

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

ESTUDO DAS EMISSÕES DE BIOGÁS EM CAMADAS DE COBERTURA DE ATERRO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Laís Roberta Galdino de Oliveira¹
José Fernando Thomé Jucá¹
Maria Odete Holanda Mariano¹
* Alison de Souza Norberto¹

STUDY OF BIOGAS EMISSIONS BY TOP COVER OF MUNICIPAL SOLID WASTE LANDFILLS

Recibido el 25 de enero de 2019; Aceptado el 18 de enero 2020

Abstract

This work evaluated biogas emissions over time in an experimental cell located at the Muribeca solid waste landfill, Jaboatão dos Guararapes / PE, Brazil. In this sense, measurements of flow rates and concentrations of methane (CH₄) and carbon dioxide (CO₂) were made by the drainage system and the coverage layer over a period of 3 years. Determination of the flow of CH₄ and CO₂ in the gas drains was performed by inserting a thermo-anemometer transversely to the direction of flow of the gas flow in the pipe and cover layer static flow. Three-layer configurations were used, the first layer, called the conventional layer was formed by compacted soil, the second layer, called the capillary barrier, consisted of a crushed stone sublayer and a compacted soil sublayer, and the third layer, called oxidative layer, was composed of a mixture of soil and organic compost. During the monitoring period it can be observed that the biogas emissions by the cover layers were lower in the rainy periods, the Capillary Layer for example, in the rainy season presented emissions of 2% of CH₄ and 4% of CO₂, while in the dry season. it had emissions of 9% of CH₄ and 25% of CO₂.

Keywords: biogas, coverage layer, drainage system, emissions, solid waste landfill.

¹ Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Brasil.

* Autor correspondente: Universidade Federal de Pernambuco, Campus Acadêmico do Agrste. Rodovia BR 104 KM 59 s/n, Sítio Juriti, Nova Caruaru, 55002970 - Caruaru, PE – Brasil. Email: alison_norberto@hotmail.com

Resumo

Este trabalho avaliou as emissões de biogás ao longo do tempo em uma célula experimental localizada no aterro de resíduos sólidos da Muribeca, Jaboatão dos Guararapes/PE, Brasil. Neste sentido, foram realizadas medições de vazões e concentrações de metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2) pelo sistema de drenagem e na camada de cobertura no período de 3 anos. As determinações do fluxo de CH_4 e CO_2 nos drenos de gases foram realizadas por meio da inserção de um termo-anemômetro transversalmente ao sentido do escoamento do fluxo de gás na tubulação e na camada de cobertura, utilizou-se a metodologia do ensaio com placa de fluxo estática. Foram utilizadas três configurações de camadas, a primeira camada, denominada de camada convencional era formada por solo compactado, a segunda camada, denominada de barreira capilar, era constituída por uma subcamada de pedra britada e por uma subcamada de solo compactado, e a terceira camada, denominada de camada oxidativa, era composta por uma mistura de solo e composto orgânico. Durante o período de monitoramento pode-se observar que as emissões de biogás pelas camadas de cobertura foram menores nos períodos chuvosos, a Camada Capilar por exemplo, no período chuvoso apresentou emissões de 2% de CH_4 e 4% de CO_2 , já no período seco a mesma apresentou emissões de 9% de CH_4 e 25% de CO_2 .

Palavras chave: biogás, aterro de resíduos sólidos, camada de cobertura, emissões, sistema de drenagem.

Introdução

A degradação anaeróbia da matéria orgânica em aterros de resíduos sólidos urbanos é uma fonte importante dos principais gases responsáveis pelo aquecimento global, o metano (CH_4) e o gás carbônico (CO_2), sendo denominados gases de efeito estufa (GEE) (Oliveira, 2013).

O efeito estufa é um fenômeno que ocorre de forma natural na atmosfera, que mantém a temperatura no planeta Terra. No entanto, devido ao aumento na concentração dos GEE proveniente, principalmente, das atividades humanas, espera-se que o efeito estufa se intensifique, e conseqüentemente aumento das temperaturas do planeta (Alves, 1998).

Neste contexto, Paz et al. (2015) afirmam que os aterros sanitários são fontes significativas de metano, sendo responsáveis por 11% das emissões totais de CH_4 provenientes de diversos setores da economia tais como produção de energia, processos industriais, agropecuária mudanças no uso da terra e tratamento de resíduos.

Com a criação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) em 2010, agregaram-se instrumentos importantes para o enfrentamento dos principais problemas ambientais, sociais e econômicos decorrentes do manejo inadequado dos resíduos sólidos (Brasil, 2010). No âmbito de destinação final dos resíduos, a PNRS criou uma meta para a eliminação dos lixões existentes e a disposição ambientalmente adequada dos resíduos sólidos.

Com a disposição adequada em aterros sanitários tem-se um conjunto de sistemas e medidas necessárias para proteção do meio ambiente contra danos e degradações. Um destes sistemas de proteção ao meio ambiente é a camada de cobertura final, que funciona como uma barreira

de impermeabilização dos resíduos a condições do ambiente externo, impedindo a infiltração da água precipitada (diminuindo a taxa de formação de lixiviado) e a liberação de gases para a atmosfera (Mariano, 2008).

Segundo Barlaz et al. (2004, apud Teixeira et al., 2009), os sistemas de drenagem de biogás mais eficientes são capazes de captar de 75% do biogás gerado em um aterro sanitário, entretanto, na maioria dos casos a eficiência está entre 40 e 60%, o excedente pode atravessar a camada de cobertura e escapar para a atmosfera (emissões fugitivas). Spokas et al. (2006) aferem que camadas de coberturas eficientes podem reter mais de 84% dos gases dentro da massa do aterro. Já os estudos desenvolvidos por Lombardi et al. (2006) mostram que a relação entre os valores de produção de gás calculados por equações já desenvolvidas em relação aos valores de gás medidos durante a recuperação, é de um reaproveitamento entre 50 a 80% deste gás gerado.

Para a medição do fluxo de gases pelas camadas de cobertura, os principais métodos de investigação correspondem à placa de fluxo estática, placa de fluxo dinâmica e análises por infravermelho (Mariano; Jucá, 2010). A utilização de placas de fluxo apresenta vantagens por ser um método mais preciso para a determinação do fluxo pontual, exige mão de obra pouco especializada, além de possibilitar a determinação das características e parâmetros do solo de cobertura no local do ensaio, como também permite a avaliação simultânea de diversos gases, além de possibilitar a análise da influência da idade do resíduo, das condições atmosféricas e das pressões do gás no contato solo-resíduo (Cossu et al., 1997, apud Mariano; Jucá, 2010).

Diante desta problemática, nota-se a importância de investigar se as camadas de cobertura estão cumprindo sua função de isolar os resíduos aterrados e minimizar as emissões de agentes poluentes no meio ambiente, bem como avaliar seu desempenho ao longo dos anos.

O objetivo desta pesquisa foi avaliar as emissões de biogás das camadas de cobertura existentes na célula experimental do Aterro da Muribeca. Foram monitoradas por um período de 3 anos, através do ensaio de placa de fluxo e em termos de fluxo do gás metano. Com isso foram avaliadas as eficiências das camadas de cobertura.

Material e métodos

Caracterização da área de estudo

Este estudo foi realizado na Célula Experimental da Muribeca, localizada no Aterro Controlado de mesmo nome, no município de Jaboatão dos Guararapes, Estado de Pernambuco, Brasil. A Célula Experimental possui uma área de base de 5,993 m² e altura máxima de 9 metros, distribuída em dois patamares com três e seis metros de altura. A capacidade de RSU da célula é de aproximadamente 36,659 m³.

A camada de cobertura dos taludes e da berma era do tipo convencional, constituída de cerca de 0.60 m de solo compactado, enquanto a cobertura do platô superior foi dividida em três regiões com diferentes composições de materiais para avaliação da eficiência de retenção do biogás na camada final (Figura 1). Salienta-se que as camadas de cobertura foram construídas diretamente sobre o resíduo aterrado, sem nenhuma camada de distribuição de gás entre os resíduos e o solo compactado (Oliveira, 2013).

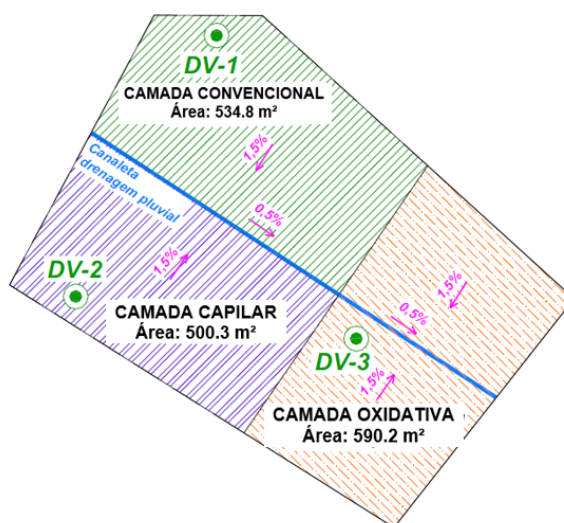


Figura 1. Distribuição dos três tipos de cobertura na camada superior da célula experimental. Fonte: Maciel (2009).

As camadas de cobertura experimentais foram denominadas de acordo com o material utilizado, tendo sido executadas com as seguintes características:

- Camada oxidativa: camada composta por cerca de 30 cm de solo compactado sobreposto por uma camada de aproximadamente 30 cm de mistura de solo e composto oriundo da unidade de compostagem existente no aterro (Figura 2), em duas proporções: 50% de solo e 50% de composto (em volume), ocupando uma área de 291.8 m², e 75% de solo e 25% de composto (também em volume), ocupando uma área de 298.4 m². Em função da declividade da superfície do aterro, a espessura total da camada varia de 40 a 75 cm.
- Barreira capilar: camada composta por aproximadamente 20 cm de pedra britada do tipo rachinha (diâmetro médio de 10 cm), sobreposta por uma camada de solo compactado com espessura média de 50 cm (Figura 2), no entanto devido a declividade da superfície do aterro, a espessura total da camada variou de 50 a 90 cm, ocupando uma área superficial de 500.3 m². Na interface entre o solo e a camada de pedra, foi utilizado um geotêxtil tipo tecido-não-tecido ou agulhado RT09 (Bidim®), para minimizar o efeito de

grande diferença de granulometria entre as pedras e o solo compactado, evitando a perda de material.

- Camada convencional: camada de cerca 70 cm de solo compactado, variando entre 50 a 90 cm em função da declividade da superfície do aterro (Figura 2), ocupando uma área superficial de 534.8 m².

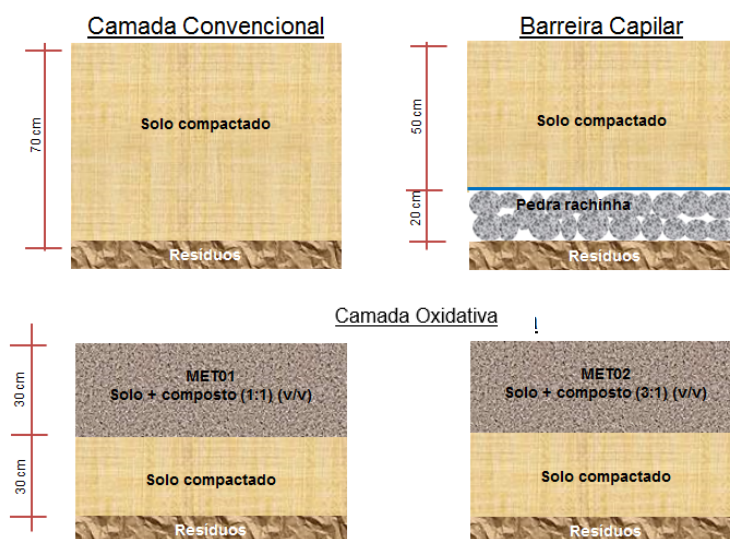


Figura 2. Perfis das camadas experimentais na região superior da Célula. Fonte: Lopes (2011).

Inicialmente o local possuía características de um lixão, onde os resíduos eram dispostos a céu aberto, com a presença de catadores vivendo e trabalhando no local. A partir dessa situação a comarca de Altinho (Município Pernambucano), por meio da promotoria de justiça moveu uma ação judicial, visando a extinção do lixão e regularização da área como aterro sanitário ou controlado como mencionado anteriormente. A ação previa, dentre outras coisas: a instalação de um aterro sanitário, a retirada da população que residia no local, a recuperação da área, dentre outras medidas exigidas pela Lei n° 12,305/2010.

Emissões pelos drenos de biogás

O monitoramento do sistema de drenagem da Célula Experimental da Muribeca foi realizado por um período de 4 anos e 5 meses (53 meses) de monitoramento com periodicidade semanal. O monitoramento teve início após o enchimento e a geometrização da Célula experimental, isto é, logo após o encerramento da operação da célula. Os parâmetros medidos foram: vazão, pressão e concentração do biogás emitido pelos cinco drenos verticais do sistema de drenagem (Oliveira, 2013).

Para medir a vazão do biogás, foi utilizada a metodologia da Norma BSI 1042-2.3 – 19984 – *Measurement of Fluid flow in closed conduits. Velocity area methods. Methods of flow measurement in swirling or asymmetric flow conditions in circular ducts by means of currentmeters or Pilot static tubes*, devido à falta de metodologia brasileira específica para a medição de vazão em drenos de gases de aterros sanitários, onde:

$$Q = vA$$

Equação (1)

No qual:

Q: Vazão do biogás, em $m^3.s^{-1}$

V: Velocidade do gás, em $m.s^{-1}$

A: Área da seção por onde está passando o gás, no caso, seção do tubo de PVC, m^2

A medição da velocidade do biogás nos cinco drenos da Célula Experimental (marcados em vermelho na Figura 3) foi realizada por meio da inserção de um termo-anemômetro transversalmente ao sentido do escoamento do fluxo de gás na tubulação. O equipamento utilizado foi o termo-anemômetro digital portátil, marca Instrutherm, modelo TAFR-180, sistema de fio quente, faixa de medição de 0.2 a 20 m/s, limite de quantificação de 0.1 m/s e faixa de erro de $\pm 5\%$ da leitura (Oliveira, 2013).



Figura 3. Layout da Célula Experimental da Muribeca. Fonte: Maciel (2009).

O procedimento consistiu em: (a) acoplar um tubo de PVC na saída do dreno de biogás. Este tubo possuía 0.037 m de diâmetro e era perfurado para colocação da haste do anemômetro; (b) Colocar o termo-anemômetro no orifício e esperar a leitura estabilizar, então finalmente realizar a leitura da velocidade, conforme apresentado na Figura 4. Vale salientar que os drenos estavam fechados para a atmosfera.



Figura 4. Monitoramento da vazão do biogás dos drenos.

Além da vazão, mediu-se a pressão e a concentração dos principais gases que compõe o biogás nos drenos. Essa medição pôde ser realizada através da colocação de um CAP furado, com um bico rosqueado no orifício e vedado com silicone. Uma mangueira de PVC com uma das pontas acoplada ao bico e a outra acoplada nos equipamentos de medição de pressão de biogás e quantificação dos principais componentes do biogás (CH₄, CO₂, O₂ e H₂S).

Emissões pelos drenos de biogás

As determinações dos fluxos de CH₄ em cada tipo de cobertura da Célula Experimental foram realizadas utilizando-se a metodologia do ensaio com placa de fluxo estática descrita por Maciel (2003). Essa metodologia consiste na cravação da placa no solo da cobertura e na posterior medição da concentração dos gases no interior da placa, com medidas também de temperatura interna e externa, pressão interna e externa, ao longo do tempo. No total foram realizados 107 ensaios de placa de fluxo em um período de 39 meses, compreendendo um período de baixas e elevadas precipitações (Oliveira, 2013).

A Agência Ambiental do Reino Unido (Environmental Agency, 2004), recomenda que o número de ensaios em áreas superiores a 5,000 m² deve ser calculado com base na expressão:

$$n = 6 + 0.15A^{0.5}$$

Equação (2)

No qual:

n: Número de ensaios;

A: Área ou região do aterro investigada, em m²;

Para áreas menores que 5,000 m², o número de ensaios deve ser: $n = A / (5,000 \cdot 16)$ com no mínimo de 06 ensaios. Desta forma, a quantidade de ensaios está de acordo com o que determina a referida norma, que recomenda 6 ensaios de placa de fluxo para a área total de 1,625.3 m² (que compreende o somatório das 3 camadas de cobertura, como apresentado na Figura 1).

Tais ensaios foram realizados mensalmente com periodicidade quinzenal, ou seja, duas vezes por mês foram realizados ensaios de placa de fluxo nos três tipos de camada de cobertura, objetivando, uniformizar o efeito das condições meteorológicas e geração de biogás na célula de RSU.

A placa de fluxo utilizada nos ensaios era construída com lateral de aço galvanizado de 2 mm de espessura, sendo o topo da placa em acrílico cristal com 8 mm de espessura, fixado na parte metálica com dois parafusos em cada lateral e vedado com espuma de poliuretano de alta densidade. A placa tem formato de degrau para garantir que, ao ser cravada na camada de cobertura, evitará a entrada de ar atmosférico para o interior da caixa, além de facilitar a sua cravação no solo. O degrau ficava em contato direto com o solo de maneira que a área útil da placa (de 0.40 m x 0.40 m e 8 litros de volume) fosse a única área de passagem de fluxo de biogás pela camada de cobertura durante o ensaio.

No topo da caixa existiam três conexões de saída (tipo encaixe rápido) onde, por meio de uma mangueira flexível de polietileno, eram conectados os equipamentos de medição de gases, temperatura e pressão. A placa de fluxo e os equipamentos utilizados no ensaio são apresentados na Figura 5.



Figura 5. Equipamentos utilizados nos ensaios de placa de fluxo.

Os gases foram analisados com um analisador de gás portátil Dräger X-am 7000, que permite a análise simultânea e contínua de CH₄, CO₂, H₂S e O₂, a pressão do biogás foi medida com um Manômetro digital portátil Dwyer, Modelo 477-2, a pressão atmosférica com um Barômetro digital portátil Lufft, Modelo C300 e temperatura ambiente e do biogás com termômetro digital Minipa, Modelo MT-525.

Para o desenvolvimento do ensaio, a placa era cravada em local aleatório, precedido de um nivelamento e limpeza do terreno. Em seguida os equipamentos eram acoplados e as medições dos parâmetros eram feitas em intervalos de 5 minutos, até obter-se valores constantes das concentrações de gases. A instalação da placa de fluxo seguia o seguinte procedimento:

- A placa era colocada no local do ensaio e pressionada contra o solo para fixação de forma que a cravação fosse vertical, com os conectores de saída abertos de maneira que não ocorresse acúmulo de gases no interior da placa;
- Após a fixação era colocado solo úmido, da própria camada de cobertura (oriundo do nivelamento), para vedação lateral;
- A leitura da concentração dos gases na placa de fluxo estática iniciava-se logo após a sua cravação e este momento era considerado o instante inicial de cada ensaio.

A determinação do fluxo de gás na camada foi realizada por meio da avaliação da concentração dos gases aprisionados no interior da placa com o tempo, ou seja, a emissão do gás está relacionada com a velocidade de aumento da concentração do gás no interior da placa. Vale ressaltar que os volumes foram normalizados para as Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTP). A Equação 3 representa a forma de determinação do fluxo volumétrico nos ensaios e placa de fluxo estática.

$$J = (V_p / A) \cdot (\Delta C / \Delta t)$$

Equação (3)

No qual:

J: Fluxo volumétrico (NI.m⁻².dia⁻¹)

V_p: Volume útil da placa de fluxo (l)

A: Área de solo coberto pela placa (m²)

ΔC/Δt: Variação da concentração do gás (% vol.) com o tempo (s)

Para determinação dos fluxos em termos mássicos, utilizou-se a densidade corrigida dos gases em função das leituras de temperatura interna. O fluxo mássico foi calculado no intervalo inicial do ensaio para se obter a maior taxa de percolação do gás pela camada de cobertura, simulando a condição do aterro de resíduos, onde a camada de cobertura fica em contato com a atmosfera e conseqüentemente ocorrem os gradientes máximos de pressão e concentração (Maciel, 2003).

As taxas de fluxo mássico e coeficiente linear de determinação (R²) foram determinados em todos os testes, sendo os ensaios considerados válidos aqueles com valores de coeficientes acima de 0.9. É apresentado na Figura 6 a forma de determinação do fluxo de metano e gás carbônico.

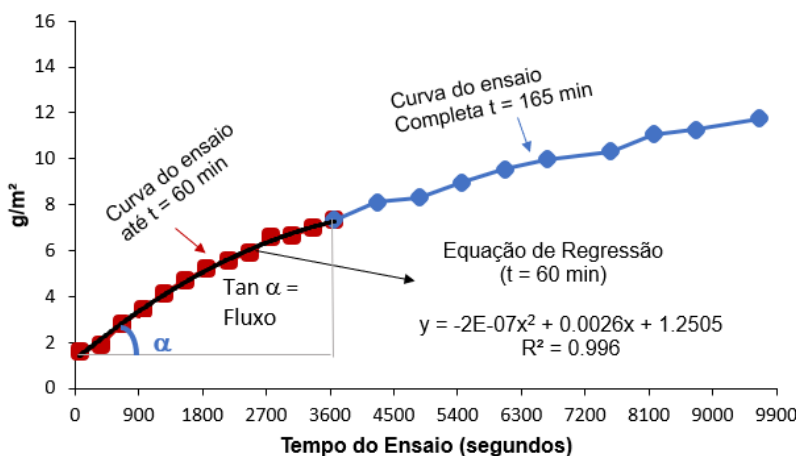


Figura 6. Determinação do fluxo de gases a partir de ensaios de placa de fluxo. Fonte: Mariano (2008).

Relação entre as emissões pelos drenos de biogás e pela camada de cobertura

De posse dos dados de emissões fugitivas e emissões pelo sistema de drenagem estabeleceu-se uma relação entre o fluxo médio mensal de metano nas diferentes camadas e a emissão total (média mensal) da Célula Experimental, ao longo do tempo. Considerou-se como emissão total, a soma das emissões pelo sistema de drenagem e pela camada de cobertura (Oliveira, 2013). Para a determinação da relação emissão pela camada de cobertura/emissão total (E_{cc}/E_t) foi realizado o seguinte procedimento:

- Determinação da média mensal das emissões de cada dreno do sistema de drenagem em m^3 /dia;
- Determinação da média mensal das emissões por cada tipo de camada de cobertura em $g.m^2$ /dia;
- Transformação das emissões por cada tipo de camada de cobertura para m^3 /dia, multiplicando as emissões mensais pela área total de cada camada de cobertura e posteriormente dividindo pela densidade do gás metano ($716 g/m^3$);
- Obtenção da emissão total, somando a média mensal das emissões de cada dreno e de cada camada de cobertura;
- Determinação do percentual de emissões de cada camada de cobertura, dividindo-se a média mensal de cada camada pela emissão total naquele mês.

Resultados e Discussão

Emissões de biogás pelas camadas de cobertura e drenos

As emissões de biogás pelas camadas de cobertura existentes na Célula Experimental foram medidas por meio do ensaio de placa de fluxo estática e foram quantificadas desde a instalação da cobertura final da célula que ocorreu aproximadamente 1 ano após o preenchimento da célula,

isto é um período de 39 meses (3 anos e 3 meses). As medições foram realizadas em termos de fluxos dos gases CH₄ e CO₂. No total foram realizados 107 ensaios de placa de fluxo distribuído entre os períodos secos e chuvosos (Oliveira, 2013). Estão apresentados na Tabela 1 as quantidades de ensaios realizados para cada tipo de camada de cobertura.

Tabela 1. Quantidade de ensaios de placa de fluxo.

Período	OXIDATIVA		BAC.	CONV.	TOTAL
	MET01 50/50	MET02 75/25			
Setembro/08 a fevereiro/09	03	08	10	11	32
Março/09 a agosto/09	05	03	08	09	25
Setembro/09 fevereiro/10	07	10	15	18	50
TOTAL	15	21	33	38	107
	36				

Fonte: Oliveira (2013).

O período analisado foi de Fevereiro de 2009 a Maio de 2012, período no qual tem-se dados das emissões pelo sistema de drenagem e pelas camadas de coberturas avaliadas.

Para uma melhor compreensão do estudo, dividiu-se a apresentação dos dados e análise dos resultados por camada. Assim, inicialmente serão apresentados com a camada convencional, depois com a barreira capilar e por último com a camada oxidativa.

Camada Convencional

É apresentado na Figura 7 as emissões de metano pelo dreno 1, localizado na camada convencional, e pela referida camada de cobertura, durante um período de tempo de 3 anos. Nota-se uma redução das emissões tanto pelo dreno quanto pela camada de cobertura ao longo do período observado. Outro fator bastante importante são os períodos secos e chuvosos, nos quais observa-se maiores e menores emissões pela camada de cobertura, respectivamente. O comportamento inverso ocorre no sistema de drenagem (Oliveira, 2013).

Na Figura 8 estão presentes resultados da relação da emissão pela camada de cobertura/emissão total (E_{cc}/E_T) para a camada convencional. A camada convencional emitiu cerca de 27% de metano e 37% de dióxido de carbono da emissão total, no período estudado.

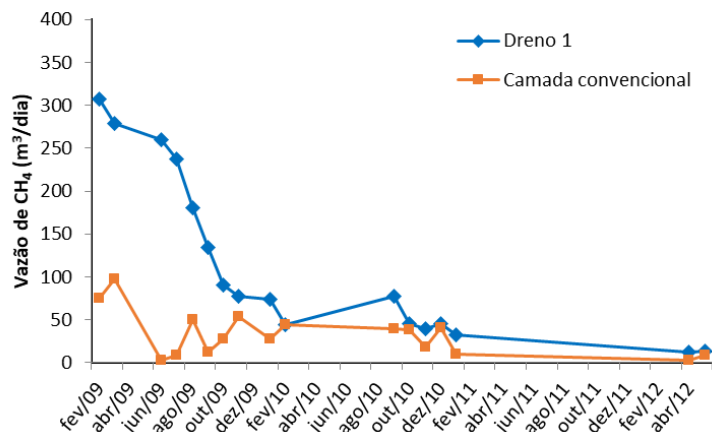


Figura 7. Emissões de metano pelo dreno 1 e pela camada convencional ao longo do tempo. Fonte: Oliveira (2013).

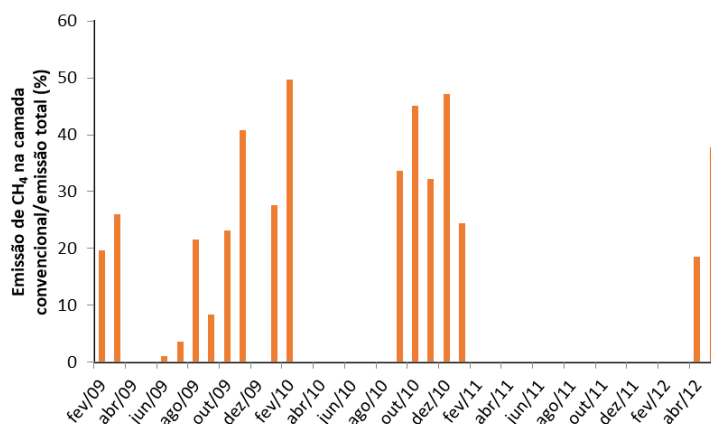


Figura 8. Relação entre as emissões de metano pela camada convencional e a emissão total ao longo do tempo. Fonte: Oliveira (2013).

Subdividindo-se o período de estudo em épocas secas e chuvosas obtiveram-se diferentes porcentagens de emissões pela camada convencional, são elas:

- No primeiro período seco analisado, a camada emitiu de 19.70% de CH₄ e 20.87% de CO₂ da emissão total;
- No primeiro período chuvoso analisado, a camada emitiu de 13.06% de CH₄ e 19.10% de CO₂ da emissão total;
- No segundo período seco analisado, a camada emitiu de 29.91% de CH₄ e 37.80% de CO₂ da emissão total;
- No terceiro período seco analisado, a camada emitiu de 36.49% de CH₄ e 57.55% de CO₂ da emissão total;
- No segundo período chuvoso analisado, a camada emitiu de 28.20% de CH₄ e 27.35% de CO₂ da emissão total.

Com isso, nota-se uma elevação de 16.79% e 36.68%, nas emissões de CH₄ e CO₂, respectivamente, entre o primeiro e terceiro período seco. Para o período chuvoso, os incrementos nas emissões foram de 15.13% para o CH₄ e 8.25% para o CO₂. Desta forma, observa-se que mesmo produzindo menos biogás, as emissões fugitivas pela camada de cobertura aumentaram ao longo do tempo, visto que a proporção Ecc/ET foi crescente com o passar dos anos, indicando a perda de qualidade da camada convencional.

Nota-se também uma forte influência das condições climáticas, visto que as médias de emissões para o período chuvoso foram de 18 e 22%, para metano e dióxido de carbono, respectivamente. Em contraposição, no período seco a média foi de 32% de CH₄ e 45% de CO₂. Confirmando a afirmação de Fischer (1999), de que as emissões em aterros de RSU variam muito ao longo das estações do ano (sazonalmente) (Oliveira, 2013).

Barreira Capilar

A Figura 9 ilustra as emissões de metano pelo dreno 2, localizado na barreira capilar, e pela referida camada de cobertura, durante um período de tempo de 3 anos.

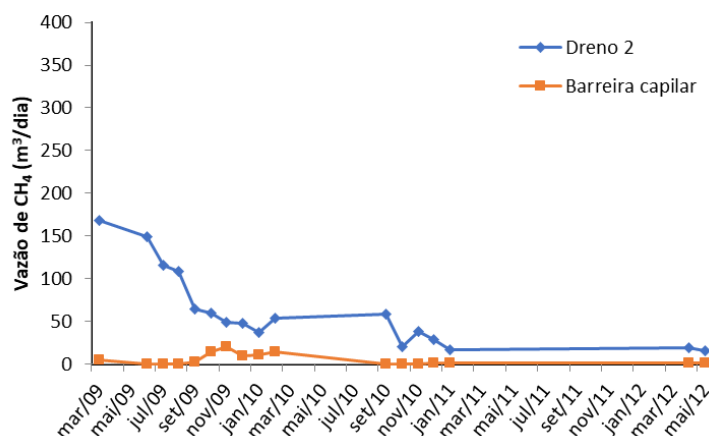


Figura 9. Emissões de metano pelo dreno 2 e pela barreira capilar ao longo do tempo. Fonte: Oliveira (2013).

Também para a barreira capilar, tem-se um decréscimo das emissões do dreno e da camada de cobertura ao longo do período estudado. Nota-se também a influência dos períodos secos e chuvosos, onde se observa elevações ou reduções das emissões pela camada de cobertura e pelo sistema de drenagem (Oliveira, 2013).

Na Figura 10 é ilustrada a relação da emissão pela camada de cobertura/emissão total (Ecc/Et) para a barreira capilar.

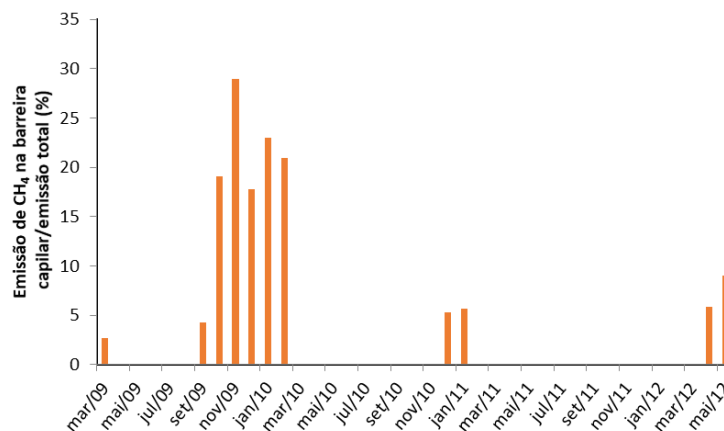


Figura 10. Relação entre as emissões de metano pela barreira capilar e a emissão total ao longo do tempo. Fonte: Oliveira (2013).

A barreira capilar emitiu aproximadamente 7% de CH₄ e 18% de CO₂ da emissão total, no período estudado. Fragmentando o período de estudo em épocas secas e chuvosas encontraram-se distintas porcentagens de emissões pela barreira capilar, são elas:

- No primeiro período chuvoso analisado, a camada emitiu de 0.68% de CH₄ e 0.29% de CO₂ da emissão total;
- No primeiro período seco analisado, a camada emitiu de 19.00% de CH₄ e 19.80% de CO₂ da emissão total;
- No segundo período seco analisado, a camada emitiu de 2.18% de CH₄ e 18.54% de CO₂ da emissão total;
- No segundo período chuvoso analisado, a camada emitiu de 7.41% de CH₄ e 8.93% de CO₂ da emissão total.

Nota-se que para o período chuvoso, não houve incremento nas emissões. No entanto, entre o primeiro e segundo período seco, ocorreu uma elevação de 6.73 e 8.64%, nas emissões de CH₄ e CO₂, respectivamente.

Para esta camada, a proporção Ecc/ET sofreu um aumento no passar do tempo, e principalmente nos períodos secos, desta forma, pode-se dizer que esta camada está emitindo mais proporcionalmente a emissão total do Aterro e conseqüentemente a produção de biogás pela Célula de RSU. Mostrando, com isso, que a barreira capilar perdeu a capacidade que tinha inicialmente de reter o biogás, em especial nos períodos mais críticos do ano.

Nesta camada também se nota uma forte influência das chuvas, visto que as médias de emissões para o período chuvoso foram de 2 e 4%, para metano e dióxido de carbono, respectivamente. E no período seco a média foi de 9% de CH₄ e 25% de CO₂.

Camada Oxidativa

Na Figura 11 estão apresentadas as emissões de metano pelo dreno 3, localizado na camada oxidativa, e pela referida camada de cobertura, durante um período de tempo de 3 anos. O comportamento na camada oxidativa foi semelhante à das demais camadas de cobertura já analisadas: (i) houve uma redução das emissões do dreno 3 e da camada de cobertura estudada durante período estudado; (ii) e notou-se uma influência dos períodos secos e chuvosos, onde observa-se maiores e menores emissões pela camada de cobertura, respectivamente. O comportamento inverso ocorre no sistema de drenagem (Oliveira, 2013).

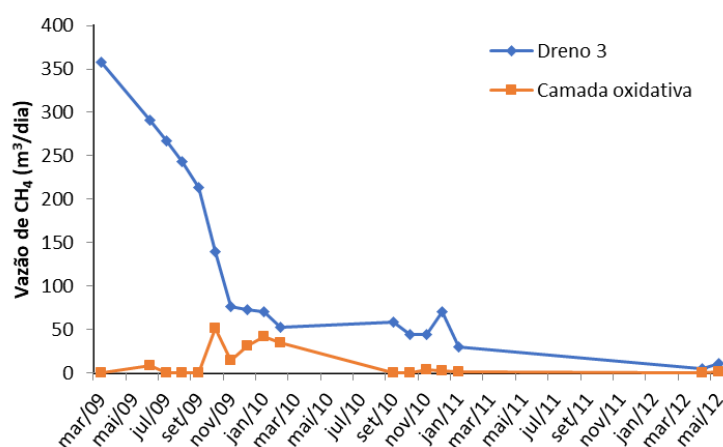


Figura 11. Emissões de metano pelo dreno 3 e pela camada oxidativa ao longo do tempo. Fonte: Oliveira (2013).

É apresentada na Figura 12 a relação da emissão pela camada de cobertura/emissão total (Ecc/Et) para a camada convencional.

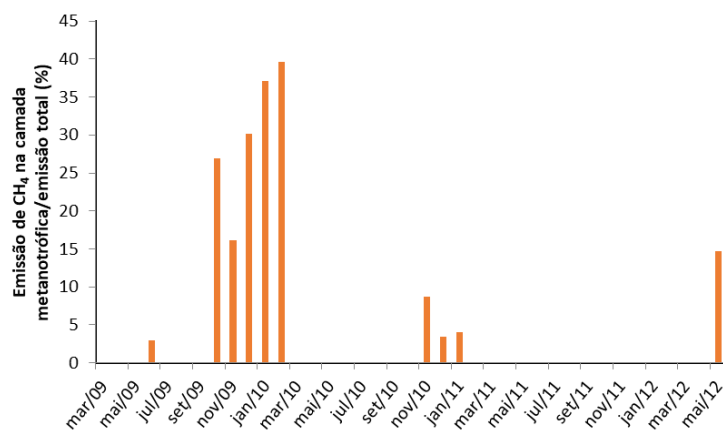


Figura 12. Relação entre as emissões de metano pela camada oxidativa(metanotrófica) e a emissão total ao longo do tempo. Fonte: Oliveira (2013).

A camada oxidativa emitiu cerca de 11% de CH₄ e 28% de CO₂ da emissão total, no período estudado. Subdividindo-se o período de estudo em épocas secas e chuvosas encontraram-se diferentes porcentagens de emissões pela camada oxidativa, são elas:

- No primeiro período chuvoso analisado, a camada emitiu de 0.73% de CH₄ e 2.54% de CO₂ da emissão total;
- No primeiro período seco analisado, a camada emitiu de 24.97% de CH₄ e 38.76% de CO₂ da emissão total;
- No segundo período seco analisado, a camada emitiu de 3.22% de CH₄ e 39.60% de CO₂ da emissão total;
- No segundo período chuvoso analisado, a camada emitiu de 7.35% de CH₄ e 16.20% de CO₂ da emissão total.

Desta forma, nota-se que para o período chuvoso, não houve incremento nas emissões. Em contraposição, entre o primeiro e segundo período seco, ocorreu uma elevação de 6.61 e 13.66%, nas emissões de CH₄ e CO₂, respectivamente.

A proporção Ecc/ET, para esta camada, também se elevou ao longo do tempo, principalmente nos períodos secos, indicando a perda de eficiência da camada oxidativa.

Para esta camada, nota-se uma forte influência sazonal, visto que as médias de emissões para o período chuvoso foram de 3% de CH₄ e 7% de CO₂, e no período seco a média foi de 15 e 39%, de CH₄ e CO₂, respectivamente. Nos estudos realizados por Lopes (2011) nestas mesmas configurações de camada, observou-se que as emissões de metano apresentaram um padrão sazonal e bastante relacionado com as variações climáticas, devido à influência nas condições de saturação do solo e nos processos de oxidação.

A partir desses dados estabeleceu-se uma relação entre o fluxo médio mensal de metano e dióxido de carbono nas diferentes camadas e a emissão total (média mensal) dos mesmos gases, da Célula Experimental, ao longo do tempo. Considerou-se como emissão total, a soma das emissões pelo sistema de drenagem e pela camada de cobertura.

Desta forma, nota-se que para o período chuvoso, não houve incremento nas emissões. Em contraposição, entre o primeiro e segundo período seco, ocorreu uma elevação de 6.61 e 13.66%, nas emissões de CH₄ e CO₂, respectivamente.

Comparativo das Camadas

Estão apresentados na Tabela 2 o resumo dos resultados para as três camadas de cobertura analisadas, em quatro períodos de tempo, sendo dois na época de seca e dois em épocas chuvosas.

Tabela 2. Resumo dos resultados das emissões fugitivas nas três camadas analisadas.

PERÍODO	Emissões por Camada					
	Camada Convencional		Barreira Capilar		Camada Oxidativa	
	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂
1° Seco	19.70	20.87	0.68	0.29	0.73	2.54
2° Seco	29.10	37.80	2.18	18.54	3.22	39.60
1° Chuvoso	13.06	19.10	19.00	19.80	24.97	38.60
2° Chuvoso	28.20	27.35	7.41	8.93	7.35	16.20

Fonte: Oliveira (2013).

Dos resultados da Tabela 2, foi possível verificar que nos períodos secos as emissões foram menores para a Barreira Capilar, seguida da Camada Oxidativa e por último a Camada Convencional. Para os períodos chuvosos, no 1° período chuvoso a Camada Convencional foi que apresentou menores emissões fugitivas, seguida da Barreira Capilar e Camada Oxidativa. Já no 2° período chuvoso a Barreira capilar apresentou os menores percentuais de emissões, seguida da Camada oxidativa e da Camada Convencional.

De forma geral a Barreira Capilar apresentou os menores percentuais de emissões de GEE, já a Camada Convencional apresentou os maiores índices de emissão de CO₂ e CH₄. Além disso, todos os percentuais de emissões foram inferiores aos citados anteriormente por: Barlaz et al. (2004, apud Teixeira et al., 2009), Spokas et al. (2006) e Lombardi et al. (2006).

Conclusão

Todas as camadas estudadas, tanto a convencional quanto as alternativas, tiveram as emissões fugitivas em termos de fluxo de metano e dióxido de carbono reduzido ao longo dos três anos analisados.

No comparativo da eficiência entres as camadas, para o período chuvoso a que se mostrou mais eficiente foi a Camada Capilar (com emissões de 2% de CH₄ e 4% de CO₂), seguida pela Camada Oxidativa (com emissões de 3% de CH₄ e 7% de CO₂) e a Convencional (com emissões de 18% de CH₄ e 22% de CO₂). No período seco o ranking de eficiência se manteve com a Camada Capilar (com emissões de 9% de CH₄ e 25% de CO₂), Camada Oxidativa (com emissões de 15% de CH₄ e 39% de CO₂) e Camada Convencional (com emissões de 32% de CH₄ e 45% de CO₂).

As variações das porcentagens de emissões fugitivas com relação as emissões pelo sistema de drenagem, ao longo do tempo, sofreram uma influência dos períodos secos ou chuvosos, onde há maior facilidade ou dificuldade de o biogás escapar pela camada de cobertura.

Com tal panorama, é possível afirmar que a melhora na eficiência das camadas de coberturas para retenção dos GGE torna-se necessária, tendo em vista os percentuais de gases que ainda escapam pelas mesmas.

Referências Bibliográficas

- Alves, V. (1998) *Relatórios de referência: Emissões de gases de efeito estufa no tratamento e disposição de resíduos*. Segundo Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa, Ministério da Ciência e Tecnologia.
- Barlaz, M.A., Green, R., Chanton, J.P., Goldsmith, C.D., Hater, G.R. (2004) Evaluation of a biologically active cover for mitigation of landfill gas emissions. *Environmental Science and Technology*, **38**(18), 4891-4899.
- Brasil, Lei 12.305 de 2 de agosto de (2010). *Política Nacional de Resíduos Sólidos*. Acesso em 04 de fevereiro de 2016, disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm
- Cossu, C., Doyotte, A., Jacquin, M.C., Babut, M., Exinger, A., Vasseur, P. (1997) Glutathione reductase, seleniumdependent glutathione peroxidase, glutathione levels, and lipid peroxidation in freshwater bivalves, *Unio tumidus*, as biomarkers of aquatic contamination in field studies. *Ecotoxicol Environ Safety* **38**(2), 122-131.
- Environment Agency. (2004) *Guidance on monitoring landfill gas surface emissions*. Landfill Directive vol.07, Bristol, UK.
- Fischer, C., Maurice, C., Lagerkvist, A. (1999) *Gas emission from landfills: an overview of issues and research needs: survey*. AFN, Naturvårdsverket.
- Lopes, R. L. (2011) *Infiltração de água e emissão de metano em camadas de cobertura de Aterros de Resíduos Sólidos*. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco, 268 pp.
- Lombardi, L., Carnevale, E., Corti, A. (2006) Greenhouse effect reduction and energy recovery from waste landfill. *Energy*, **31**(15), 3208-3219.
- Maciel, F. J. (2003) *Estudo da geração, percolação e emissão de gases no aterro de resíduos sólidos da Muribeca/PE*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, 173 pp.
- Maciel, F. J. (2009) *Geração de Biogás e Energia em Aterro Experimental de Resíduos Sólidos Urbanos*. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Pernambuco, 333 pp.
- Mariano, M. O. H. (2008) *Avaliação da retenção de gases em camadas de cobertura de aterro de resíduos sólido*. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco, 243 pp.
- Mariano, M. O. H., Jucá, J. F. T. (2010) Ensaio de campo para a determinação de emissões de biogás em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, **15**(3), 223-228.
- Oliveira, L. R. G. D. (2013). *Estudo das emissões de biogás em camadas de coberturas de aterro de resíduos sólidos urbanos*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, 106 pp.
- Paz, D. H. F., Firmo, A.L.B., Rodrigues, T. S. N., Juca, J. F. T., Barbosa, I. M. B. R., Lins, E. A. M. (2015) Inventory of methane emissions from municipal solid waste management in Pernambuco state, Brazil. *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, **20**, 6009-6023.
- Peer, R. L., Thorneloe, A. S., Epperson, L. D. (1993) *A comparison of methods for estimating global methane emissions from landfills*. *Chemosphere*, **26** (1-4), 387-400.
- Spokas, K., Bogner, J., Chanton, J. P., Morcet, M., Aran, C., Graff, C., Hebe, I. (2006) Methane mass balance at three landfill sites: What is the efficiency of capture by gas collection systems? *Waste management*, **26**(5), 516-525.
- Teixeira, C. E., Torves, J. C., Finotti, A. R., Fedrizzi, F., Marinho, F. A. M., & Teixeira, P. F. (2009) Estudos sobre a oxidação aeróbia do metano na cobertura de três aterros sanitários no Brasil. *Eng. Sanit. Ambient*, **14**(1), 99-108.