

Avaliação de Risco Ambiental do Aterro Sanitário de São Carlos, SP: Uma Aproximação.

Lina O., Arisvaldo M. J.

Depto de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Escola Politécnica da USP, Brasil.

Cristina S., Luiz K.

Depto de Engenharia Química, Escola Politécnica da USP, Brasil.

Marcelo M.

LabRisco – Laboratório de Análise, Avaliação e Gerenciamento de Risco
Depto de Engenharia Naval e Oceânica, Escola Politécnica da USP, Brasil

1. INTRODUÇÃO

O crescimento da população mundial e o desenvolvimento econômico têm uma relação indiscutível com a geração de resíduos procedentes de diferentes atividades. Segundo o relatório “Global Review of Solid Waste” divulgado pelo Banco Mundial em 2012, a geração de lixo pela população urbana do mundo em 2010 (3 bilhões de pessoas) foi de 1,3 bilhão de toneladas, com geração per capita média de 1,2 kg.hab-1.dia-1. O relatório prevê para 2025 uma geração de resíduos sólidos urbanos da ordem de 2,2 bilhões de toneladas para uma população urbana de 4,3 bilhões, com elevação da taxa per capita média para 1,4 kg.hab-1.dia-1.

A implantação de aterros sanitários é o método de maior uso no mundo para a disposição final de resíduos sólidos, sendo o mais seguro e de mais baixo custo[1]. Esta técnica de engenharia caracteriza-se por tentar reduzir ao máximo os impactos causados ao meio ambiente, porém, apresentam um potencial de dano ambiental significativo, podendo afetar a litosfera, a hidrosfera e a atmosfera pelos compostos resultantes da decomposição dos resíduos [2].

Estima-se que o biogás gerado nos aterros, composto por 60% de metano e 40% de dióxido de carbono, representa mais do 10% do total de emissões antropogênicas de metano no mundo[3], representando 30% das emissões da Europa [4] e o 18% das emissões dos Estados Unidos [5], assim, os aterros constituem-se numa fonte significativa da emissão deste gás de efeito estufa, 25 vezes mais nocivo do que o CO₂. Além do biogás, o chorume produzido no aterro é um líquido potencialmente poluente que deve ser devidamente controlado para evitar impactos negativos no solo e nas águas superficiais e subterrâneas do entorno [6].

No Brasil, apesar de haver uma política de gerenciamento de resíduos estabelecida e rigorosa, somente o 27,7% dos municípios dispõem seus resíduos em aterros sanitários [7] e tem-se encontrado contaminação do meio ambiente em alguns dos aterros implementados [8-10], justificando a recomendação para o desenvolvimento de uma avaliação dos riscos decorrentes nos locais em funcionamento e para os novos empreendimentos.

2. OBJETIVOS DO TRABALHO

O presente estudo tem como objetivos realizar a análise e avaliação qualitativa do risco ambiental da operação do aterro de São Carlos/SP usando a técnica de Análise Preliminar de Perigo; além disso, e se aproximando de uma avaliação quantitativa, serão modelados os processos de emissão de gases e de vazamento de chorume por meio dos softwares GasSim e MODFLOW. Como resultado se espera determinar o risco ambiental associado à operação do aterro, definindo medidas para sua mitigação.

3. DESCRIÇÃO DO TRABALHO REALIZADO

O estudo de análise de risco ambiental associado à operação do aterro sanitário foi elaborado seguindo as seguintes etapas:

3.1 *Caracterização do sistema e definição do modelo conceitual*

O aterro de São Carlos, encontra-se localizado no Km 162 da Rodovia SP-215, na zona rural do município de São Carlos (Figura 1). Este aterro começou a operar em 2013, e foi projetado para ter uma vida útil de 22 anos com o armazenamento final de três milhões de metros cúbicos de resíduos. O aterro apresenta as medidas necessárias para a proteção do meio ambiente, assim, a impermeabilização da base do aterro sanitário é obtida pela compactação do leito natural do terreno escavado, e, sobre o solo compactado é aplicada uma manta de PEAD (polietileno de alta densidade) com 2 mm de espessura, assentada, ancorada e testada por equipe técnica especializada, visando garantir a proteção do solo e das águas subterrâneas na área de influência do aterro.

O sistema de drenagem superficial é constituído por canais de superfície livre a meia encosta envolvendo toda a área do aterro. O sistema de drenagem sub-superficial (interno) visa coletar e conduzir os líquidos percolados gerados na massa de resíduos para o sistema de tratamento

Finalmente o controle da geração e migração dos gases é realizado por meio de sistema de coletores de gases, constituído pela superposição vertical de tubos perfurados de concreto envoltos por uma tela de aço galvanizado preenchido com britas.



Figura 1- Localização do aterro sanitário de São Carlos

De acordo com o sistema descrito, definiu-se o modelo conceitual do sistema em estudo, identificando-se as cadeias Source-Pathway-Receptor, como primeiro passo para o entendimento das interações com o meio ambiente que podem acontecer no caso de operação de um aterro sanitário.

3.2 *Avaliação qualitativa do risco*

A identificação de perigos foi realizada por meio da técnica de Análise Preliminar de Perigo. A aplicação da técnica resulta na identificação e avaliação dos potenciais perigos associados ao projeto de novas instalações ou sistemas, permitindo a sua priorização. O grau de risco foi determinado por uma matriz de risco que relaciona a frequência e as consequências dos cenários de acidente identificados. As tabelas 1 e

2 apresentam as categorias definidas para cada um desses itens, baseadas na literatura e no critério dos autores.

Tabela 1 - Categorias para a frequência de ocorrência dos eventos

Categoria de Frequência	Característica	Observação
0	Não ocorre	Não se espera nenhuma ocorrência durante a vida útil do aterro.
1	Pouco provável	Apesar de tecnicamente possível, não se espera nenhuma ocorrência durante a vida útil do aterro.
2	Provável	Se espera ocorrência, no caso de falhas nos sistemas de contenção
3	Muito provável	Se espera ocorrência durante a vida útil do aterro.

Tabela 2 - Grau de severidade da ocorrência dos eventos

Grau de Severidade	Consequência	Meio ambiente (Solo e corpos hídricos)
3	Grave	Impactos substanciais no meio ambiente da vizinhança, dano ambiental de longo prazo com necessidade de extensivas medidas de mitigação.
2	Média	Impactos moderados a um segmento do meio ambiente, dano ambiental de prazo mediano com necessidade de medidas de mitigação.
1	Reduzida	Mínimos impactos controlados imediatamente.
0	Muito reduzida	Não tem impactos ou estes são desprezíveis.

3.3 Avaliação quantitativa do risco

Uma vez identificados os riscos ambientais pertinentes a cada área, foram utilizadas ferramentas computacionais e modelos estabelecidos para a sua quantificação.

Para o caso do vazamento do chorume foi utilizado o pacote MODFLOW, para simular o transporte de contaminante no meio poroso. O MODFLOW soluciona a equação do fluxo subterrâneo utilizando o método das diferenças finitas e permite rastrear o movimento de uma partícula presente na água subterrânea. Devido à complexidade do sistema a ser tratado e a limitada disponibilidade de dados, obteve-se uma aproximação do cenário de vazamento considerando um conjunto de hipóteses assumidas. Assim, o modelo de fluxo subterrâneo foi construído levando em consideração as sondagens realizadas na área, apresentadas em [11]. Considerando uma coluna estratigráfica conformada por uma camada de solo coluvial, uma camada de solo residual da formação serra geral e a rocha sã. Os demais parâmetros requeridos pelo modelo foram extraídos da literatura e estudos em áreas circundantes com características

semelhantes em São Carlos [12-15]. Com os dados simulou-se o comportamento de uma partícula ao atingir o aquífero.

No caso das emissões de biogás para a atmosfera, a taxa de emissão foi calculada a partir da Equação 1 [16]:

$$E_{CH_4} = k * R_x * L_0 * e^{-k(x-T)} \quad (1)$$

Onde:

E_{CH_4} : emissão de biogás (m^3CH_4/ton RSU)

k: Constante de decaimento

R_x : Fluxo de resíduos por ano (ton RSU)

x: Ano atual (tempo final da simulação)

T: ano de disposição do resíduo no aterro (início de operação - 2013)

L_0 : Potencial de geração de biogás ($m^3biogás/ton$ RSU), obtido a partir da simulação do sistema no pacote GasSim Lite.

A taxa calculada foi referente ao ano 2014, que corresponde ao segundo ano de operação do aterro.

3.4 Caracterização do risco - Tolerância do risco e medidas de tratamento

Os riscos resultantes do Análise preliminar de perigo foram classificados conforme a tabela 3, o risco foi estabelecido multiplicando o valor de categoria de frequência com o valor do grau de severidade.

Tabela 3 - Tolerabilidade do risco

Risco	Tratamento
7-9	Risco intolerável, as consequências ligadas as probabilidades de ocorrência são muito altas.
4-6	Risco tão baixo quanto possível, o risco pode ser tolerado ao seu nível atual se as medidas de controle não são viáveis economicamente.
0-3	Risco tolerável. O risco é tolerado para o nível atual.

Finalmente, foram sugeridas medidas para o tratamento dos riscos priorizados, visando a mitigação dos possíveis impactos ambientais gerados.

4. RESULTADOS OBTIDOS

4.1 Avaliação qualitativa do risco

A tabela 4 apresenta as cadeias fonte-via-receptor identificadas para o aterro de São Carlos

Tabela 4 - Cadeias Fonte-Via-Receptor aterro São Carlos.

Fonte	Via	Receptor
Chorume	Migração vertical até o lençol freático e horizontal no aquífero	Água subterrânea e solo
Biogás	Emissão a través da camada de resíduos	Atmosfera
Chorume	Migração horizontal ao nível topográfico até o receptor	Corpo hídrico superficial

Identificou-se que a operação do aterro pode ter impactos negativos nos meios água, solo e ar das áreas perto de aterro. A tabela 5 apresenta a partir das cadeias identificadas os perigos associados.

As observações referente a cada evento apresentam-se como as justificativas consideradas para os valores outorgados.

Os resultados mostraram que, em ordem decrescentes, os riscos mais relevantes são: o vazamento de chorume, o vazamento de biogás e o arrasto de lixo para corpos hídricos e o solo.

Tabela 5. Análise preliminar de perigo de um aterro sanitário

EVENTO	CAUSAS	CONSEQUÊNCIAS	F	S	R	CLASSIF. DO RISCO	OBSERVAÇÕES
Arrasto de lixo e chorume para áreas fora do aterro.	<ul style="list-style-type: none"> Ocorrência de precipitação com período de retorno muito elevado Obstrução dos dispositivos de drenagem superficial Elevação do nível de água de um corpo hídrico próximo 	Contaminação do solo e água pelo arrasto de sujeira e outros materiais para corpos de água e vizinhanças.	2	2	4	3	A literatura indica que emissões devido a eventos de grande escoamento podem impactar significativamente o meio ambiente [17] porém os eventos devem ser de magnitudes significativas para ter um arraste que impacte áreas fora do aterro, para o caso particular do aterro, este pode impactar o rio Monjolinho que numa porção da fronteira do aterro fica a menos de 200 metros.
Vazamento de chorume	<ul style="list-style-type: none"> Falha dos dispositivos de drenagem Impermeabilização da base da célula mal feita 	Contaminação do solo e de águas subterrâneas por infiltração do chorume	3	3	9	1	A literatura revisada mostrou que mesmo com os sistemas de proteção projetados para os aterros, finalmente existe vazamento de chorume [10,18,19]. Isto tem a ver com que os elementos desses sistemas apresentam falhas por diversas causas, como expansão térmica, longevidade do material, defeitos de fabricação, rupturas na instalação [20], considera-se também a difícil tarefa de recuperar água subterrânea contaminada
Vazamento de biogás	Percolação dos gases na camada de terra que cobre o lixo	Emissão de gás efeito estufa para a atmosfera	3	2	6	2	Os estudos mostram que mesmo os resíduos recebam uma camada argilosa de cobertura, a percolação do gás existirá [21,22], além disso os sistemas de drenagem de gases não são capazes de captar com muita eficiência o biogás produzido (40-60%). Por outro lado, a queima do biogás gera dióxido de carbono que é um gás de efeito estufa, e nas quantidades emitidas pode representar um problema ambiental considerável

4.2 Avaliação quantitativa do risco

A figura 2 apresenta o resultado da simulação do movimento de uma partícula (que para o caso seria chorume) que tem como fonte um dos patamares de resíduos do aterro, as linhas vermelhas indicam a direção do fluxo que no caso dirige-se para a drenagem localizada ao este do aterro.

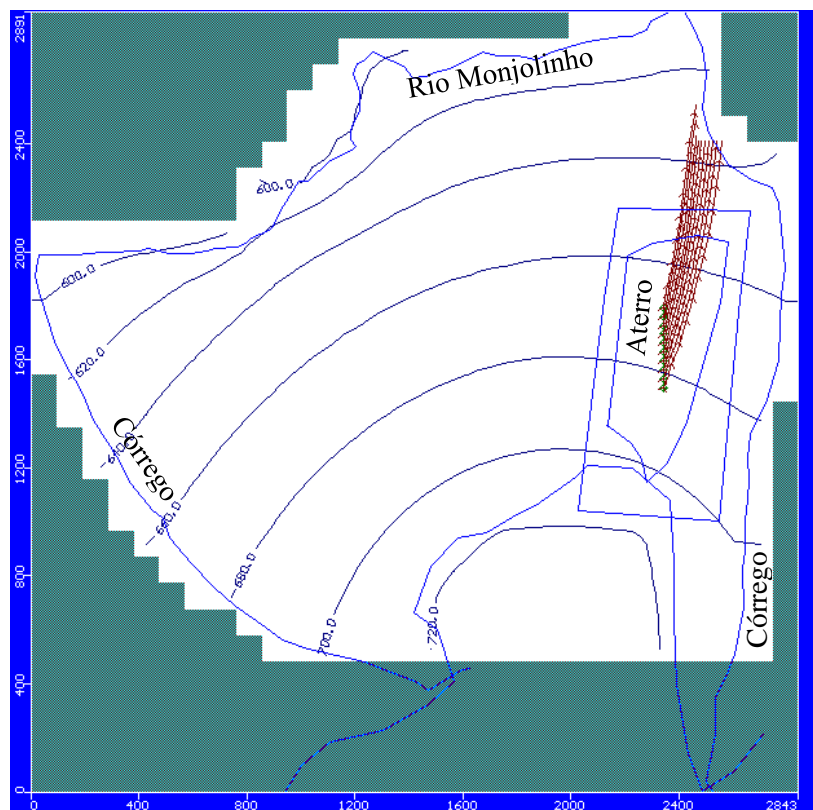


Figura 2 - Fluxo de água subterrânea e viagem de partícula conservativa sem reação.

Os resultados evidenciaram que no caso de haver vazamento de chorume (neste caso representado pela partícula) este se deslocaria até uma área fora do aterro num período de 10 anos.

No caso do vazamento de biogás, foi obtida como primeira instância, a taxa de produção deste no aterro usando o software GasSim Lite.

Considerou-se na modelagem que a massa de resíduos era variável para cada ano de operação do aterro. Tais informações foram obtidas especificamente para o Aterro de São Carlos, de acordo às condições e características com as que o projeto foi desenhado. Isto é, tipo de lixo e composição da massa de resíduos a ser disposta. O resultado da modelagem é apresentado a seguir na Figura 3.

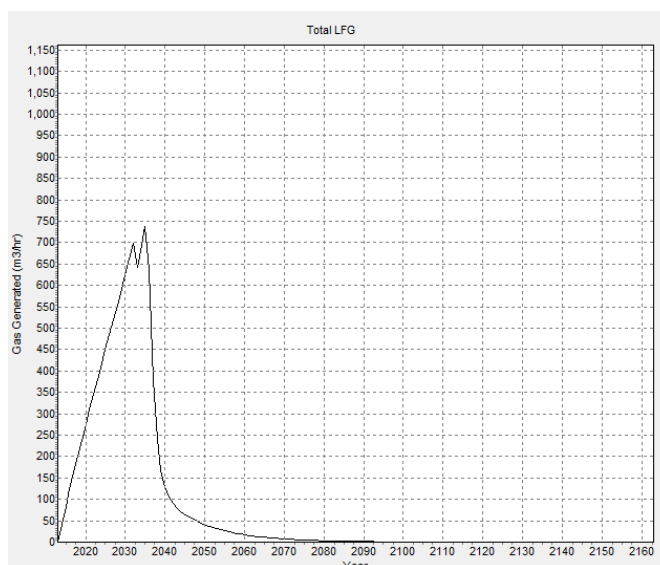


Figura 3 - Gás produzido por ano no aterro São Carlos

Após determinar a quantidade de biogás gerado, o vazamento deste calculou-se usando a Equação 1. Os parâmetros a serem utilizados nesta equação foram determinados a partir de informações obtidas da literatura e de dados de operação do aterro São Carlos.

Considerou-se o valor de k como 0,09, para clima tropical – resíduo úmido de acordo a composição do lixo [23]; o valor de R_x para o ano 2014 foi 60827 ton/ano de acordo com a estimativa da massa de resíduos a serem dispostos no aterro. Finalmente, o valor de L_0 , obtido a partir da Figura 3, foi 150 m³/h aproximadamente, ou seja, 21,56 m³/ton RSU para o ano 2014, correspondente ao segundo ano de operação do aterro, e de 51,33 m³/ton RSU para o ano 2035, ano previsto para o fim de operação deste.

De acordo com as premissas anteriores e os valores calculados para L_0 , determinou-se E_{CH_4} para o ano 2014 em 107870,1 m³ CH₄/ano. Para o ano 2035 a taxa de emissão de biogás foi 80548,2 m³ CH₄/ano.

4.3 Caracterização do risco - Tolerância do risco e medidas de tratamento

A tabela 6 apresenta a tolerabilidade do risco associada a cada evento

Tabela 6. Tolerabilidade do risco

	Valor	Tratamento
Arrasto de lixo e chorume para áreas fora do aterro	4	Risco tão baixo quanto possível, o risco pode ser tolerado ao seu nível atual se as medidas de controle não são viáveis economicamente
Vazamento de biogás	6	Risco tão baixo quanto possível, o risco pode ser tolerado ao seu nível atual se as medidas de controle não são viáveis economicamente
Vazamento de chorume	9	Risco intolerável, as consequências ligadas as probabilidades de ocorrência são muito altas.

Finalmente as medidas propostas para o tratamento do risco foram

- No caso do vazamento de chorume conclui-se que deve ter-se um estrito monitoramento da qualidade da água subterrânea na área do aterro além de um controle adequado das operações de instalação da camada de proteção e do espalhamento do lixo para evitar danos nos seus componentes.
- Embora o risco ambiental gerado pela emissão de biogás para atmosfera esteja em uma faixa tolerável, é recomendado avaliar medidas de controle, como o melhoramento dos sistemas de captação de biogás, além de implementar tecnologias de aproveitamento deste para a produção de energia dentro do aterro.
- Para o arraste do lixo deve ser feita uma revisão do projeto da drenagem superficial para um evento de mínimo 100 anos de período de retorno e a disposição de barreira para evitar saída de escoamento da área do aterro.

5. COMENTÁRIOS FINAIS

Por meio da análise preliminar de perigo foi possível avaliar qualitativamente o risco ambiental decorrente da operação do aterro sanitário São Carlos. Segundo a análise, os riscos foram classificados por ordem de prioridade assim: vazamento de chorume, vazamento de biogás e arrasto de lixo e chorume para áreas fora do aterro.

A quantificação do risco foi realizada por meio de modelos e pacotes computacionais, para o caso do vazamento de chorume e emissão de biogás, porém, para o arrasto de lixo a quantificação não foi feita devido à falta de informações necessárias para a aplicação das metodologias disponíveis

Para cada um dos riscos identificados decorrentes da operação do aterro sanitário São Carlos, é recomendável tomar medidas de controle que permitam mitigar ou eliminar o impacto dos eventos no meio ambiente assim como aproveitar o seu potencial como matéria prima dentro de outros processos, caso do Biogás na produção de energia.

6. REFERÊNCIAS

- [1] BUTT A., GOUDA H.M., BALOCH M.I., PAUL P., JAVADI A.A., ALAM A. “Literature review of baseline study for risk analysis — The landfill leachate case”, *Environment International*, vol 63, November 2014.
- [2] BUTT T. E., LOCKLEY E., KEHINDE O. K., ODUYEMI C. “Risk assessment of landfill disposal sites – State of the art”, *Waste Management*, vol. 28, issue 6, October 2007.
- [3] PRATHER, M., DERWENT, R., EHHALT, D., FRASER, P., SANHUEZA, E., ZHOU, X., “Radiative Forcing of Climate Change, Climate Change 1994”. In: *Radiative Forcing of Climate Change and the Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 1995.
- [4] HUBER-HUMER, M., “International research into landfill gas emissions and mitigation strategies – IWWG working group “CLEAR””, *Waste Manage*, vol. 24, issue 4, 2004.
- [5] ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY EPA, *Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks*, Washington, DC, U.S.A. (2014).
- [6] SALEM Z., HAMOURI K., DJEMAA R., ALLIA K., “Evaluation of landfill leachate pollution and treatment”. *Desalination*, vol. 220, issue 1-3, February 2008.

- [7] IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2000. 2002.
- _ . Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008. 2010a
- _ . Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD). 2010b
- [8] LOPES A., BRIGANTE J. e SCHALCH V., “Influência do Aterro Sanitário de São Carlos (SP), Brasil, na Qualidade das Águas Superficial e Subterrânea”, J. Braz. Soc. Ecotoxicol, vol. 2, issue 2, 2007.
- [9] TANDEL, R. Y., “Contribuição ao estudo da poluição provocada no aquífero freático e no solo pelo aterro controlado da cidade de Rio Claro, SP”. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.
- [10] SANTOS, P.C.V., “Estudo da Contaminação de Água Subterrânea por Percolado de Aterro de Resíduos Sólidos – Caso Jockey Club – DF”. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Bahia. 1996.
- [11] PREFEITURA DE SÃO CARLOS. *Estudo de Impacto Ambiental, Aterro Sanitário Para Disposição Final De Resíduos Sólidos Domiciliares Do Município De São Carlos/Sp*. São Carlos, 2009.
- [12] MURO, M.D. “Carta de zoneamento para seleção de áreas frente a instalação de aterros sanitários no município de São Carlos- SP- escala 1:50000”. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.
- [13] MAZIERO, T.A. “Monitoramento de água subterrânea em área urbana: aspectos quantitativos”. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.
- [14] FAGUNDES, J. R. “Estudo integrado das características geológico-geotécnicas com vista à avaliação de recarga de aquífero: região de São Carlos-SP”. Tese (Doutorado em Geotecnia). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.
- [15] PONS, N.A.D. “Levantamento e diagnósticos geológico- geotécnico de áreas degradadas na cidade de São Carlos SP, com auxílio de geoprocessamento. Tese (Doutorado em Geotecnia). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.
- [16] COELHO, T.C.; ALENCAR, R.; OLIVEIRA, R.M.S. Estimativa da produção teórica de metano gerado no aterro sanitário de Palmas – TO. Forum Ambiental da Alta Paulista. v. 07, n. 12, 2011.
- [17] NEUHOLD C., “Identifying flood-prone landfills at different spatial scales Identifying flood-prone landfills at different spatial scales”, Natural Hazards, vol. 68, issue 3, September 2013.
- [18] PIVATO A., “Landfill Liner Failure: An Open Question for Landfill Risk Analysis”, Journal of Environmental Protection, vol. 2, issue 3, 2011.
- [19] BLUMBERGA M. “Risk Assessment Of The Skede Landfill In Liepaja, Latvia”, Tese de Doutorado Royal Institute of Technology, Stockholm, 2001.
- [20] REDDY D., BUTUL B, *A Comprehensive Literature Review Of Liner Failures And Longevity Center for Marine Structures and Geotechnique*, Department of Ocean Engineering Florida Atlantic University, USA, July 1999.
- [21] SPOKAS, K.; BOGNER, J.; CHANTON, J.P.; MORCET, M.; ARAN, C.; GRAFF, C.; MOREAU-LE GOLVAN, Y.; HEBE, I., “Methane mass balance at three landfill sites: What is the efficiency of capture by gas collection systems? ”, Waste Management, vol. 26, issue 5, July 2006.
- [22] BABILOTTE, A., LAGIER, T., FIANI, E., TARMINI, V., “Fugitive Methane Emissions from Landfills: Field Comparison of Five Methods on a French Landfill”, Journal of Environmental Engineering, vol. 139, p. 777-784, 2010.
- [23] IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. Disposição de Resíduos Sólidos. Módulo 5: Resíduos. Volume 3, 1996.