

**ÁREA TEMÁTICA:** Ferramentas da Gestão Ambiental

## **MONITORAMENTO DA EMISSÃO DE GASES DO EFEITO ESTUFA ATRAVÉS DA CAMADA DE COBERTURA FINAL UTILIZANDO A METODOLOGIA DA PLACA DE FLUXO ESTÁTICA: ESTUDO DE CASO DO ANTIGO ATERRO CONTROLADO DO JÓQUEI CLUBE DE BRASÍLIA/DF**

*Thainah Pereira de Freitas, Moisés Antônio Costa Lemos, Luciano Soares da Cunha e André Luís Brasil Cavalcante.*

*Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília – DF*

### **RESUMO**

Este trabalho apresenta uma aplicação da placa de fluxo estática utilizada para determinar as emissões de metano (CH<sub>4</sub>) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) na camada de cobertura do antigo lixão de Brasília/DF. Os resultados obtidos nesses estudos indicaram que o fluxo de CH<sub>4</sub> pode atingir valores de até 250 kg/m<sup>2</sup> ano e o de CO<sub>2</sub> até 570,84 kg/m<sup>2</sup> ano. Por meio das medidas foi verificado que uma das fissuras analisadas pode ter grandes dimensões e está comprometendo o funcionamento da camada de cobertura, favorecendo grandes emissões de gases do efeito estufa na região do aterro.

**Palavras-chave:** Aterro Controlado; Fluxo de gases; Placa de Fluxo Estática.

## **MONITORING OF GREENHOUSE GAS EMISSION THROUGH THE FINAL COVER LAYER USING THE CLOSED FLUX CHAMBER METHODOLOGY: CASE STUDY OF THE JOKEY CLUB CONTROLLED LANDFILL OF BRASÍLIA / DF**

### **ABSTRACT**

This research presents an application of the closed flux chamber used to determine the emissions of methane (CH<sub>4</sub>) and carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) in the cover layer of the old dump in Brasília / DF. The results obtained in these studies indicated that the flow of CH<sub>4</sub> reaches values up to 250 kg /m<sup>2</sup> year and CO<sub>2</sub> up to 570.84 kg /m<sup>2</sup> year. Through the measures, it was verified that one of the analyzed cracks may have large dimensions, which may be compromising the functioning of the cover layer and favoring large emissions of greenhouse gases in the landfill region.

**Keywords:** Landfill; Gases Flux, Closed Flux Chamber.

### **1. INTRODUÇÃO**

Os resíduos sólidos constituem um grupo de grande relevância nas discussões ambientais, tanto pelas quantidades produzidas quanto pelo desenvolvimento de logísticas para gerenciá-los. Desde o momento em que o resíduo é gerado, seu caminho até à sua destinação final e ainda a tarefa de lidar com os impactos gerados pela sua disposição.

A disposição final dos resíduos são aterros de resíduos sólidos urbanos (ARSU), estes devem ser projetados de forma a equacionar problemas ambientais gerados, como a contaminação de corpos hídricos, do solo e da atmosfera por seus líquidos e gases formados. Os aterros são classificados como uma das principais fontes antropogênicas de emissão de gases de efeito estufa (GEE). Esses contribuem significativamente para o agravamento do aquecimento do planeta, em escala global, além dos impactos locais relacionados à emissão descontrolada do biogás. Os impactos podem

variar de maus odores à possíveis doenças cancerígenas na população próxima ao aterro (IPCC, 2001; LOPES et al., 2009).

O biogás, tanto incinerado ou emitido para atmosfera, em aterros sanitários é oriundo de processos de decomposição anaeróbica da matéria orgânica do RSU. O teor de metano ( $\text{CH}_4$ ) encontrado no biogás varia de 50% a 70% do volume desse e 25% a 50% de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Além disso, o biogás bruto contém pequenas quantidades de água ( $\text{H}_2\text{O}$ ), oxigênio ( $\text{O}_2$ ), sulfeto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ ), amônia ( $\text{NH}_3$ ) e outros (WILKEN et al., 2017). Por sua vez, o  $\text{CH}_4$  possui um tempo de vida na atmosfera de cerca de 10 anos e um potencial de retenção de calor 23 vezes maior que o  $\text{CO}_2$ , por isso, são necessárias medidas de mitigação deste gás em fontes individuais (IPCC, 2001). Nos ARSU, as principais opções utilizadas são a implementação de um sistema de cobertura final sobre a massa de rejeito e a de um sistema de recuperação do biogás (SPOKAS et al., 2006). Dessa maneira, os valores de emissão fugitiva são influenciados por fatores relacionados às características físicas e geotécnicas da composição do solo de cobertura, além de fatores como as características internas dos resíduos e aspectos climáticos (MARIANO e JUCA, 2010). Relativo a camada de cobertura, a baixa condutividade hidráulica do sistema ocasiona que, durante precipitações, uma pequena parcela da água infiltre no solo e o restante escoar na superfície. Dessa forma, a camada de cobertura pode ser problemática em locais de clima semiárido, árido, ou em locais com longos períodos de seca. Assim, são comuns nesse sistema problemas com fissuras devido a amplitude de variação de chuvas e secas (FOURIE e MOONSAMMY, 2002). Essas fissuras podem vir a aumentar a permeabilidade do solo e inviabilizar a camada executada (MELCHIOR, 1997; ALBRECHT e BENSON, 2001).

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 e JUCA, 2010). Além disso, as taxas de emissões fugitivas de metano reportadas na literatura variam de -0,29 até 14.794  $\text{g/m}^2\cdot\text{dia}$  e podem representar até 22% do total das emissões de gases do aterro. A dependência deste fluxo está diretamente relacionada a um conjunto de fatores como a composição gravimétrica específica dos RSU, dados climáticos precisos do local e a composição do solo de cobertura (MACIEL, 2009).

Dessa forma, essa pesquisa apresenta uma metodologia de ensaios de campo para a determinação do fluxo dos gases  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$  em fissuras formadas na camada de cobertura da área estudada. O local de estudo foi o antigo aterro controlado do Jôquei Clube de Brasília, Distrito Federal, onde hoje se situa a Unidade de Recebimento de Entulhos (URE), e a placa de fluxo estática adotada mostrou ser um procedimento de fácil aplicação e de baixo custo.

## 2. OBJETIVO

O presente estudo tem como objetivo geral monitorar a emissão de gases de efeito estufa através do sistema de cobertura final do antigo Aterro Controlado do Jôquei Clube (ACJC). O cumprimento do objetivo geral será realizado por meio dos seguintes objetivos específicos: i) avaliar o escape dos gases metano ( $\text{CH}_4$ ) e gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ) em fissuras na camada de cobertura final do ACJC de Brasília; ii) quantificar o fluxo de emissão fugitiva pelo método linear. A metodologia utilizada para cumprimento dos objetivos específicos será por meio de ensaios com placa de fluxo estática.

## 3. METODOLOGIA

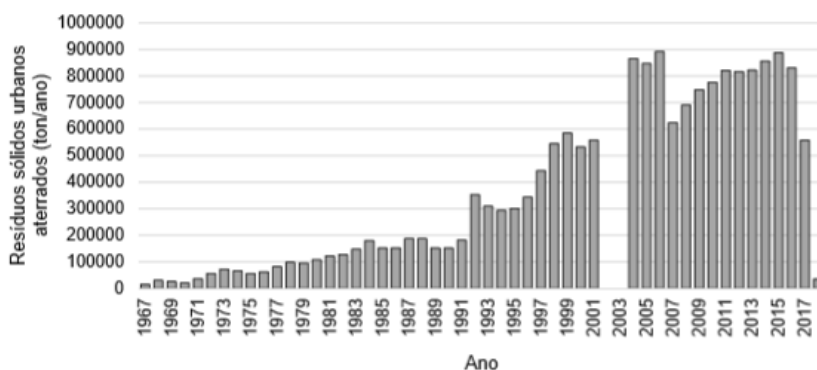
### 3.1 Descrição do local de estudo

A área de estudo é o antigo Aterro Controlado do Jôquei Clube (ACJC) localizado no Distrito Federal (DF), entre Brasília e a região administrativa de Taguatinga, sendo sua principal rodovia de acesso a Via Estrutural. O local onde se encontra o aterro é de vulnerabilidade ambiental e social por ter se iniciado como depósito à céu aberto. O ACJC está inserido em uma região de clima tropical com

concentração de chuvas no verão (em especial nos meses de novembro a janeiro) e a estiagem no inverno (junho a agosto).

O histórico de disposição no perímetro do ACJC, que cobre uma área de aproximadamente 200 ha, se iniciou em meados dos anos 60. O local foi a única unidade de recebimento de todos os resíduos sólidos urbanos do DF até 2016. A sua atividade foi encerrada em 2018 quando inaugurou-se o Aterro Sanitário de Brasília. Por esse histórico junto ao fato de que até 2015 o local era considerado como lixão, quando algumas modificações foram feitas para que pudesse se enquadrar como aterro controlado, entre elas está a instalação de queimadores de gases (SLU, 2016). Nisiyama (2019) compilou as informações sobre a quantidade de resíduos sólidos urbanos aterrados durante o período ativo de recebimento do ACJC (Figura 1).

Figura 1. Avanço da disposição de resíduos sólidos urbanos no ACJC (NISIYAMA, 2019)



Desde o encerramento de suas atividades, o local possui uma Unidade de Recebimento de Entulhos (URE), em que recebe Resíduos de Construção e Demolição (RCD) e são usados como cobertura final do aterro.

Dessa forma, a camada de cobertura final de parte do aterro (cerca de 28 ha) é predominantemente constituída de um agregado de RCD, resto de podas e solo. Já a cobertura da outra porção do aterro é constituída de latossolo vermelho. A área total de cobertura conta com 149 drenos de captação e queima de gás, com o objetivo de incinerar o CH<sub>4</sub> transformando-o em CO<sub>2</sub>.

### 3.2 Medições superficiais

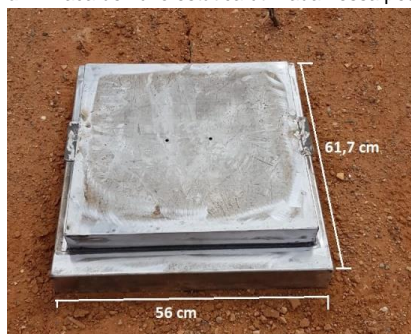
A metodologia usada para a realização das medições superficiais de biogás foi a da placa de fluxo estática, segundo o modelo descrito por Maciel (2003), utilizando o equipamento de leitura de gases GEM 5000 *Gas Analyzer*. Este aparelho foi projetado especificamente para monitorar sistemas de extração de gases em aterros de resíduos sólidos por meio de sensores que analisam a concentração dos gases CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> (em % volume) e CO e H<sub>2</sub>S (em ppm), com uma precisão de ± 0,5% para os gases CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>.

A zona da cobertura escolhida para aferição das medidas foi a área de superfície do compósito solo-RCD, a fim de avaliar a integridade e comportamento desse sistema alternativo de cobertura final.

A placa foi construída mediante a metodologia desenvolvida por Maciel (2003), em aço galvanizado, com dois conectores de saída e em forma de degrau, em que a área útil de passagem do biogás é de 0,345 m<sup>2</sup> e o volume de 0,0345 m<sup>3</sup>, cujas dimensões são mostradas na Figura 2. A forma de degrau seria para ser cravada na cobertura, porém durante os ensaios foi observado que a retirada do solo na cobertura alterava suas propriedades e a emissão original do local. Além de que, em

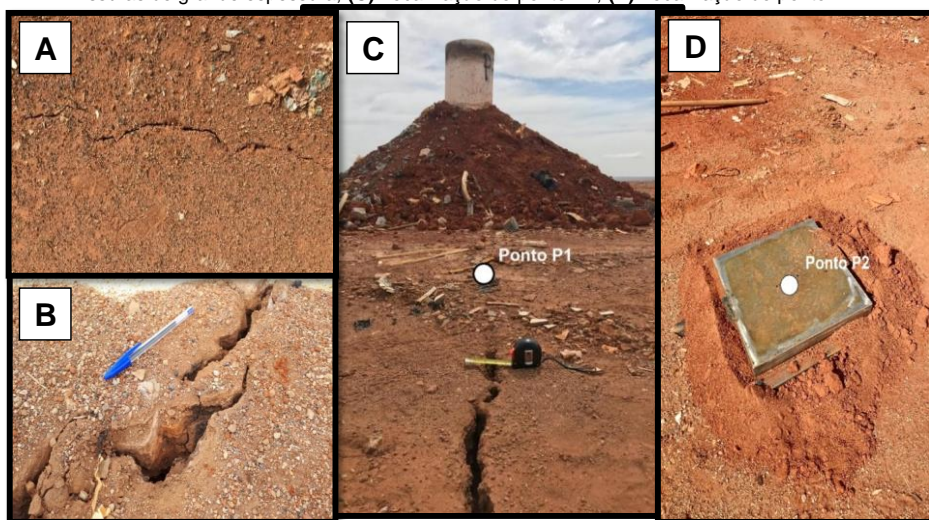
casos de coberturas de gravimetria heterogênea e com característica granular, como é o composto solo-RCD, o nivelamento para cravação não se torna possível.

Figura 2. Placa de fluxo estática utilizada nessa pesquisa



O procedimento em campo inicia-se com a escolha do ponto da superfície em que se deseja monitorar a emissão, com foco em possíveis picos de fluxo, identificando na área a presença de fissuras. Dessa forma, elegeu-se dois pontos para o monitoramento do fluxo. O ponto P1 localizado sobre a fissura de maior espessura, próximo a um queimador (Figura 3.C). O ponto P2 localizado acima de uma rede de micro-fissuras (como a da Figura A) e próximo a P1 (Figura 3.D).

Figura 3. Escolha dos pontos de ensaio. (A) Identificação de micro-fissuras em campo; (B) Identificação de fissuras de grande espessura; (C) Localização do ponto P1; (D) Localização do ponto P2



Para a quantificação das emissões no ponto escolhido realiza-se o ensaio de placa de fluxo, esquematizado na Figura 4 e de acordo com o seguinte procedimento:

- Primeiramente, a placa é colocada no local designado e é demarcado seu perímetro (0,62m x 0,56 m);

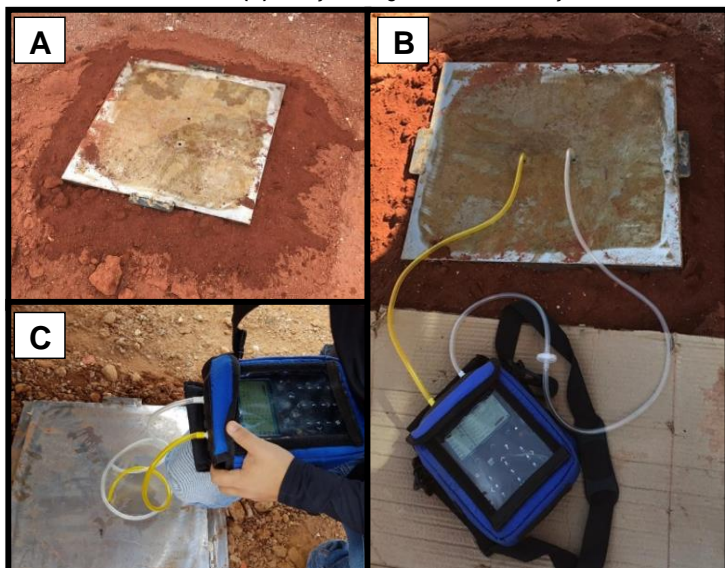
- Retira-se a placa do local e deixar o ar atmosférico preencher o seu interior;
- Escava-se uma pequena vala de 2 cm de profundidade e 5cm de folga para cada lado externo do perímetro demarcado;
- Coloca-se a placa no local novamente e faz-se uma correção de alinhamento de suas laterais com a vala escavada, para que fique com as dimensões externas da placa;
- Crava-se a placa verticalmente no solo e rapidamente faz-se a vedação de suas laterais com latossolo vermelho e água para que não haja fluxo horizontal de gás no interior da placa (Figura 4.A);
- Por último, acopla-se os tubos de sucção e retorno do gás aos conectores de saídas da placa e estes ao aparelho GEM5000 para dar início ao procedimento de leitura;

Cabe ressaltar que é de extrema importância respeitar a sequência das etapas para que não haja acúmulo de gases no interior da placa antes de começar as medições de concentração. Dessa forma, o procedimento de leitura do ensaio é realizado da seguinte maneira e representado na Figura 4.B e 4.C:

- No instante em que o GEM5000 é conectado à placa, realiza-se a primeira leitura correspondente ao  $t = 0$ ;
- Para isso, uma amostra de gás é extraída para o interior da placa pelo tubo transparente, analisada pelo GEM5000 que apresenta a composição da amostra;
- Registra-se os valores de concentração de  $CH_4$  e  $CO_2$ ;
- A amostra retorna à placa pelo tubo amarelo, fechando o ciclo do sistema da placa de fluxo estática;
- Aguarda um período de 5 minutos para a próxima leitura e repete-se o ciclo;
- O ensaio é encerrado quando se observa a estabilidade das concentrações de ambos gases analisados;
- Afere-se a temperatura no interior da placa e retira-se o aparelho.

Sabendo que a temperatura influencia a densidade dos gases, é importante que o ensaio seja realizado sendo protegido da radiação solar.

**Figura 4.** Ensaio de placa de fluxo fechada. **(A)** Instalação da placa na cobertura; **(B)** Procedimento de leitura com GEM5000; **(C)** Aferição e registro de concentrações de  $CH_4$ ,  $CO_2$



### 3.3 Determinação do fluxo

A determinação da emissão de gás pela cobertura se dá por meio da avaliação da concentração do gás aprisionado no interior da placa com o tempo, ou seja, o fluxo se dá pela velocidade com que aumenta a massa de gás no ensaio.

Dessa maneira, é recomendado utilizar as variações das concentrações obtidas em cada ensaio ( $\%/ \Delta t$ ) em termos mássicos ( $\Delta M / \Delta t$ ) multiplicando-as pela densidade do gás analisado corrigido para a temperatura interna obtida. Com isso, a Equação 1 é usada para determinar o fluxo mássico do gás  $i$  (CZEPIEL et al., 1996).

$$J_i = \frac{V_{placa}}{A_{placa}} \frac{\Delta(\rho_i C_i)}{\Delta t}$$

onde o  $J_i$  é dado em  $g/m^2 \cdot min$ ,  $V_{placa}$  é o volume da placa ( $m^3$ ),  $A_{placa}$  é a área útil da placa ( $m^2$ ),  $\rho_i$  é a densidade do gás a uma dada temperatura ( $g \cdot m^{-3}$ ) e  $\Delta(\rho_i C_i) / \Delta t$  é a variação da concentração mássica do gás com o tempo ( $g \cdot m^{-3}$ ).

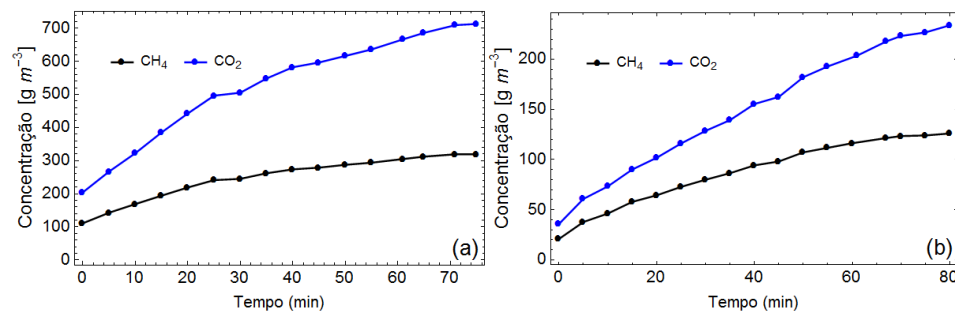
Para obter o fluxo mássico em cada ensaio, são plotados os gráficos dos dados de concentração mássica ( $g \cdot m^{-3}$ ) vs tempo (s), calcula-se o coeficiente angular da curva ou a derivada da equação de concentração e utiliza-se a Eq. 1. A equação de regressão é determinada quando o coeficiente de determinação ter ( $R^2$ )  $\geq 95\%$ .

Durante a realização do ensaio, as concentrações dos gases dentro da placa estabilizam-se ou decrescem, significando a saturação do gás na placa ou o fluxo difusivo do gás de volta ao solo, assim, evita-se esse efeito eliminando os últimos pontos do ensaio. Além disso, é recomendado que o fluxo seja determinado no intervalo inicial do ensaio, quando representa a melhor simulação da emissão de gases fugitivos em aterros, onde a camada de cobertura fica em contato com a atmosfera e consequentemente ocorrem os gradientes máximos de pressão e concentração. Por isso, a metodologia utilizada nesse trabalho foi durante os 30 minutos iniciais de ensaio para uma melhor aplicação do modelo linear.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A quantificação das concentrações e fluxos de emissão dos gases foram realizadas nos pontos P1 e P2 com presença de fissuras. O ponto P1 apresenta uma fissura principal com espessura aproximada de 1,5 cm enquanto que o ponto P2 apresentava pequenas fissuras no solo, mas em número e comprimento significativo. Os resultados obtidos nos ensaios são mostrados na Figura 5.

Figura 5. Ensaio da placa de fluxo estática para os gases  $CH_4$  e  $CO_2$  para (a) ponto P1 e (b) ponto P2



A duração do ensaio no ponto P1 foi de 75 minutos, quando a concentração de  $\text{CH}_4$  se estabilizou em  $319,26 \text{ g m}^{-3}$  (49%) e a de  $\text{CO}_2$  em  $713,13 \text{ g m}^{-3}$  (39,8%). Já o ensaio P2 teve uma duração de 80 min com concentração máxima de  $\text{CH}_4$  correspondente a  $125,98 \text{ g m}^{-3}$  (19,4%) e de  $\text{CO}_2$  a  $233,94 \text{ g m}^{-3}$  (13,1%).

Foram obtidas em medições realizadas pelos autores as concentrações no queimador próximo ao ponto P1, visto na Figura 3.C. Estas medidas foram consideradas como a composição do biogás deste local do ACJC e correspondem a aproximadamente 55% de metano e 44% de gás carbônico. Dessa forma, devido a essas concentrações pode-se concluir que os resíduos aterrados nessa área estão na fase metanogênica de decomposição.

Ainda, comparando-se as concentrações estabilizadas do ponto P1 com as medições das concentrações realizadas no queimador próximo (que pode ser visto na Figura 3.C), nota-se uma proximidade dos resultados. A diferença encontrada é de 6% para o  $\text{CH}_4$  e de 4,2% para o  $\text{CO}_2$ , observando-se que a fissura no local do ponto P1 emite uma grande quantidade de gás para a atmosfera. Ademais, pelo fato das manilhas estarem em contato direto com os resíduos, a proximidade dos valores indica que a fissura medida no P1 é de grande profundidade ou apresenta uma malha de fissuras durante a espessura da camada neste local, que, por estudos prévios dos autores, estima-se ser de 5 a 7 metros.

Seguindo o mesmo raciocínio para o ponto P2, o mesmo não apresenta fissuras tão significativas, sugerindo que tenham profundidades menores e que uma menor quantidade dos gases está sendo emitidas na localidade. Pois, mesmo sabendo que a fissura do ponto P1 era maior, não se podia afirmar quanto a profundidade de tais fissuras e sobre a contribuição na emissão para a atmosfera. Utilizando uma regressão linear foram obtidas as equações de ajuste aos dados de campo. Os ajustes para o P1 encontram-se na Figura 6 para os gases  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$ . Além disso, na Figura 7 encontra-se os resíduos entre o modelo linear e os dados de campo mostrando a boa aplicação do método. Além dos resíduos pode-se ver uma aplicação coerente do método utilizando os 30min iniciais do ensaio pelos  $R^2$  obtidos para ambos os gases.

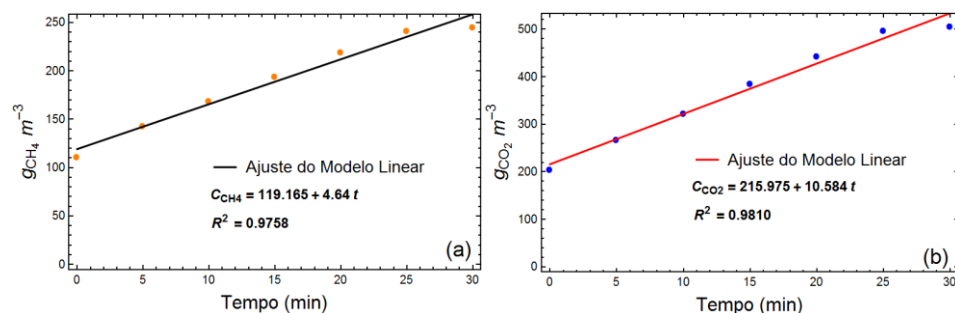
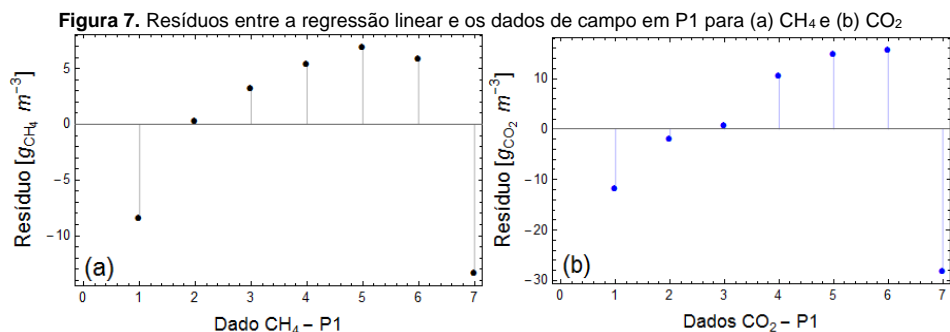
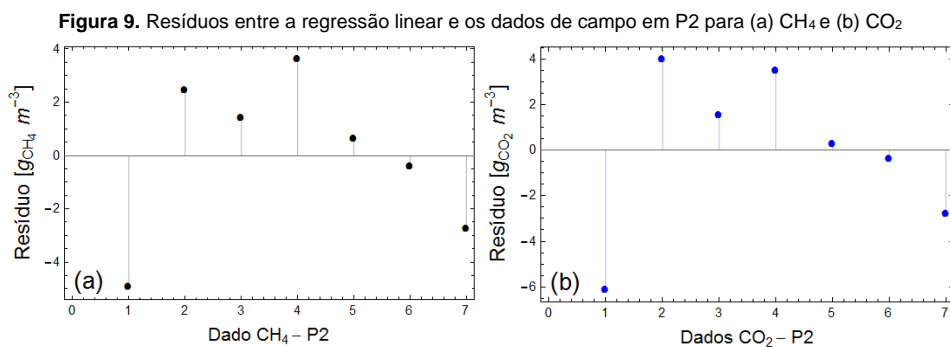
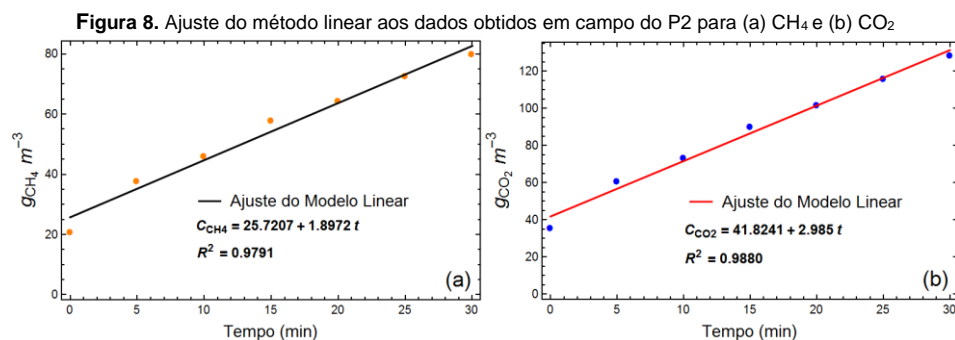


Figura 6. Ajuste do método linear aos dados obtidos em campo do P1 para (a)  $\text{CH}_4$  e (b)  $\text{CO}_2$



As Figuras 8 e 9 representam a regressão linear e os resíduos para os gases CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> do P2. Novamente vê-se uma boa aplicação do método linear nos primeiros 30min de ensaio por meio do R<sup>2</sup> e dos baixos valores dos resíduos obtidos.



Na Tabela 1 vê-se os valores de fluxo de massa dos gases CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> obtidos aplicando-se a Eq. 1 para P1 e P2. Os valores da taxa de variação ( $\Delta(\rho_i C_i) / \Delta t$ ) da Eq. 1 foram obtidos por meio da derivação das equações das regressões lineares dos gases para P1 e P2 que constam nas Figuras 6 e 8.

**Tabela 1.** Fluxos de emissão nos pontos P1 e P2

Ponto	Fluxo de CH <sub>4</sub>			Fluxo de CO <sub>2</sub>		
	mg/m <sup>2</sup> .min	g/m <sup>2</sup> .dia	kg/m <sup>2</sup> .ano	mg/m <sup>2</sup> .min	g/m <sup>2</sup> .dia	kg/m <sup>2</sup> .ano
P1	476,11	685,6	250,25	1086,03	1.563,94	570,84
P2	194,67	280,33	102,32	306,29	441,05	160,98

Confirmando as hipóteses levantadas anteriormente, as taxas de emissão dos principais gases do biogás no ponto P1 são maiores que no ponto P2, sendo 2.4 vezes maior para o metano e 3.5 vezes para o gás carbônico.

Em geral, os fluxos de CO<sub>2</sub> são maiores que o de CH<sub>4</sub> devido as densidades desses gases. As temperaturas nos pontos P1 e P2 foram respectivamente, 27 °C e 28 °C e as densidades corrigidas para cada temperatura são mostrada na Tabela 2.

**Tabela 2.** Densidades corrigidas para a temperatura interna da placa em cada ensaio

Ponto	Densidades (kg/m <sup>3</sup> )	
	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>
P1 (27°C)	1,7917	0,6516
P2 (28°C)	1,7858	0,6494

As taxas de emissões de CH<sub>4</sub> se enquadram dentro da faixa encontrada na literatura e são classificadas como alto fluxo, concordando que as fissuras comprometem a qualidade ambiental local lançando 250,25 e 102,32 kg/m<sup>2</sup> de CH<sub>4</sub> por ano nos pontos P1 e P2, respectivamente.

No caso do ensaio no ponto P1, suas coordenadas sobrepostas ao históricos espacial de disposição dos resíduos do aterro mostra que o ponto medido se encontra na área do Aterro Intermediária mais ao norte, onde foi consolidada como a área principal de disposição dos resíduos sólidos durante quase todo período de funcionamento do aterro (NISIYAMA, 2019). Além disso, pontua-se que a medição no ponto P1 foi acima de uma fissura de aproximadamente 1,5cm de espessura e ao lado de um queimador. Sugerindo-se, assim, que haja um alto gradiente de concentração dos gases, causado pela manilha que liga a massa de resíduo e a atmosfera, potencializando a difusão do composto gasoso e surgindo um fluxo preferencial de gás para esta região. Em paralelo a isso, há um aumento da pressão de gases no contato solo-resíduo, fazendo com que o uso do RCD como cobertura final nessas regiões de alta pressão perto dos drenos podem comprometer a eficiência do sistema de cobertura.

## 5. CONCLUSÃO

O presente estudo desenvolvido no ACJC reafirma a importância de monitorar a emissão fugitiva de gases de efeito estufa em aterro de resíduos sólidos devido à contribuição difusa na emissão global do aterro, sobretudo quando o material que compõe o sistema de cobertura final apresenta adversidades como a ocorrência de fissuras. As medições de CH<sub>4</sub> nos pontos de estudo (P1 e P2) mostram emissões expressivas podendo chegar a 685,6 g/m<sup>2</sup>.dia e devido à proximidade da região administrativa da Estrutural o dano à população e ao meio ambiente é significativo.

Quanto à metodologia utilizada, o uso da placa de fluxo estática se mostrou um método simples de ser aplicado, além de barato e sem exigência de mão-de-obra especializada. Podendo então, ser utilizado em aterros de resíduos sólidos do Brasil como forma de monitorar a emissão de gases através da cobertura final.

Ademais, como formas de mitigar a emissão fugitiva à atmosfera, medidas como a utilização de Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL), do protocolo de Kyoto, poderiam ser aplicadas.

Tanto através do reaproveitamento do biogás gerado na própria unidade do aterro, devido ao potencial energético em especial do metano, quanto por meio da comercialização de créditos de carbono através de certificados de emissão reduzida (CERs). São propostas eficazes para a melhoria da qualidade ambiental, manutenção do aterro e contribuição para projetos com sistemas híbridos de produção de energia.

#### ▪ AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio prestado pelas seguintes instituições: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq Projetos 304721/2017-4, 151778/2018-3 e 140923/2020-9), Pesquisa de Suporte da Fundação Distrito Federal (FAP-DF Projetos 0193.001563/2017 e 0193.002014/2017-68), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), CEB Geração SA (Projeto RAEESA - Ação de Remediação para Energia, Meio Ambiente e Sustentabilidade em Aterros Sanitários) e Universidade de Brasília (UnB) por financiar esta pesquisa.

#### ▪ REFERÊNCIAS

ALBRECHT, B. B. A.; BENSON, H. Effect of Desiccation on Compacted Natural Clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(1), 67–75, 2001.

CZEPIEL, P. M. et al. Quantifying the effect of oxidation on landfill methane emissions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 101, p. 16721–16729, 1996.

FOURIE, A. B.; MOONSAMMY, M. Store and release covers for landfills in semi-arid climates. *Unsaturated Soils*, p. 823–826, 2012.

IPCC. *Climate Change 2001: The Scientific Basis, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, Cambridge University Press, UK: 944p., 2001.

LOPES, R. L. et al. Avaliação das emissões de metano em aterro de resíduos sólidos experimental de pequeno porte na Muribeca/PE. III Congresso Interamericano de Resíduos Sólidos de AIDIS. AIDIS, Argentina, Buenos Aires, 2009.

MACIEL, F. J. Estudo da geração, percolação e emissão de gases no aterro de resíduos sólidos da Muribeca/PE. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 159 p., 2003.

MACIEL, F. J. Geração de biogás e energia em aterro experimental de resíduos sólidos urbanos. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 333 p., 2009.

MARIANO, M. O. H.; JUCÁ, J. F. T. Ensaios de campo para determinação de emissões de biogás em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 15, n. 3, p. 223–228, 2010.

MELCHIOR, S. In situ studies of the performance of landfill caps (compacted soil liners, geomembranes, geosynthetic clay liners, capillary barriers). *Land Contamination and Reclamation*, 5(3), p.209–216, 1997.

NISYAMA, F.L. Ferramenta computacional para avaliação de risco à saúde humana em áreas contaminadas - Caso de Estudo: Aterro Controlado do Jôquei Clube. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Brasília. Brasília, 201p. 2019.

**Comentado [1]:** Revisar formatação da referência. Tem umas que não tem o ano no final da referência. É assim mesmo? Coloquei uma em amarelo para exemplificar

SERVIÇO DE LIMPEZA URBANA DO DISTRITO FEDERAL – SLU. Relatório sobre a situação de emergência no âmbito da limpeza urbana jóquei (23.05 a 29.11.15). Relatório Técnico, Brasília, DF, 2016, 138 p.

SPOKAS, K. et al. Methane mass balance at three landfill sites: What is the efficiency of capture by gas collection systems?. Waste Management, v. 26, p. 516-525, 2006.

WILKEN, D., STRIPPEL, F., HOFMANN, F., MACIEJCZYK, M., KLINKMÜLLER, L., WAGNER, L., ... FINDEISEN, C. Biogas to Biomethane: flexible energy supply from biomass. (F. B. e. V. Authors, Ed.). Freising - Germany: Fachverband Biogas e. V, 68p, 2017.