 g m⁻² dia⁻¹ em relação ao ponto CL9, que apresentou a menor taxa de emissão, com

Tabela 3 - Valores calculados da emissão de gases do efeito estufa na camada de cobertura intermediária.

Amostra	CH ₄	CO ₂	Relação CH ₄ /CO ₂
	g m ⁻² dia ⁻¹		
CL1	574,6	153,1	3,8
CL2	48,5	22,7	2,1
CL3	45,4	9,3	4,9
CL4	181,4	78,1	2,3
CL5	373,1	316,1	1,2
CL6	11,0	15,0	0,7
CL7	0,9	0,3	3,0
CL8	16,0	7,7	2,1
CL9	0,1	0,3	0,3
CL10	12,3	7,0	1,8
CL11	7,6	24,7	0,3
CL12	14,7	6,5	2,3
CL13	3,6	25,7	0,1
CL14	21,1	31,9	0,7
CL15	15,2	12,9	1,2
CL16	189,2	218,5	0,9
CL17	38,0	1,9	20,0
CL18	59,5	3,9	15,3
CL19	0,7	0,1	7,0
CL20	8,3	0,5	16,6
CL21	9,3	2,0	4,7

Tabela 2 - Caracterização do solo nos pontos onde foram coletadas amostras de gases do efeito estufa, levando-se em consideração a existência de fissuras.

Ponto	Existência de fissuras no momento da coleta	Ponto	Existência de fissuras no momento da coleta
CL1	Sim (G)*	CL12	Não
CL2	Não	CL13	Não
CL3	Não	CL14	Não
CL4	Sim (P)*	CL15	Não
CL5	Sim (M)*	CL16	Sim (P)*
CL6	Não	CL17	Não
CL7	Não	CL18	Não
CL8	Não	CL19	Não
CL9	Não	CL20	Não
CL10	Não	CL21	Não
CL11	Não	-	-

*P: espessura da fissura: 1 a 5 cm; M: espessura da fissura: 6 a 10 cm; G: espessura da fissura: 11 a 15 cm.

0,1 g m⁻² dia⁻¹. Para o CO₂, o ponto que apresentou maior taxa de emissão foi o CL14, com 31,9 g m⁻² dia⁻¹, diferença de 31,8 g m⁻² dia⁻¹ em relação ao menor ponto, CL19, com 0,1 g m⁻² dia⁻¹. A média de emissão de CH₄ para os pontos sem fissura foi de 18,4 g m⁻² dia⁻¹ e a média de CO₂, 10,1 g m⁻² dia⁻¹.

Observa-se que os pontos com fissura apresentaram média 18 vezes maior do que os sem fissura para o CH₄. Com relação ao CO₂, os pontos com fissura apresentaram média 19 vezes maior do que os sem fissura.

Assim, conforme esperado, as emissões mais significativas foram encontradas nos pontos com fissura, entretanto, foram determinadas emissões para os GEE na camada de cobertura mesmo em pontos sem fissura. Isso pode ser explicado pelo fato de o solo utilizado como jazida do aterro ter apresentado alto teor de areia em sua composição. Durante todo o período de amostragem, o sistema de captação de gases se encontrou passivo na área de coleta das amostras. Na Tabela 4 é apresentada a estatística descritiva das taxas de emissão de GEE.

A Figura 4 apresenta o *box plot* com a variação da emissão de GEE na camada de cobertura intermediária do aterro. O *box plot* mostra o valor central (mediana), a dispersão dos dados (1º quartil (Q1) – 25% e 3º quartil (Q3) – 75%) e os valores máximos (maior valor) e mínimos (menor valor) nas extremidades. É possível observar que o CH₄ apresenta maiores taxas de emissão, assim como maior variação.

Observa-se que as emissões estão distribuídas acima da mediana, principalmente para o CH₄, com valores de 6,9 g m⁻² dia⁻¹. Para o CO₂, a mediana apresentou valor de 7,3 g m⁻² dia⁻¹.

Foram avaliados outros estudos a fim de comparar os resultados de emissão de CH₄ obtidos no aterro de Seropédica. Para isso, levou-se em consideração o tipo de sistema de extração de gás utilizado nos aterros e se os estudos realizaram medição de emissões em fissuras. Os valores de emissões médias encontrados para as diversas referências são apresentados na Tabela 5, que mostra a média total de CH₄ obtida no aterro de Seropédica.

A média de emissão apresentada em Abichou *et al.* (2006) foi de 53,6 g m⁻² dia⁻¹, a qual é 30,9% menor que a obtida em Seropédica. Vale ressaltar que o local de estudo de Abichou *et al.* (2006) não possuía sistema de extração de gases. No trabalho de Asadi *et al.* (2013), o local de estudo possuía sistema de extração de gases, e foram consideradas as emissões em fissuras, tendo apresentado média 30 vezes mais baixa do que a obtida no aterro de Seropédica, com valor de 2,59 g m⁻² dia⁻¹.

Tabela 4 - Estatística descritiva das taxas de emissão de gases do efeito estufa.

Gases	Taxa de emissão (g m ⁻² dia ⁻¹)		
	Mínima	Máxima	Média
CH ₄	0,1	575,6	77,6
CO ₂	0,1	316,1	44,7

Em Park *et al.* (2013), apesar de haver sistema passivo de extração de gases, a média de emissão de CH_4 foi 2 vezes menor do que a de Seropédica, com valor de $37,3 \text{ g m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$.

Estudo similar ao do aterro de Seropédica realizado em aterros na cidade de São Paulo (SILVA; FREITAS; CANDIANI, 2013) obteve valores de $21,31 \text{ g m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ para o aterro de Bandeirante (área depositada entre 2000 e 2007) e $22,67 \text{ g m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ (área depositada entre 2002 e 2004), $179,20 \text{ g m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ (área depositada entre 2005 e 2007) e $310,60 \text{ g m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ (área depositada entre 2008 e 2011) para o aterro de Caieras, indicando que a emissão de CH_4 é mais pronunciada nas áreas mais recentes.

Em Maciel e Jucá (2011), com sistema de extração passivo, obteve-se média de $161,5 \text{ g m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, sendo um pouco mais de 2 vezes maior do que a encontrada no aterro de Seropédica.

Nos demais estudos, os quais possuíam sistemas de extração ativos, as médias de emissão foram menores.

Concentração de gases do efeito estufa no ar

Nas Figuras 5 e 6 pode-se observar os resultados de concentração dos gases GEE no ar atmosférico logo acima da célula. A linha contínua,

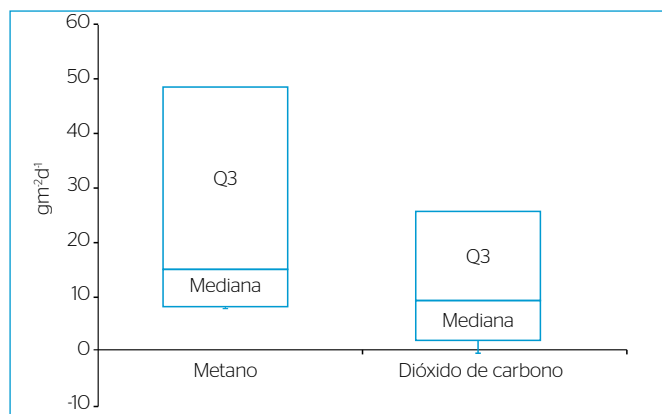


Figura 4 - Box plot das emissões na camada de cobertura intermediária.

apresentada em ambas as figuras, representa valores citados pela USEPA (2016), tendo em vista a inexistência de normas que definam os limites de concentração desses gases no ar.

Dentre as amostras de ar coletadas no aterro, aquela que apresentou maior concentração de CH_4 foi a ATM 17, com 149,8 ppm, seguida da ATM 13, com 147,9 ppm. Para o CO_2 , a amostra que apresentou maior concentração foi a ATM 6, com 665,1 ppm, seguida da ATM 4, com 629,6 ppm.

Já a amostra com menor concentração de CH_4 foi a ATM 21, que apresentou valor abaixo de 1 ppm, seguida da amostra ATM 16, com 3,5 ppm. Dentre as amostras com menor concentração de CO_2 , destacam-se a ATM 21, com 332,8 ppm, e a ATM 20, com 347,4 ppm.

As amostras ATM 18 a 22 foram coletadas no dia em que o vento estava mais forte, com muitas rajadas e velocidade variando de $4,0$ a $6,9 \text{ m s}^{-1}$. Nesse dia, 3 das amostras coletadas tiveram concentração abaixo de 10 ppm de CH_4 e de 420 ppm de CO_2 . A forte incidência de rajadas de vento na região do aterro contribui para a dispersão dos gases emitidos.

A média da concentração de CH_4 para todas as amostras coletadas no aterro foi de 50,7 ppm, sendo 25 vezes maior do que a média citada pela USEPA (2016), de 1,8 ppm. Considerando ainda o valor citado pela USEPA (2016), 96,7% das amostras coletadas no aterro apresentaram concentração de CH_4 acima de 1,8 ppm.

As 31 amostras de CO_2 coletadas no ar atmosférico do aterro apresentaram média de 472,3 ppm, enquanto a concentração de CO_2 medida pela USEPA (2016) apresenta valor 1,2 vezes inferior (401,0 ppm). Ao observar as concentrações de CH_4 e de CO_2 obtidas no ar atmosférico, constata-se que elas são influenciadas pela emissão de tais gases pela camada de cobertura do aterro. Na Tabela 6 é apresentado o resumo dos resultados de concentração dos GEE no ar atmosférico do aterro.

Foram avaliadas, também, as concentrações de N_2O no aterro, porém estas não apresentaram valores significativos em relação ao valor da USEPA (2016), tendo em vista que foi observada média de 246 ppb das amostras coletadas em detrimento de um valor de aproximadamente 325 ppb da USEPA (2016).

Tabela 5 - Valores da emissão de metano em outros estudos, todos para aterros sanitários e com camadas monolíticas.

Referências	Emissão média ($\text{g m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)	Extração de gás	Emissão através de fissuras
Aterro de Seropédica	77,60	Passivo	Sim
Di Bella, Di Trapani e Viviani (2011)	35,40	Ativo	Sim
Park <i>et al.</i> (2013)	37,30	Passivo	Sim
Oliveira <i>et al.</i> (2013) - Nova Iguaçu	13,70	Ativo	Não
Di Trapani, Di Bella e Viviani (2013)	1,14	Ativo	Sim
Abichou <i>et al.</i> (2006)	53,60	Sem extração	Sim
Asadi <i>et al.</i> (2013)	2,59	Ativo	Sim
Maciel e Jucá (2011) - Muribeca	161,50	Passivo	-
Silva, Freitas e Candiani (2013) - Bandeirante	21,31	Passivo	-
Silva, Freitas e Candiani (2013) - Caieras	22,67 a 310,60	Passivo	Sim

Cálculo da média de emissão de gases do efeito estufa no aterro sanitário

A média das emissões de GEE no aterro de Seropédica foi calculada utilizando o procedimento de Kriging (GALLEGO *et al.*, 2014). As emissões de CH₄ apresentaram variação de 0,1 a 575,6 g m⁻² dia⁻¹ e as de

CO₂, de 0,1 a 316,1 g m⁻² dia⁻¹. A distribuição espacial desses resultados é apresentada nas Figuras 7 e 8. As maiores emissões se concentram nas regiões de maior fissura no momento da coleta das amostras.

Ao avaliar a quantidade de resíduos dispostos em 2014 e a população atendida, foi possível verificar a quantidade de CO₂

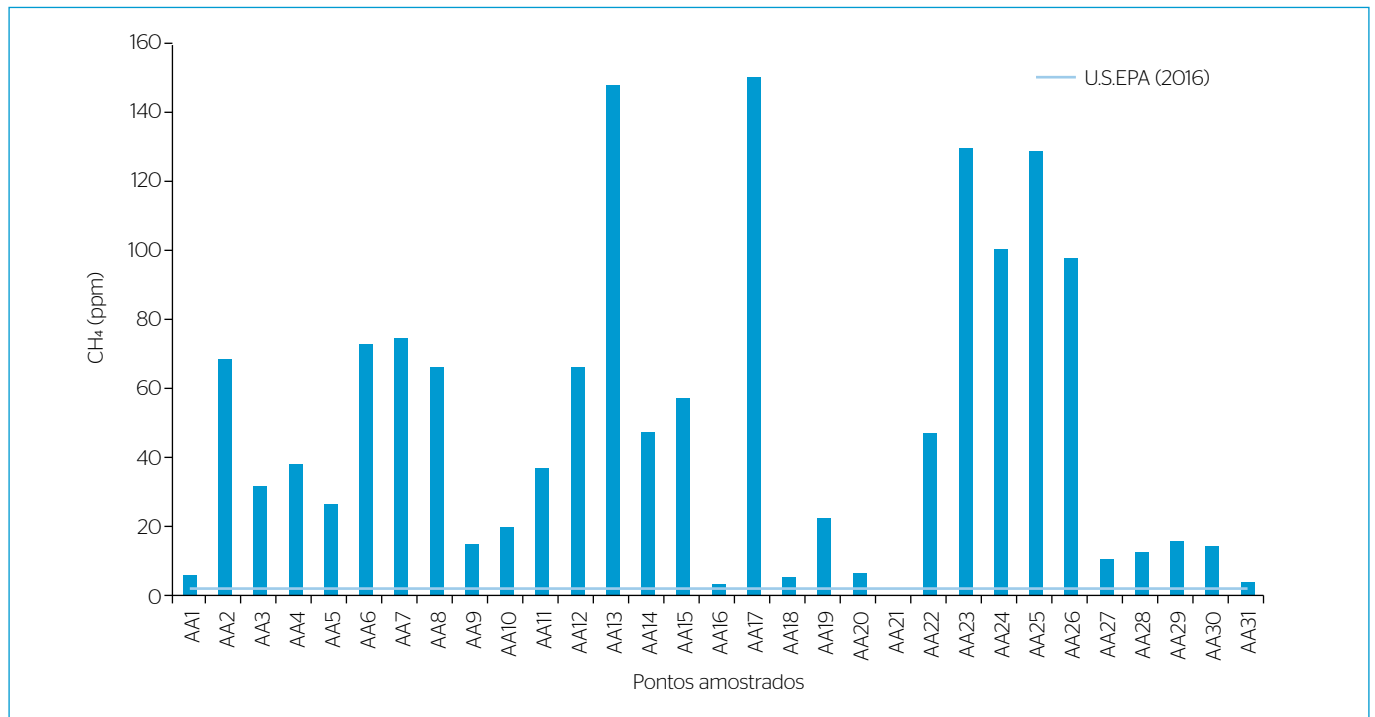


Figura 5 - Concentrações de metano no ar ambiente do aterro sanitário de Seropédica.

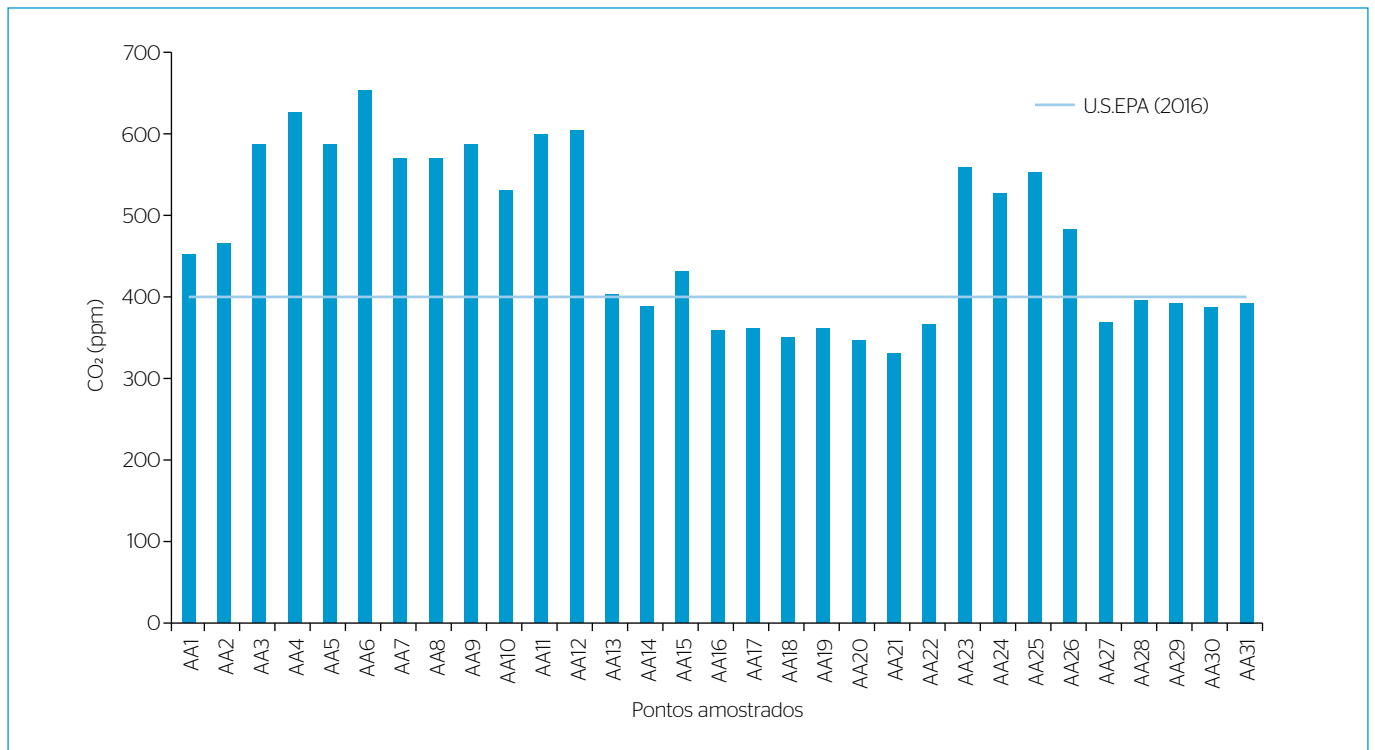


Figura 6 - Concentrações de dióxido de carbono no ar ambiente do aterro sanitário de Seropédica.

equivalente emitido devido à disposição dos resíduos naquele ano. A Tabela 7 resume os valores obtidos por meio de cálculos utilizando o Programa Brasileiro GHG Protocol (FGV EAESP, 2016): um valor de 1.005.381.403 tCO_{2eq} ano⁻¹, que representa uma emissão de 40.256.215 tCH₄ ano⁻¹. Assim, observa-se que a disposição de resíduos sólidos no aterro de Seropédica representa 150,5 kgCO₂ ano⁻¹ que cada habitante deve neutralizar devido à utilização desse serviço.

Tabela 6 - Estatística descritiva das concentrações de gases do efeito estufa coletadas no ar atmosférico do aterro sanitário de Seropédica.

GEE	Concentração (ppm)			
	Mínima	Máxima	Média	Desvio padrão
CH ₄	<1	149,8	50,7	44
CO ₂	332,8	655,1	472,3	102

* ≤ abaixo do limite de quantificação.

Tabela 7 - Emissão de dióxido de carbono equivalente.

Itens	Quantidades
Quantidade de resíduos dispostos (t ano ⁻¹)	5.110.000,000
População atendida (hab)*	6.678.666,000
Emissão de CH ₄ (tCH ₄ ano ⁻¹)	40.256,215
Emissão de CO ₂ equivalente (tCO _{2eq} ano ⁻¹)	1.005.381,403
Valor a ser neutralizado por habitante (kgCO ₂ hab ⁻¹ ano ⁻¹)	150,500

* IBGE, 2016a; 2016b; 2016c.

CONCLUSÕES

A camada de cobertura intermediária do aterro sanitário de Seropédica não vem agindo de forma efetiva na contenção da emissão de gases, o que é comprovado pela detecção de GEE mesmo em locais onde ela não apresenta fissuras. O solo utilizado na camada de cobertura pode ser um fator facilitador para as emissões devido ao alto teor de areia em sua composição.

Contudo, as fissuras são pontos potenciais de aumento das emissões, e as duas maiores taxas de emissão foram encontradas nos pontos com as maiores fissuras. O monitoramento da qualidade da camada de cobertura para evitar a formação de fissuras pode auxiliar na minimização das emissões. A existência dessas irregularidades foi responsável por acentuar a emissão em 18 vezes para o CH₄ e 19 vezes para o CO₂.

A média de emissão de GEE no aterro sanitário de Seropédica foi de 77,60 g m⁻². dia⁻¹, valor coerente com as médias entre 1,14 e 310,60 g m⁻². dia⁻¹ de estudos realizados em aterros da Itália, dos Estados Unidos, da Austrália, da Coreia do Sul e do Brasil.

Com relação às concentrações de GEE no ar atmosférico do aterro, mesmo com a forte incidência de rajadas de vento na região contribuindo para a dispersão dos gases emitidos, foram encontradas concentrações elevadas de CH₄ e CO₂ em comparação àquelas citadas pela USEPA (2016). A concentração de CH₄ no ar logo acima do aterro foi a mais elevada, apresentando média 25 vezes maior do que a sugerida pela USEPA (2016).

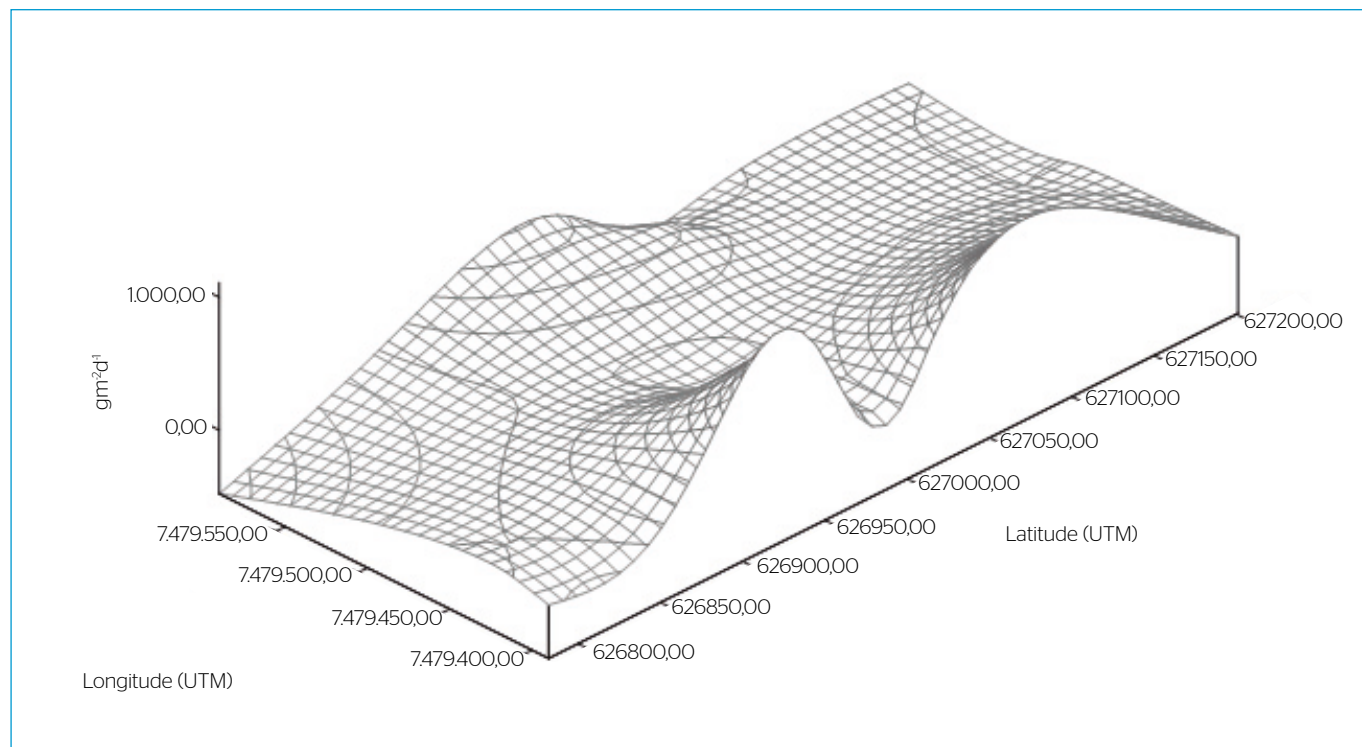


Figura 7 - Distribuição espacial da emissão de metano no aterro sanitário de Seropédica.

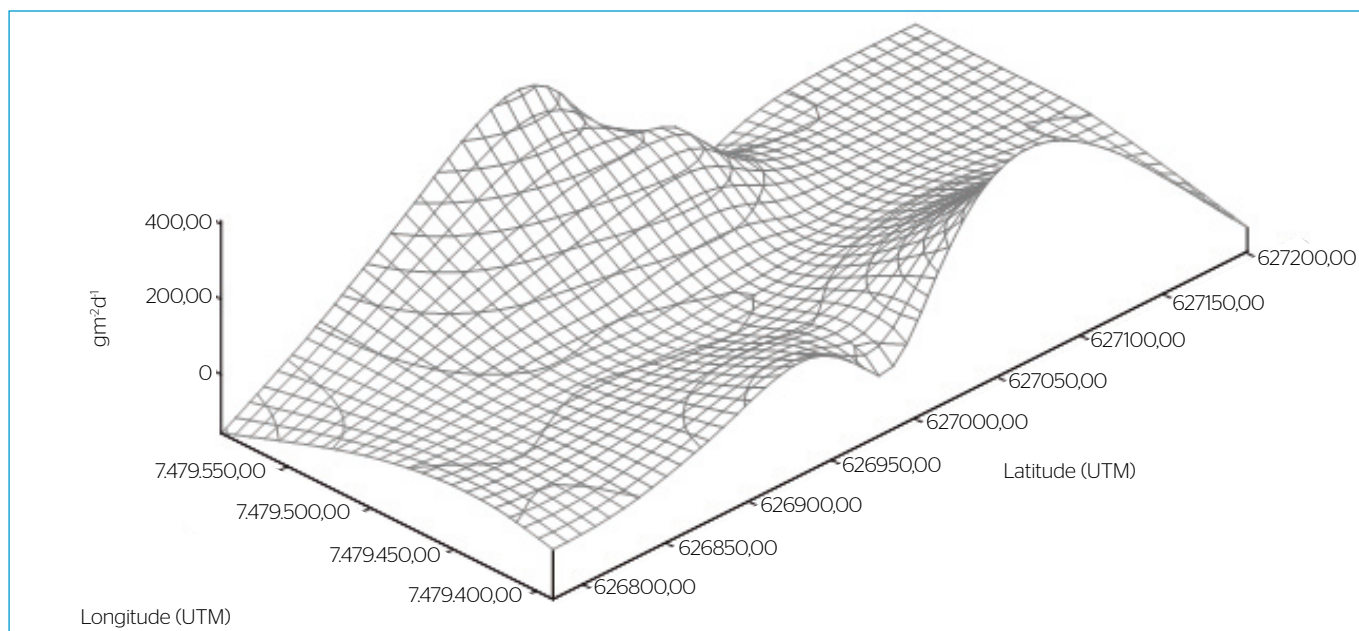


Figura 8 - Distribuição espacial da emissão de dióxido de carbono no aterro sanitário de Seropédica.

REFERÊNCIAS

- ABICHOU, T.; CHANTON, J.; POWELSON, D.; FLEIGER, J.; ESCORIAZA, S.; LEI, Y.; STERN, J. (2006) Methane flux and oxidation at two types of intermediate landfill covers. *Waste Management*, v. 26, n. 11, p. 1305-1312.
- ARONICA, S.; BONANNO, A.; PIAZZA, V.; PIGNATO, L.; TRAPANI, S. (2009) Estimation of biogas produced by the landfill of Palermo, applying a Gaussian model. *Waste Management*, v. 29, n. 1, p. 233-239.
- ASADI, M.; YUEN, S.T.; BOGNER, J.; CHEN, D.; LIGHTBODY, P. (2013) Methane emissions from a municipal waste landfill in South Australia without gas recovery: comparison between field measurements and calim modelled results. *In: INTERNATIONAL WASTE MANAGEMENT AND LANDFILL SYMPOSIUM, 14., 2013, Sardinia, Itália. Anais...*
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). (1984) *Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos urbanos - Procedimento*, NBR 8.419. Rio de Janeiro: ABNT.
- _____. (1997) *Aterro de Resíduos Não Perigosos Sólidos - Critérios para Projeto, Implantação e Operação - NBR 13.896*. Rio de Janeiro: ABNT.
- _____. (2010) *Resíduos Sólidos Urbanos - Aterros Sanitários de Pequeno Porte - Diretrizes para Localização, Projeto, Implantação, Operação e Encerramento - NBR 15.849*. Rio de Janeiro: ABNT.
- BISZEK, M.; PAWŁOWSKA, M.; CZERWIŃSKI, J. (2006) Evaluation of measurement methods and estimation of biogas emission from landfills. *Śródkowo-Pomorskie Towarzystwo Naukowe Ochrony Środowiska*, Polônia, p. 27-43.
- BOGNER, J.; PIPATTI, R.; HASHIMOTO, S.; DIAZ, C.; MARECKOVA, K.; DIAZ, L.; KJELDTSEN, P.; MONNI, S.; FAAIJ, A.; SUTAMIHARDJA, R.T.M.; GREGORY, R. (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*, v. 26, p. 11-32.
- BÖRJESSON, G.; SUNDH, I.; SVENSSON, B. (2004) Microbial oxidation of CH₄ at different temperatures in landfill cover soils. *FEMS Microbiological Ecology*, v. 48, n. 3, p. 305-312.
- CHAKRABORTY, M.; SHARMA, C.; PANDEY, J.; SINGH, N.; GUPTA, P.K. (2011) Methane emission estimation from landfills in Delhi: A comparative assessment of different methodologies. *Atmospheric Environment*, v. 45, n. 39, p. 7135-7142.
- DEVER, S.; WELSH, M.; HUNSTONE, M.E.; STUET, Z.R. (2013) Assessment of Fugitive Landfill Gas Emissions Rates in Australia. *In: INTERNATIONAL WASTE MANAGEMENT AND LANDFILL SYMPOSIUM, 14., 2013, Sardinia, Itália. Anais...*
- DI BELLA, G.; DI TRAPANI, D.; VIVIANI, G. (2011) Evaluation of methane emissions from Palermo municipal landfill: comparison between field measurements and models. *Waste Management*, v. 31, p. 1820-1826.

- DI TRAPANI, D.; DI BELLA, G.; VIVIANI, G. (2013) Uncontrolled methane emissions from a MSW landfill surface: influence of landfill features and side slopes. *Waste Management*, v. 33, n. 10, p. 2108-2115.
- EINOLA, J.K.M.; KARHU, A.E.; RINTALA, J.A. (2008) Mechanically-biologically treated municipal solid waste as a support medium for microbial methane oxidation to mitigate landfill greenhouse emissions. *Waste Management*, v. 28, n. 1, p. 97-111.
- ENVIRONMENT AGENCY. (2010) *Guidance on monitoring landfill gas surface emissions*, Bristol, UK. Disponível em: <www.environment-agency.gov.uk>. Acesso em: 30 jun. 2016.
- FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS/CENTRO DE ESTUDOS EM SUSTENTABILIDADE (FGV EAESP). (2016) *Programa Brasileiro GHG Protocol*. Disponível em: <<http://www.ghgprotocolbrasil.com.br/ferramenta-de-calculo>>. Acesso em: 21 jul. 2016.
- GALLEGO, E.; PERALES, J.F.; ROCA, F.J.; GUARDINO, X. (2014) Surface emission determination of volatile organic compounds (VOC) from a closed industrial waste landfill using a self-designed static flux chamber. *The Science of the Total Environment*, v. 470-471, p. 587-599.
- HEGDE, U.; CHANG, T.C.; YANG, S.S. (2003) Methane and carbon dioxide emissions from Shan-Chu-Ku landfill site in northern Taiwan. *Chemosphere*, v. 52, n. 8, p. 1275-1285.
- HRAD, M.; HUBER-HUMER, M.; WIMMER, B.; REICHENAUER, T.G. (2012) Design of top covers supporting aerobic in situ stabilization of old landfills - an experimental simulation in lysimeters. *Waste Management*, v. 32, n. 12, p. 2324-2335.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). (2016a). *Rio de Janeiro*: Itaguaí. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?codmun=330200>>. Acesso em: 21 jul. 2016.
- _____. (2016b). *Rio de Janeiro*: Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?codmun=330455>>. Acesso em: 21 jul. 2016.
- _____. (2016c). *Rio de Janeiro*: Seropédica. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?codmun=330555>>. Acesso em: 21 jul. 2016.
- JHA, A.K.; SHARMA, C.; SINGH, N.; RAMESH, R.; PURVAJA, R.; GUPTA, P.K. (2008) Greenhouse gas emissions from municipal solid waste management in Indian mega-cities: a case study of Chennai landfill sites. *Chemosphere*, v. 71, n. 4, p. 750-758.
- JOAQUIM JR., G.O.; RITTER, E.; CAMPOS, J.C.; FIGUEIREDO, G.C. (2015) Curva de Retenção de Água e Condutividade Hidráulica Saturada em Solos Compactados para Cobertura Final de Resíduos Sólidos em Aterros Sanitários. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL, 7, 2015. *Anais...*
- LÓPEZ, A.; LOBO, A. (2014) Emissions of C&D refuse in landfills: a European case. *Waste Management*, v. 34, n. 8, p. 1446-1454.
- LOREIRO, S.M.; ROVERE, E.L.L.; MAHLER, C.F. (2013) Analysis of potential for reducing emissions of greenhouse gases in municipal solid waste in Brazil, in the state and city of Rio de Janeiro. *Waste Management*, v. 33, n. 5, p. 1302-1312.
- MACIEL, F.J.; JUCÁ, J.F.T. (2011) Evaluation of landfill gas production and emissions in a MSW large-scale Experimental Cell in Brazil. *Waste Management*, v. 31, p. 966-977.
- OLIVEIRA, A.C.E.; RITTER, E.; MANNARINO, C.; CONSTANTINO, P. (2013) Evaluation of biogas emission through the final cover layer of the waste treatment center of Nova Iguaçu and dump of Seropédica, Rio de Janeiro analyses. *Fourteenth International Waste Management and Landfill Symposium*, Sardinia, Italy, 2013.
- PARK, J.K.; KANG, J.Y.; KANG, J.H.; LEE, N.H. (2013) Method Development for Measurement of Methane Emissions From Valley-Type Landfills. In: INTERNATIONAL WASTE MANAGEMENT AND LANDFILL SYMPOSIUM, 14., 2013, Sardinia, Itália. *Anais...*
- RIO DE JANEIRO. (2012) *Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos da Cidade do Rio de Janeiro (PMGIRS/RJ)*. Diagnóstico. Rio de Janeiro: Prefeitura.
- SAQUING, J.M.; CHANTON, J.P.; YAZDANI, R.; BARLAZ, M.A.; SCHEUTZ, C.; BLAKE, D.R.; IMHOFF, P.T. (2014) Assessing methods to estimate emissions of non-methane organic compounds from landfills. *Waste Management*, v. 34, n. 11, p. 2260-2270.
- SCHEUTZ, C.; PEDERSEN, R.B.; PETERSEN, P.H.; JØRGENSEN, J.H.B.; UCENDO, I.M.B.; MØNSTER, J.G.; SAMUELSSON, J.; KJELDSEN, P. (2014) Mitigation of methane emission from an old unlined landfill in Klintholm, Denmark using a passive biocover system. *Waste Management*, v. 34, n. 7, p. 1179-1190.
- SCHEUTZ, C.; PEDICONE, A.; PEDERSEN, G.; KJELDSEN, P. (2011) Evaluation of respiration in compost landfill biocovers intended for methane oxidation. *Waste Management*, v. 31, n. 5, p. 895-902.
- SCHROTH, M.H.; EUGSTER, W.; GÓMEZ, K.E.; GONZALEZ-GIL, G.; NIKLAUS, P.A.; OESTER, P. (2012) Above- and below-ground methane fluxes and methanotrophic activity in a landfill-cover soil. *Waste Management*, v. 32, n. 5, p. 879-889.
- SILVA, T.N.; FREITAS, F.S.N.; CANDIANI, G. (2013) Avaliação das emissões superficiais do gás de aterros sanitários de grande porte. *Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 18, n. 2, p. 95-104.
- SPOKAS, K.; BOGNER, J.; CHANTON, J.P.; MORCET, M.; ARAN, C.; GRAFF, C.; GOLVAN, Y.M.L.; HEBE, I. (2006) Methane mass balance at three landfill sites: what is the efficiency of capture by gas collection systems? *Waste Management*, v. 26, n. 5, p. 516-525.
- STAUB, M.J.; MARCOLINA, G.; GOURC, J.P.; SIMONIN, R. (2011) An incremental model to assess the environmental impact of cap cover system on MSW landfill emissions. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 29, n. 3, p. 298-312.
- STERN, J.C.; CHANTON, J.; ABICHOU, T.; POWELSON, D.; YUAN, L.; ESCORIZA, S.; BOGNER, J. (2007) Use of a biologically active cover to reduce landfill methane emissions and enhance methane oxidation. *Waste Management*, v. 27, p. 1248-1258.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA) (2016) *Atmospheric Concentrations of Greenhouse Gases*. Environmental panel agency (EPA), p. 1-12. Disponível

em: <<https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-atmospheric-concentrations-greenhouse-gases>>. Acesso em: 1º dez. 2017.

YANG, N.; DAMGAARD, A.; LÜ, F.; SHAO, L.M.; BROGAARD, L.K.S.; HE, P.J. (2014) Environmental impact assessment on the construction and operation of municipal solid waste sanitary landfills in developing countries: China case study. *Waste Management*, v. 34, n. 5, p. 929-937.

YUE, D.; HAN, B.; SUN, Y.; YANG, T. (2014) Sulfide emissions from different areas of a municipal solid waste landfill in China. *Waste Management*, v. 34, n. 6, p. 1041-1044.

ZHU, H.; LETZEL, M.O.; REISER, M.; KRANERT, M.; BÄCHLIN, W.; FLASSAK, T. (2013) A new approach to estimation of methane emission rates from landfills. *Waste Management*, v. 33, n. 12, p. 2713-2719.

