

**Avaliação dos Benefícios Ambientais da Captação de Gases do Efeito Estufa (GEEs) de
Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos**

**Assessment of the Environmental Benefits of Capturing Greenhouse Gases (GHG) from
a Landfill**

Anna Paula Soares Ribeiro Martins

Engenheira Química formada pela UNIFESP. Atualmente trabalha no Banco Itaú e possui experiência em sustentabilidade empresarial.
annaweasley@gmail.com

Sania Maria de Lima

Professora e Pesquisadora da UNIFESP especializada em catálise e reforma do metano.
eng_sania@hotmail.com

Simone Georges El Khouri Miraglia

Professora e Pesquisadora da UNIFESP especializada em sustentabilidade, poluição ambiental e impactos na saúde.
simone.miraglia@unifesp.br

Resumo: Os aterros em que são depositados os resíduos sólidos urbanos (RSUs) são uma das causas do aumento das emissões de gases do efeito estufa (GEEs). O gás de aterro é composto, principalmente, por CH₄ (metano) e CO₂ (biogás). A captação e utilização do gás produzido em aterros é uma opção interessante para a redução da emissão dos gases causadores do efeito estufa. O hidrogênio pode ser produzido a partir da reforma do biogás proveniente de RSU e usado para geração de energia elétrica. Sendo assim, o objetivo do estudo é avaliar o potencial de transformar CH₄ e CO₂ para produção do gás hidrogênio e gerar energia elétrica em células combustível. Baseando-se no volume de resíduos recebidos pelo aterro Morro do Céu (Niterói/RJ) e assumindo parâmetros relacionados com a pluviometria média do local e a composição dos resíduos depositados é possível estimar a produção de gás metano utilizando-se o *software LandGEM*, desenvolvido pela EPA. O potencial de produção de energia elétrica foi calculado usando uma correlação entre o número de habitantes da cidade e sua capacidade estimada de produzir resíduos. A cidade de Niterói tem a capacidade de produzir cerca de 16 MWh/ano. A captura de biogás no aterro evitaria a emissão de 425.000 toneladas de metano em 21 anos. Portanto, a captação de GEEs traz vantagens ambientais.

Palavras-chave: Gases de Efeito Estufa; Resíduos Sólidos Municipais; Aterro; Metano; Geração de Energia.

Abstract: Landfills where municipal solid waste (MSW) is deposited are one cause of the increase of greenhouse gases (GHG) emissions. Landfill gas is mainly composed of CH₄ (methane) and e CO₂ (biogas). The capture and use of landfill gas is an interesting option for reducing the emission of greenhouse gases. Hydrogen can be produced from the reform of the biogas from RSU and used for electricity generation. Therefore, the objective of the study is to evaluate the potential of transforming CH₄ and CO₂ into hydrogen gas production and generating electric energy in fuel cells. Based on the volume of waste received by the Morro do Céu landfill (RJ - Brazil) and assuming parameters such as the local average rainfall and the composition of wastes deposited in the landfill it is possible to estimate the production of methane using the software Landfill Gas Emissions Model (LandGEM), developed by the Environmental Protection Agency (EPA). The potential of electricity production was calculated using a correlation between the number of inhabitants of the city and its estimated capacity to produce waste. The city of Niterói has the potential to produce around 16 MWh/year. The biogas captured in the landfill would avoid the emission of 425.000 tons of methane in 21 years. Therefore, the capture of GHGs has environmental advantages.

Keywords: Greenhouse Gases; Municipal Solid Waste; MSW; Landfill; Methane; Power Generation.

I. INTRODUÇÃO

O efeito estufa é um processo natural da atmosfera da Terra. Gases do Efeito Estufa (GEEs) absorvem a radiação solar refletida pela superfície da Terra e de qualquer parte da atmosfera. Estas substâncias emitem radiação infravermelha para todas as direções, mas a quantidade emitida para o espaço é normalmente menor do que seria na ausência desses absorventes em decorrência da queda de temperatura com a altitude da troposfera e o consequente enfraquecimento da emissão. O aumento na concentração de GEEs aumenta a magnitude desse efeito (IPCC, 2013).

De acordo com o relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (ou IPCC do termo em inglês *Intergovernmental Panel on Climate Change*) de 2013, a concentração dos principais gases do efeito estufa, como: dióxido de carbono, metano e óxido nítrico registraram um elevado aumento desde 1750, devido à atividade humana e estão muito acima dos níveis pré-industriais. A previsão é que o aumento da temperatura média atual fique entre 0,3 e 4,8 °C até 2100. A concentração atmosférica global de metano cresceu de 715 ppb para 1732 ppb no início dos anos 90, alcançando 1774 ppb em 2005, sendo que o intervalo da concentração dos últimos 650.000 anos é de 320 a 790 ppb (IPCC, 2013). Os efeitos das mudanças climáticas, tais como elevação do nível do mar, enchentes, secas, disseminação de doenças transmitidas por vetores dentre outras, tem causado muitos prejuízos pessoais e econômicos às populações impactadas, projetando-se uma elevação desses prejuízos no médio e longo prazo.

Um grande número de estudos ao longo das duas últimas décadas indica que a deposição de Resíduos Sólidos Urbanos (RSUs) em aterros ainda é uma ameaça para a saúde

humana e ao meio ambiente devido à geração de gases de aterro e chorume. Ambos contêm muitas substâncias tóxicas, que são produzidas por diversos processos químicos, físicos e biológicos de decomposição de resíduos. O Gás de aterro é formado por vários gases, alguns presentes em grande quantidade, como o metano (CH₄) e o dióxido de carbono (CO₂), os quais são os principais gases provenientes da decomposição anaeróbia de resíduos orgânicos. (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2016).

Verifica-se na região metropolitana do Rio de Janeiro que a disposição final com o tratamento adequado dos resíduos sólidos constitui importante problema, não só para os governos e políticas públicas locais, mas também para as populações que convivem com os lixões. Há urgência de implantação de aterros sanitários ou aterro consorciado, desativando-se as áreas atuais de lixões e/ou aterros controlados, com ações de remediação de áreas degradadas, e, enfim, que se adotem soluções que deem conta dessa importante parcela do saneamento básico, minimizando o impacto negativo dos solos e águas subterrâneas contaminados, visando-se a sustentabilidade da saúde e do ambiente, e o bem-estar das pessoas (BULCÃO; ALBANO, 2010).

O manejo adequado dos resíduos é uma importante estratégia de preservação do meio ambiente, assim como de promoção e proteção da saúde. Uma vez acondicionados em aterros, os resíduos sólidos podem comprometer a qualidade do solo, da água e do ar, por serem fontes de compostos orgânicos voláteis, pesticidas, solventes e metais pesados, entre outros. A decomposição da matéria orgânica presente no lixo resulta na formação de um líquido de cor escura, o chorume, que pode contaminar o solo e as águas superficiais ou subterrâneas pela contaminação do lençol freático. Além desses impactos mais imediatos no ambiente, a

disposição de resíduos sólidos pode contribuir de maneira significativa com o processo de mudanças climáticas. A decomposição anaeróbica da matéria orgânica presente nos resíduos gera grandes quantidades de GEE, principalmente o metano (CH_4), segundo gás em importância dentre os considerados responsáveis pelo aquecimento global. O potencial de emissão de metano aumenta com a melhora das condições de controle dos aterros e da profundidade dos lixões (GOUVEIA, 2012).

Os aterros podem produzir de 6 a 20% do metano antropogênico que é emitido para a atmosfera (SILVA; CAMPOS, 2008). Além disso, o metano tem um potencial de aquecimento global ou GWP, do inglês *Global Warming Potential*, vinte e uma vezes maior do que o dióxido de carbono, em um intervalo de 100 anos. O GWP é uma forma de comparar o potencial de mudanças climáticas associadas com a emissão de diferentes gases do efeito estufa, avaliando o tempo de residência do gás na atmosfera e sua eficiência em absorver a radiação solar (IPCC, 2013).

Os resíduos começam a gerar gases cerca de 6 a 12 meses após sua deposição, e continuam a gerá-los em quantidades economicamente viáveis por 20 a 50 anos após o aterro deixar de receber resíduos. Então, o aterro começa a reduzir lentamente a quantidade e a qualidade das emissões, que tendem a se estabilizar (AITCHISON, 1996). No Brasil, a solução mais comum para a deposição de resíduos são os aterros sanitários, em vez dos aterros controlados. De acordo com o levantamento apresentado no Plano Nacional de Resíduos Sólidos de 2012, 20% dos resíduos produzidos no Brasil ainda são depositados em áreas abertas, sem qualquer controle de poluição. Diante disso, novas técnicas vêm sendo desenvolvidas em todo mundo, buscando a melhoria na disposição final e na utilização desses

resíduos como fonte de energia. Entretanto, muitas vezes elas não se adequam à realidade, tanto financeira, como ambiental. Portanto, buscas por novas técnicas são de suma importância, não só para o avanço da ciência, mas principalmente para o ambiente.

Hoje em dia há um crescente interesse na produção de hidrogênio a partir de fontes renováveis, uma vez que o hidrogênio possui um alto potencial para a produção de energia elétrica, em que essa energia pode ser gerada, por exemplo, usando células a combustível. Considerando o biogás como principalmente metano e gás carbônico, a produção de hidrogênio poderia ser feita a partir da reação de reforma seca do metano ($\text{CH}_4 + \text{CO}_2 \rightarrow 2\text{CO} + 2\text{H}_2$).

Sendo assim, o objetivo desse estudo foi avaliar o potencial de transformar metano e CO_2 para produção do gás hidrogênio e assim gerar energia elétrica em células combustível. Analisando-se o volume de resíduos depositados no aterro Morro do Céu (Niterói/RJ-Brasil), o estudo estimou a quantidade de gás metano produzida e o potencial de geração de energia elétrica.

II. METODOLOGIA

O local de estudo é o aterro Morro do Céu (Figura 1), situado no bairro do Caramujo em Niterói, Rio de Janeiro. O referido aterro existe desde 1983 e era um lixão a céu aberto até 1992, quando surgiram iniciativas para a ampliação de sua vida útil e de enquadrá-lo nas práticas adequadas de destinação final de resíduos (DOS SANTOS, 2007). O local foi escolhido para a realização da estimativa de potencial de sequestro de carbono devido ao fato de haver pressão pelo órgão ambiental do Rio de Janeiro, Inea, de realizar um controle maior

e de reduzir seu impacto à população circunvizinha. Além disso, existem dados na literatura que nos permitem simular o potencial de metano que o aterro poderia gerar e consequentemente avaliar a gestão socioambiental. O fechamento do aterro em 2015 foi confirmado pela Companhia de Limpeza Urbana de Niterói (CLIN).



Figura 1: Aterro Morro do Céu

Fonte: <http://guiadeniteroi.com/>

A produção de gás metano foi estimada utilizando-se o *software Landfill Gas Emissions Model (LandGEM)* desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, ou EPA, do inglês *Environmental Protection Agency* (EPA, 2005). A Equação 1 descreve a taxa de decomposição de primeira ordem usada para estimar a emissão anual considerando um período específico de tempo (ALEXANDER, BURKLIN & SINGLETON, 2005).

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 kL_0 \left(\frac{M_i}{10}\right) e^{-kt_{ij}} \quad (1)$$

Onde:

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

i = aumenta em uma unidade a cada ano;

n = (ano de cálculo) - (ano inicial de deposição de resíduos);

j = aumenta em 0,1 a cada ano;

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

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

M_i = massa de resíduos depositados no ano i (Mg);

t_{ij} = ano da seção j da massa de resíduos M_i aceita no ano i (ano em decimais. Exemplo: 3,2 anos).

Os parâmetros do modelo k = taxa de geração de metano, e L_0 = potencial de geração de metano, consideram o tipo de resíduo depositado no aterro e a pluviometria do local. A composição dos resíduos recebidos pelo aterro Morro do céu foi apresentada pelo Plano Municipal de Resíduos Sólidos de Niterói, disponibilizado pela prefeitura da cidade em 2012. A pluviometria do local foi obtida da tese de mestrado Plano de gestão do aterro controlado do morro do céu: instrumento de mudança (DOS SANTOS, 2007).

A partir da produção de metano estimada, esse volume é convertido em carbono equivalente, considerando-se que o metano apresenta um GWP vinte e uma vezes maior do que o dióxido de carbono, de acordo com a Equação 2.

$$CO_{2eq} = 21 \cdot CH_4 \quad (2)$$

Onde:

CO_{2eq} = Massa de carbono equivalente (t);

CH_4 = Massa de metano (t).

A produção de energia elétrica do aterro é estimada por meio da correlação apresentada na Tabela 1, proposta pelo “Estudo sobre o Potencial de Geração de Energia a partir de Resíduos de Saneamento (lixo e esgoto), visando incrementar o uso de biogás como fonte alternativa de energia renovável” desenvolvido pelo Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) e pelo Ministério do Meio Ambiente. O estudo relaciona o número de habitantes atendido pelo aterro e sua consequente produção de resíduos, com a faixa de potência esperada ao se aproveitar o gás do aterro (PNUD & MMA, 2010).

Tabela 1: Correlação entre a faixa de potência estimada e o número de habitantes atendidos pelo aterro estudado

Faixa de Potência (MW)	Habitantes atendidos (10^3)
0,5	125
1	270
5	1.348
10	2.696
15	4.043
20	5.391
30	8.087

Fonte: PNUD & MMA, 2010

O potencial de produção de energia é calculado pela Equação 3.

$$E = P \times \text{Tempo de operação} \quad (3)$$

Onde:

E = energia disponível (MWh/ano);

P = potência elétrica disponível (MW);

Tempo de operação (h/ano).

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O aterro Morro do Céu, com uma área de 214.000 m², recebia 850 toneladas de resíduos por dia (DOS SANTOS, 2007) e atingiu sua capacidade máxima em 2015, quando deixou de receber resíduos. A Tabela 2 relaciona a composição dos resíduos depositados.

Tabela 2: Composição dos resíduos depositados no aterro Morro do Céu

Tipo de resíduo	%
Matéria orgânica	48,84
Papel/Papelão	18,91
Plástico	21,23
Metal	4,06
Vidro	1,87
Outros	5,09

Fonte: Prefeitura de Niterói, 2012

De 2004 a 2006, o aterro recebeu uma pluviometria média de 1232 mm por ano, o que o caracteriza como convencional. Tanto os valores padrões para a concentração de compostos orgânicos, com exceção do metano, NMOC, do inglês *Nonmethane Organic Compound*

Concentration, quanto da composição do gás de aterro considerados pelo software são compatíveis com o observado na literatura (SHIN et al., 2005; QIAN, KOERNER & GRAY, 2001). Os volumes de NMOC e do gás de aterro são considerados separadamente pelo *software*. A Tabela 3 apresenta os dados fornecidos ao *software LandGEM* (Volume de resíduos e ano de fechamento do aterro) e os dados restantes, selecionados entre as opções disponibilizadas pelo *software*, de acordo com a composição do resíduo e a pluviometria do local. Este *software* livre foi escolhido devido à importância e credibilidade da instituição desenvolvedora, além de ser baseado em uma grande variedade de dados.

Tabela 3: Dados fornecidos ao software LandGEM

Volume de resíduo (t/ano)	Ano de fechamento	k(ano⁻¹)	L₀ (m³/t)	NMOC (ppmv)	Metano (% por volume biogás)
310.250	2015	0.05	170	4000	50

A Figura 2 apresenta a projeção de produção de metano no gás de aterro produzido desde 1983, ano de abertura do aterro, até 2120 fornecido pelo *software LandGEM*.

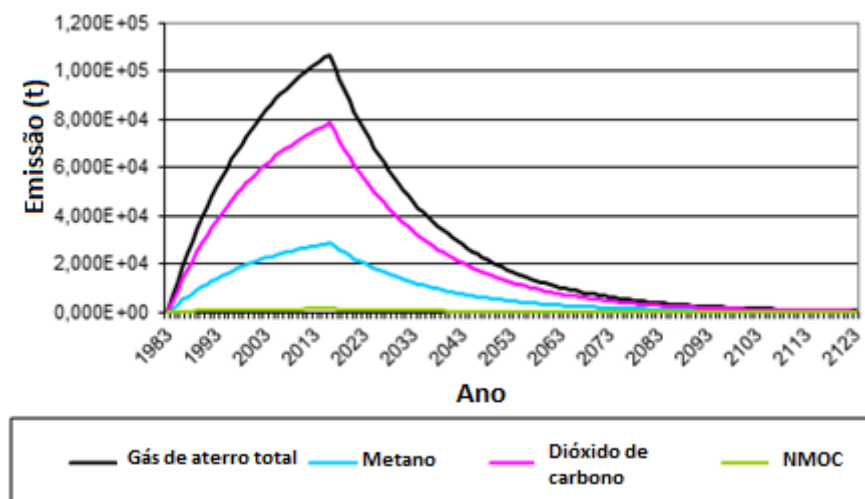


Figura 2: Projeção da produção dos gases de aterro.

O pico da projeção de produção de metano ocorreu em 2016, com 28.500 toneladas. Aterros com esse tipo de composição atingem seu pico de produção de metano em média com 30 anos de funcionamento, apresentando uma vida útil de cerca de 70 anos.

A Tabela 4 apresenta a quantidade de metano que se espera que seja gerada pelo aterro de acordo com a quantidade de RSUs depositados, calculado pelo *LandGEM*. A quantidade de carbono equivalente também foi calculada, considerando o GWP do metano. O aterro Morro do Céu não tem um sistema de queima de gás, assim todo o metano produzido foi considerado na conversão para carbono equivalente, de acordo com a Equação 2.

Tabela 4: Quantidade de metano e carbono equivalente (t)

Ano	Metano (t)	Carbono equivalente (t)
2014	27.790	584.000
2015	28.150	591.000
2016	28.500	599.000

2017	27.110	569.000
2018	25.790	542.000
2019	24.530	515.000
2020	23.330	490.000
2021	22.200	466.000
2022	21.110	443.000
2023	20.080	422.000
2024	19.100	401.000
2025	18.170	382.000
2026	17.290	363.000
2027	16.440	345.000
2028	15.640	328.000
2029	14.880	312.000
2030	14.150	297.000
2031	13.460	283.000
2032	12.810	269.000
2033	12.180	256.000
2034	11.590	243.000
2035	11.020	231.000
Total	425.000	8.930.000

O estudo conduzido pela PNUD e pelo MMA (PNUD & MMA, 2010) analisou projetos que produzem energia elétrica a partir do metano gerado em aterros de várias cidades brasileiras. Para cidades que não apresentam dados ou projetos em andamento, o estudo

desenvolveu a faixa de potência apresentada na Tabela 1, para que fosse utilizada como uma análise genérica para locais que sejam equivalentes a um aterro ou a um lixão.

De acordo com o último censo de 2010 conduzido pelo Instituto de Geografia e Estatística, a cidade de Niterói contava com uma população de 497.883 habitantes (IBGE, 2016), e assumiu-se que todos são atendidos pelo aterro Morro do Céu. A faixa de potência esperada foi calculada considerando a Tabela 4, a partir da população de Niterói, assumindo-se que a faixa de potência e a população da cidade considerada são diretamente proporcionais. A energia disponível estimada foi calculada a partir da faixa de potência de acordo com a Equação 2.

Estima-se que o consumo médio residencial de eletricidade seja de 1,8 MWh por ano por pessoa (PNUD & MMA, 2010). Portanto, a energia que o aterro pode produzir seria suficiente para atender as necessidades de 2.190 casas com 4 pessoas, ou uma cidade de 9.000 habitantes.

Deve-se considerar que as estimativas obtidas com o estudo da PNUD e MMA e do *LandGEM* são diferentes devido às suas respectivas metodologias. O *LandGEM* considera a quantidade de resíduo depositada no aterro enquanto que o estudo PNUD/MMA estima a quantidade potencial de resíduos que pode ser produzida pela população da cidade considerada. Dado a problemática do descarte dos RSUs produzidos no Brasil, espera-se que os aterros recebam uma quantidade menor de resíduos do que é produzido pela população, porém estes RSUs provavelmente serão depositados de forma inadequada em outros lugares. A comparação de ambas as estimativas pode evidenciar a perda potencial devido à falta de um manejo adequado.

No Brasil, uma parcela considerável dos RSUs ainda é descartada em áreas abertas sem qualquer tipo de controle de poluição, ou em locais que não captam todos os líquidos ou resíduos produzidos em decorrência da decomposição dos resíduos. A disposição final com o tratamento adequado dos resíduos sólidos constitui importante problema, não só para os governos e políticas públicas locais, mas também para as populações que convivem com os lixões (BULCÃO; ALBANO, 2010). Neste sentido, um sistema de coleta de gases de aterro já pode ser considerado um benefício tecnológico, social e ambiental.

Em termos de sustentabilidade na gestão de resíduos sólidos, deve-se salientar que princípios de hierarquia na gestão de resíduos dão prioridade à prevenção; a intenção de redução de resíduos em sua fonte de origem é praticada nos países desenvolvidos. A gestão socialmente integrada é definida a partir da importância agregada ao social (em particular a inclusão social), aos aspectos sanitários, ambientais e econômicos, à participação da comunidade (todos eles variáveis), e de acordo com a realidade de cada local (NUNESMAIA, 2002).

Segundo Silva e Campos (2008), alguns cuidados devem ser tomados na captação do biogás de aterros. A forma ideal de captação do biogás de um poço com extração ativa é retirar-se o máximo de gás possível sendo que a captação de forma não adequada pode acarretar no aumento da perda do biogás para a atmosfera, assim como encurtar o tempo de extração potencial do poço quando se afeta a vida bacteriana envolvida nas regiões de entorno de influência.

Destacam-se que a quantidade de emissões evitadas é substancial, sendo o metano (que representa cerca de 60% dos gases emitidos pelos aterros) que apresenta potencial de

aquecimento global 25 vezes maior que o CO₂. Observe-se que as tecnologias passíveis de utilização são bastante difundidas e relativamente baratas; nos países em desenvolvimento os aterros, quando existem, normalmente não fazem a recuperação de gases para fins energéticos ou simplesmente realizam a queima em flares.

Dessa maneira, esse estudo de caso aponta para a aplicabilidade e vantagem da captação de GEEs em aterros nacionais, sendo que foram elencadas as vantagens ambientais de um processo tecnológico através da reforma com hidrogênio, o que permite ao Brasil a adoção em maior escala em municípios de pequeno e médio porte.

IV. CONCLUSÃO

Gerar energia elétrica a partir da captura do gás de aterro contribui na redução da emissão de GEEs para a atmosfera. Esses métodos se tornam importantes instrumentos de gestão socioambiental por trazerem benefícios para o meio ambiente e para a saúde da população local. Os dados obtidos por meio do software *LandGEM* podem ser utilizados para analisar a eficiência do método e para propor melhorias em aterros ao redor do mundo. A geração de energia elétrica a partir da célula combustível com o hidrogênio se constitui além de uma diversificação da matriz energética uma fonte de receita para os municípios brasileiros e seus aterros.

V. REFERÊNCIAS

AITCHISON, Elisabeth. Methane generation from UK landfill sites and its use as an energy resource. **Energy conversion and management**, v. 37, n. 6, p. 1111-1116, 1996.

ALEXANDER, Amy; BURKLIN, Clint; SINGLETON, Amanda. **Landfill gas emissions model (LandGEM) version 3.02 user's guide**. US Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, 2005.

ALVES, Laura A.; COLARES, Reinaldo; UTURBEY, Wadaed. As Atratividades Ambientais e Econômicas do Uso do Biogás Produzido pelo Aterro Sanitário de Belo Horizonte para Geração de Energia Elétrica. **SBSE 2008-Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos 2008**– Belo Horizonte–MG–27 a 30 de abril, 2008.

BULCÃO, Lúcia G.; ALBANO, Helton. O gerenciamento de resíduos sólidos na Região Metropolitana II do Estado do Rio de Janeiro. **RGSA–Revista de Gestão Social e Ambiental** Maio–Ago. 2010, v. 4, n. 2, p. 75-85. 2010..

DOS SANTOS, Marcello F. Plano de gestão do aterro controlado do morro do Morro do Céu: Instrumento de Mudança. Universidade do Estado do Rio de Janeiro (FEN/UERJ). Dissertação de Mestrado. 125 p. 2007.

EPA. LandGEM – Landfill Gas Emission Model, Version 3.02. U.S. Environmental Protection Agency. 2013. Disponível em www.epa.gov/ttn/catc/dir1/landgem-v302.xls. Acessado em 05 de janeiro de 2017.

GOUVEIA, N. [Solid urban waste: socio-environmental impacts and prospects for sustainable management with social inclusion]. **Cien Saude Colet**, v. 17, n. 6, p. 1503-10, Jun 2012. ISSN 1678-4561. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22699641>>.

IBGE. População Estimada. Disponível em <http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=330330&search=rio-de-janeiro|niteroi>. Acessado em: 02 de novembro de 2016.

IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp, 2013.

IPCC. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. **Cambridge University Press**, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2013.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Aproveitamento Energético do Biogás de Aterro Sanitário. Disponível em <http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/politica-nacional-de-residuos-solidos/aproveitamento-energetico-do-biogas-de-aterro-sanitario>. Acessado em: 02 de nov. 2016.

NUNESMAIA, Maria F. A gestão de resíduos urbanos e suas limitações. **Revista Baiana de Tecnologia–SSA**, v. 17, n. 1, p. 120-129, 2002.

PNUD, Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento; MMA, Ministério do Meio Ambiente. Estudo sobre o Potencial de Geração de Energia a partir de Resíduos de

Saneamento (lixo, esgoto), visando incrementar o uso de biogás como fonte alternativa de energia renovável. Resumo Executivo – PNUD. **Arcadis Tetraplan**. São Paulo, 2010.

SHIN, Ho-Chul., PARK, Jin-Won, KIM, Ho-Seok, SHIN, Eui-Soon. Environmental and economic assessment of landfill gas electricity generation in Korea using LEAP model. **Energy policy**, v. 33, n. 10, p. 1261-1270, 2005.

SILVA, Tiago N.; CAMPOS, Lucila M.S. Avaliação da produção e qualidade do gás de aterro para energia no aterro sanitário dos Bandeirantes-SP. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 13, n. 1, p. 88-96, 2008.

QIAN, Xuede; KOERNER, Robert M.; GRAY, Donald H. Geotechnical aspects of landfill construction and design. Prentice Hall, 1ª edição. 2001. ISBN-13: 978-0130125064.