

ÁREA TEMÁTICA: 1 – Gestão Ambiental

IDENTIFICAÇÃO DE EMISSÕES FUGITIVAS EM ATERROS POR MEIO DE TERMOGRAFIA POR INFRAVERMELHO

Rodrigues, Marcela (marcelacrodrigues@gmail.com)

Universidade de Brasília – UNB

RESUMO

O presente trabalho busca contribuir com metodologias existentes de quantificação de emissões fugitivas de áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos. Considerando que a produção do biogás se dá por meio de reação exotérmica, tal processo provoca um aumento de temperatura na superfície por onde o gás flui. O principal objetivo é demonstrar a relação entre anomalias superficiais de temperatura em solos de aterros e a presença de emissões fugitivas de metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂). Campanhas de medições foram feitas no Aterro Controlado do Jockey Clube - Distrito Federal, e experimentos de transferência de calor em meio poroso permitiram uma identificação do fenômeno em laboratório. Imagens termográficas feitas com o uso de infravermelho térmico permitiram a visualização térmica das superfícies estudadas e o medidor portátil de gás GEM-5000 permitiu a identificação das diferentes concentrações dos gases, *in situ*. Os resultados mostram que 80% dos pontos aferidos em campo apresentam convergência entre temperatura e concentração de CH₄ e CO₂, o que comprova importante correlação entre as anomalias térmicas e pontos de escape de gases em aterros. A representação do escoamento do fluxo de ar quente através de descontinuidades no meio poroso na bancada experimental foi captada pela termografia, atribuindo maior acurácia ao processo de aferição. Com esses resultados qualitativos, consegue-se mostrar que a metodologia utilizada é potencialmente uma ferramenta complementar para a identificação de emissões fugitivas em aterros, conseqüentemente, contribuindo com práticas de remediação ambiental e uso energético do biogás.

Palavras-chave: Emissões fugitivas; Biogás; Termografia por Infravermelho.

IDENTIFICATION OF FUGITIVE EMISSIONS IN LANDFILLS THROUGH INFRARED THERMOGRAPHY

ABSTRACT

The present work seeks to contribute with existing methodologies for quantifying fugitive emissions from Solid Waste Disposal Sites (SWDS). Considering that the production of biogas takes place through an exothermic reaction, this process causes an increase in temperature on the surface through which the gas flows. The aim is to demonstrate the relationship between surface temperature anomalies in landfill soils and the presence of fugitive emissions of methane (CH₄) and carbon dioxide (CO₂). Measurement campaigns were carried out at the Jockey Club's Controlled Landfill – Federal District, and an experimental visualization of the porous media flow and heat transfer was carried out in laboratory. Thermographic images obtained by Thermal Infrared (TIR) FLIR allowed the thermal visualization of the studied surfaces and the portable gas meter GEM-5000 allowed the identification of the different concentrations of gases in situ. The results show that 80% of the points measured in the field converged in temperature and CH₄ and CO₂ concentration, which proves a correlation between thermal anomalies and landfill gas escape points. The representation of the hot air flow through discontinuities in the porous medium on the experimental bench was

captured by thermography, attributing greater accuracy to the measurement process. Which these qualitative results, it is possible to show that the methodology used is potentially a complementary tool for the identification of fugitive emissions in SWDS, consequently contributing to environmental remediation practices and the biogas energetic use.

Keywords: Fugitive emissions; Biogas; Infrared Thermography.

1. INTRODUÇÃO

Aterros de resíduos sólidos estão entre as duas maiores fontes de emissões de gases de efeito estufa, entre o período de 1990 a 2030, segundo estimativa do *Summary Report: Global Anthropogenic Non-CO₂ Greenhouse Gas Emissions: 1990 - 2030* (EPA, 2012). Considerando o mesmo período, o CH₄ responde por uma média de 58% das emissões de resíduos (EPA, 2012). O vazamento de gases provenientes de áreas de disposição de resíduos sólidos (SWDS) é uma importante fonte de emissão de gases de efeito estufa, que promove risco de explosão, fazendo com que sua detecção seja extremamente relevante para o controle de qualidade ambiental.

O gás de aterro é produzido no subsolo em condições anaeróbicas através de reações bioquímicas exotérmicas, em temperaturas de até 55°C, devido à degradação de matéria orgânica em um processo de metanogênese (FJELSTED et al., 2019). Sua parte líquida é o chorume ou lixiviado, e a parte gasosa, o biogás ou gás de aterro. Este último, objeto de análise deste trabalho, é composto de 50 a 60% em volume de CH₄, 10 a 50% em volume de CO₂ e 1 a 5% em volume de outros gases (hidrogênio H₂, gás sulfúrico H₂S, oxigênio O₂ e nitrogênio N₂) (COSTA, 2006); (ALVES, 2000). O metano, principal componente do biogás, possui um alto poder calorífico e, diante dessa característica, sua recuperação energética aparece como uma solução alternativa dentro do contexto de mitigação de emissões atmosféricas.

A quantificação do biogás é envolta em complexidade devido, principalmente, à heterogeneidade dos resíduos e irregularidades topográficas de aterros. Um exemplo típico é a ocorrência de fissuras na cobertura do aterro, que é uma indicação da contração de camadas de argila, devido à variação de umidade do solo. Trata-se de situações que ocorrem periodicamente sob a influência de condições climáticas locais ou devido à própria degradação do material orgânico, o que resulta na alteração de estado físico dos resíduos aterrados. Através dessas fissuras, que podem ser observadas através da camada de cobertura, há um aumento significativo nas emissões de gases (OLIVEIRA, 2005). Durante a vida útil da camada de cobertura, a existência de fissuras aumenta significativamente a permeabilidade da superfície, a infiltração da água da chuva e as emissões fugitivas de biogás, culminando em ciclos de emissões maiores em períodos de seca e menores em períodos de chuva (OLIVEIRA, 2005).

Pelo fato de a geração do biogás se dar por uma reação exotérmica, a presença do gás pode ser detectada por anomalias térmicas na superfície de coberturas de aterros. Para esse fim, iniciativas internacionais vêm empregando a visualização por infravermelho térmico (do inglês, *Thermal Infrared - TIR*) como uma técnica para detecção de metano na superfície. A atual revisão da literatura sobre a utilização da termografia por infravermelho para detectar gases de aterros foi resumida na publicação científica de Fjelsted et al. (2019), que organizou estudos que testaram essa ferramenta de triagem para *hotspots* de emissão de gás de aterro (*Landfill Gas – LFG*) com resultados variados. Alguns estudos relataram relação limitada entre emissões de LFG e temperaturas da superfície ((BATTAGLINI et al., 2013), (DESIDERI et al., 2007), (Lewis et al., 2003). Aponta-se que a maior limitação estaria no fato de que os resultados podem ser influenciados por fatores externos, como a incidência de luz solar, vento e temperatura ambiente (FJELSTED et al., 2019).

Neste contexto, o presente estudo tem como objetivo verificar a relação entre os indicadores termográficos de superfície e a presença de emissões fugitivas de CH₄ e CO₂. Direcionando esforços para complementar os métodos e técnicas de triagem desses gases, este trabalho utiliza como estudo de caso o Aterro Controlado do Jockey Club (ACJ), localizado no Distrito Federal. Os estudos de campo são complementados pela reprodução em laboratório de um experimento em meio poroso com troca de calor, onde campos de anomalia de temperatura são identificados.

1.1 Aterro Controlado do Jockey Club (ACJ)

Conhecido como maior área de depósito de resíduos da América Latina, o aterro sanitário encerrou suas atividades em 2018 e continua recebendo resíduos de poda e construção civil. O ACJ já foi um dos maiores lixões da América Latina, com 175 hectares. A deposição de resíduos no local foi realizada diretamente e depois compactado com outra camada de solo revolvido. O solo não recebeu nenhum sistema de impermeabilização ou drenagem, e não atendeu a nenhum requisito de proteção ambiental. Com isso, a produção de lixiviado penetrou livremente no solo e a produção de biogás não foi medida ou coletada (CAVALCANTI, 2013).

Em 2015, o ACJ foi transformado em um Aterro Controlado, quando foram aplicadas medidas para a proteção do solo. A coleta do gás de aterro, realizada por queimadores construídos ao longo do terreno, transforma, através da combustão, metano em dióxido de carbono, emitindo gás menos poluente e não explosivo.

O aterro está localizado entre as regiões administrativas do Plano Piloto e Taguatinga e faz fronteira com o córrego Cabeceira do Valo (afluente do lago Paranoá) e Parque Nacional de Brasília. Nas proximidades, há uma área de chácaras e fazendas com produção de vegetais e criação de pequenos animais. A Figura 1 mostra a delimitação geográfica da área do ACJ.

Figura 1: Área do ACJ. Fonte: *Google Earth*, 2020.



Adicionadas às coletas de dados térmicos e de concentração de gases em na encosta de um talude específico do ACJ, uma bancada experimental auxilia a detecção de anomalias térmicas, ao simular a transferência de calor em meio poroso, via injeção de fluxo de ar quente, em laboratório.

A contribuição deste estudo é a validação de uma metodologia complementar de detecção de vazamento de gases, que pode apontar importantes indicadores ambientais, contextualizando possíveis formas de remediação ambiental e recuperação energética de áreas degradadas.

2. OBJETIVO

O principal objetivo deste artigo é verificar a relação existente entre os indicadores termográficos de superfície e a presença de emissões fugitivas em áreas de disposição de resíduos sólidos.

3. METODOLOGIA

Para analisar a correlação entre pontos aquecidos na superfície através do infravermelho termal e alta concentração de gases, a etapa *in situ*, realizada no ACJ, aferiu concentrações específicas dos gases CH₄ e CO₂ e coletou-se imagens termográficas dos respectivos pontos, para fins de comparação.

A etapa experimental reproduziu, em laboratório, uma coluna de meio poroso com fluxo ascendente de calor. O objetivo é simular descontinuidades no terreno do aterro em que ocorrem emissões fugitivas, verificar como o aquecimento do solo se dá nessas áreas e como o infravermelho capta essas anomalias térmicas.

3.1 Anomalias térmicas e emissões fugitivas *in situ*

Uma área com ocorrência frequente de fissuras no ACJ foi estabelecida para coleta de dados e dividida em dez pontos para fins de comparação, em junho de 2019. Em cada ponto foram coletados dados de temperatura e concentração de gás. Para evitar interferências externas nos resultados, como o aumento da temperatura do solo por incidência solar, a coleta de dados foi realizada entre 5h e 7h. Foram realizadas três campanhas de coleta de dados em 10 pontos de uma região de encosta que continham rachaduras, mostrada na Figura 2.

Figura 2: Área delimitada para coleta de dados.



A termografia por infravermelho é uma técnica não invasiva que mede a distribuição de temperatura de uma superfície através do processamento da radiação infravermelha de ondas médias a longas, emitidas pela superfície. A câmera termográfica FLIR A325sc é projetada para fornecer informações térmicas precisas por imagens em uma faixa espectral de 7,5-13,0 μm e temperaturas de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $120\text{ }^{\circ}\text{C}$. Lewis et al. (2003) indica um erro de medição da termografia infravermelha de $2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

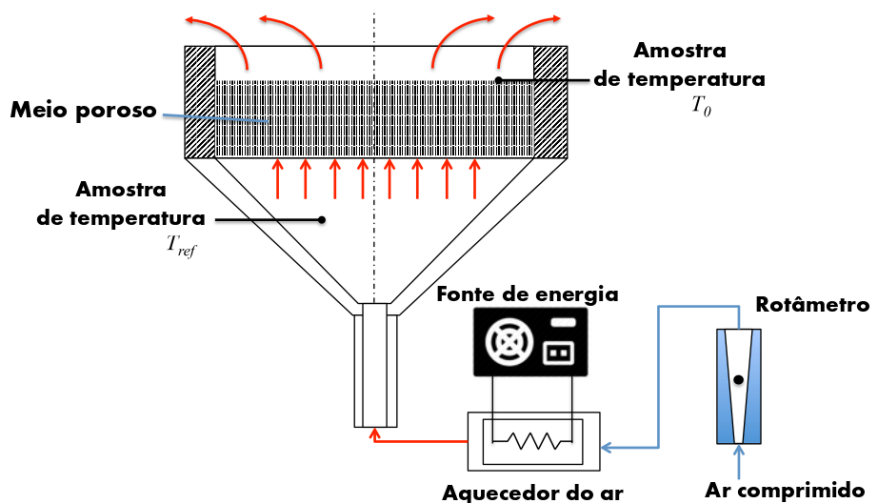
As concentrações de CH_4 e CO_2 foram aferidas com o monitor de gases portátil GEM-5000. Seu princípio de funcionamento se dá através de uma célula infravermelha de comprimento de onda duplo com canal de referência, que mostra os resultados em porcentagem (0-100%). A identificação do O_2 é feita com uma célula eletroquímica interna (0-25%). O sensor não pode medir amostras contendo mais de 25% de O_2 do volume total de gás, devido a limitações técnicas do sensor.

3.2 Simulação de transferência de calor em meio poroso em bancada experimental

A bancada experimental promove injeção de ar quente em meio poroso e, assim, permite a análise do comportamento do fluxo de calor no solo. A bancada é cilíndrica, com diâmetro $D=0,3\text{m}$, com uma camada de meio poroso com espessura $H=0,10\text{m}$, composto por esferas de polímero de alta densidade, e foi ajustada em uma câmara de fluxo controlada, conforme ilustrado na Figura 3.

O fluxo de ar ascendente é aquecido por um aquecedor elétrico controlado, mantendo a temperatura do ar na faixa de 30°C a 45°C . Enquanto um sensor de temperatura DS18B20 capturou a temperatura inicial, simulando o local de geração do biogás, dois termopares tipo K foram inseridos para mensurar o fluxo de calor por entre o meio poroso e tornar a análise de campo mais acurada. A cada segundo, a temperatura foi medida e uma curva da temperatura em relação ao tempo obtida. Imagens termográficas também foram utilizadas em laboratório.

Figura 3: Bancada de transferência de calor em meio poroso.



4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As imagens termográficas feitas no ACJ apontaram que, em toda a superfície contínua - sem a presença de fissuras, rachaduras ou buracos - foi observada uma temperatura regular do solo, que chega à máxima de 20°C, aproximadamente. Na região onde encontram-se diferentes configurações de fissuras, observa-se variação da temperatura de 40 a 55°C. A Figura 4(a) e (b) e 5(a) e (b) representam as imagens fotográficas com identificação dos pontos de medição e as respectivas imagens termográficas.

Em oito pontos, de 1 a 5, 7, 8 e 10, houve convergência de temperatura e concentração de gás. Nos pontos 2, 3 e 4, a convergência aconteceu entre baixa temperatura e baixa concentração. Em dois pontos, 6 e 9, houve divergência entre as medidas de concentração e temperatura. No ponto 6, a concentração de metano é de 3% e a temperatura medida na superfície foi alta, de 35°C. Da mesma forma, no ponto 9, a concentração de CH₄ foi medida em torno de 8%, enquanto uma temperatura de 50°C foi indicada por termografia da superfície.

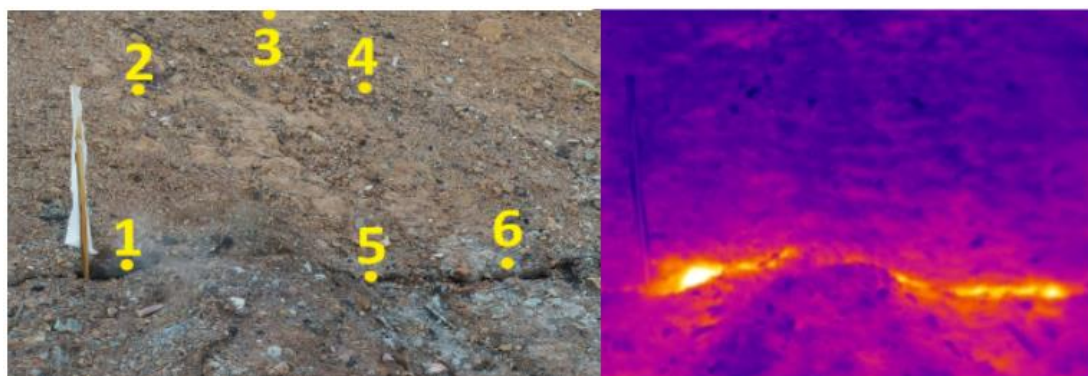
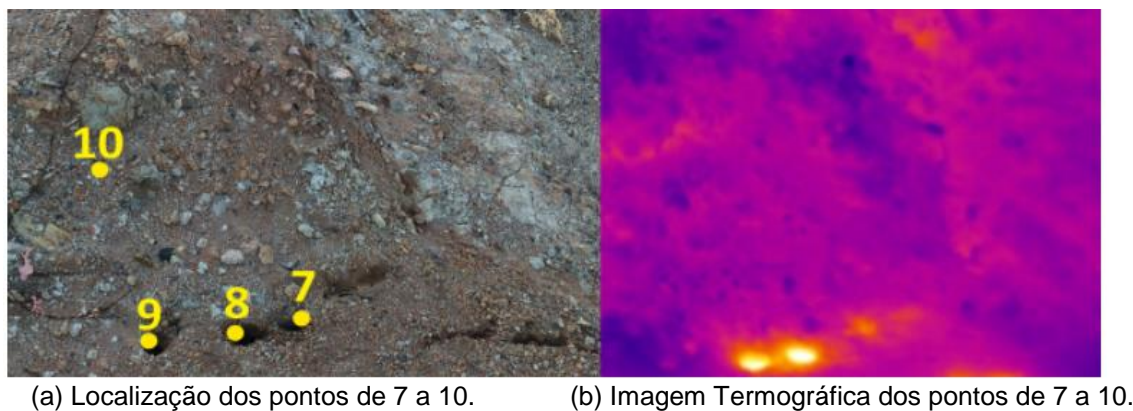


Figura 4: Talude lateral em imagem fotográfica e termográfica

(a) Localização dos pontos de 1 a 7.

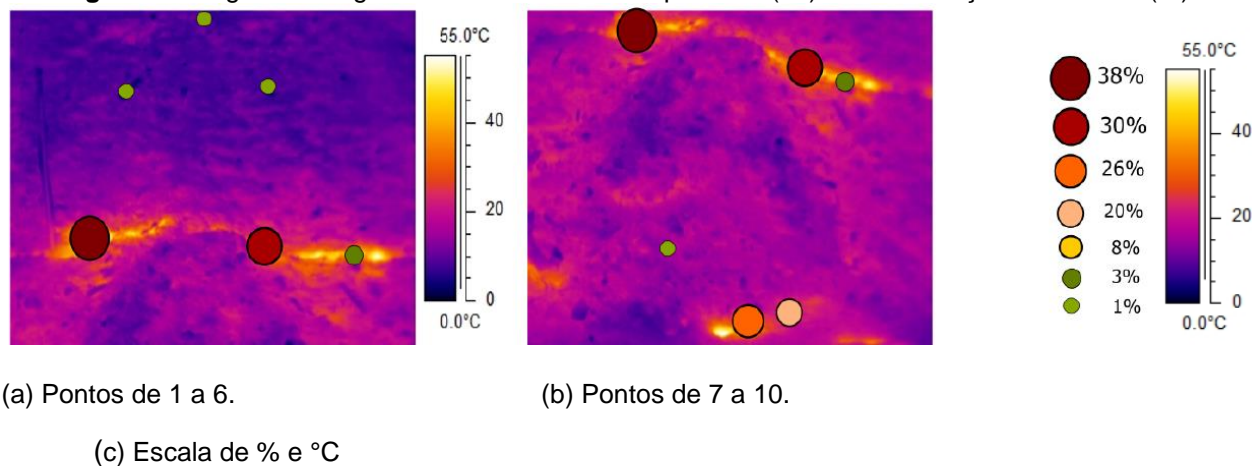
(b) Imagem Termográfica dos pontos de 1 a 7.

Figura 5: Talude lateral em imagem fotográfica e termográfica



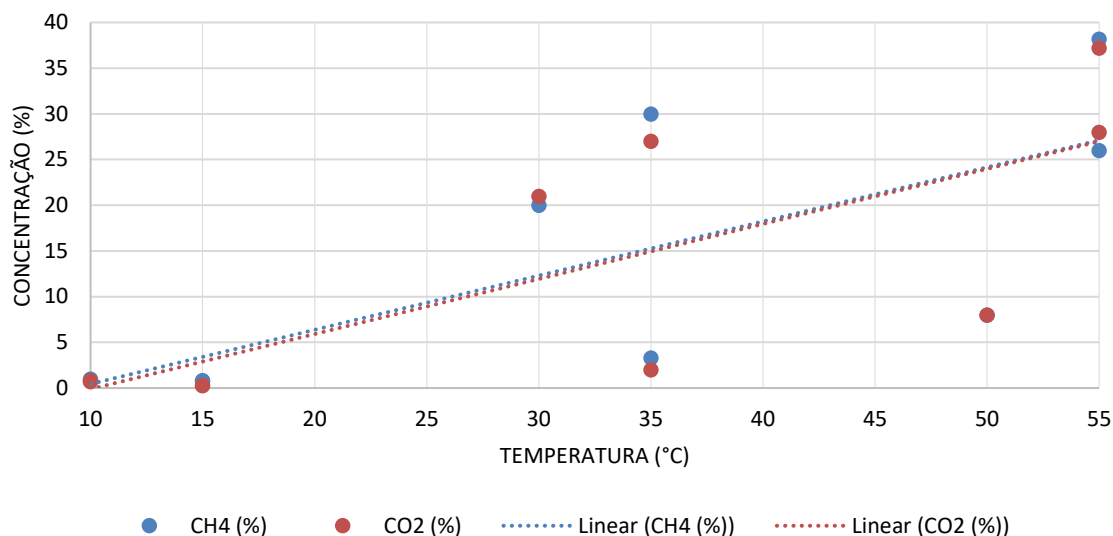
A sobreposição de níveis de concentração de metano na imagem termográfica é mostrada na Figura 5, onde a convergência entre escalas de temperatura e concentrações pode ser observada nos oito pontos supracitados. É importante notar que uma correlação similar pode ser verificada em Fjelsted et al. (2019), embora a escala de temperaturas seja diferente, por se tratar de um aterro da Dinamarca.

Figura 6: Imagem termográfica com escala de temperatura (°C) e concentração de metano (%).



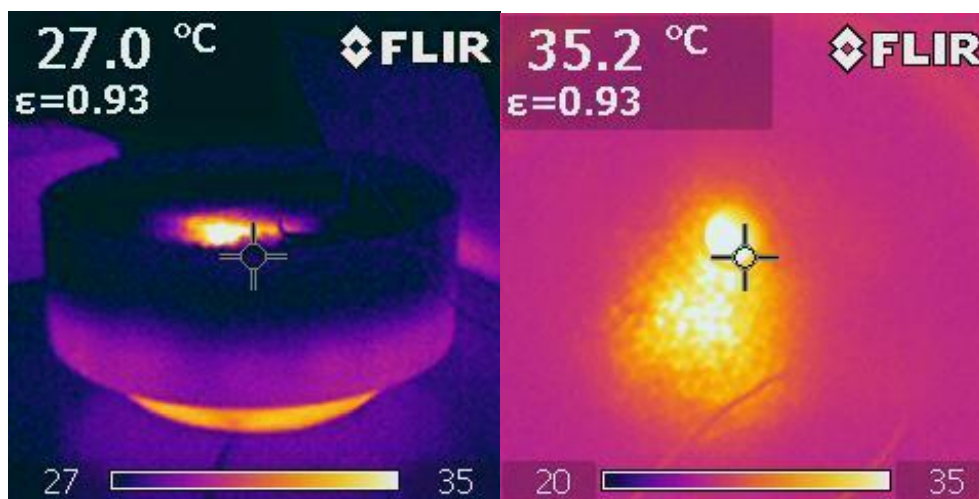
O gráfico da Figura 7 mostra as linhas de tendência entre a concentração de CH_4 e CO_2 em relação à variação de temperatura, que foi apresentada na escala de 10 a 55°C. As concentrações de CH_4 variaram entre 1 e 38% e de CO_2 entre 0,3 e 37%. As linhas de tendência reforçam a coerência observada entre as concentrações dos dois gases e as variações na temperatura da superfície, o que é entendido como indicador de viabilidade na aplicação da metodologia utilizada.

Figura 7: Gráfico de comparação entre concentração (%) de CH_4 e CO_2 versus Temperatura (°C) no ACJ.



Em laboratório, o tempo para que as temperaturas iniciais e superficiais levaram para entrar em equilíbrio é superior a 60 minutos. Foi inserida artificialmente uma fissura no meio poroso o que fez com que, por diferença de densidade do meio, o ar quente injetado percorresse a área da fissura, o que ocasionou um aumento de temperatura no entorno dessa região. O infravermelho captou com clareza o fluxo de ar quente, sugerindo onde estariam acontecendo emissões fugitivas (Figura 8(a) e (b)).

Figura 8: Fluxo de calor em meio poroso simulado em laboratório.

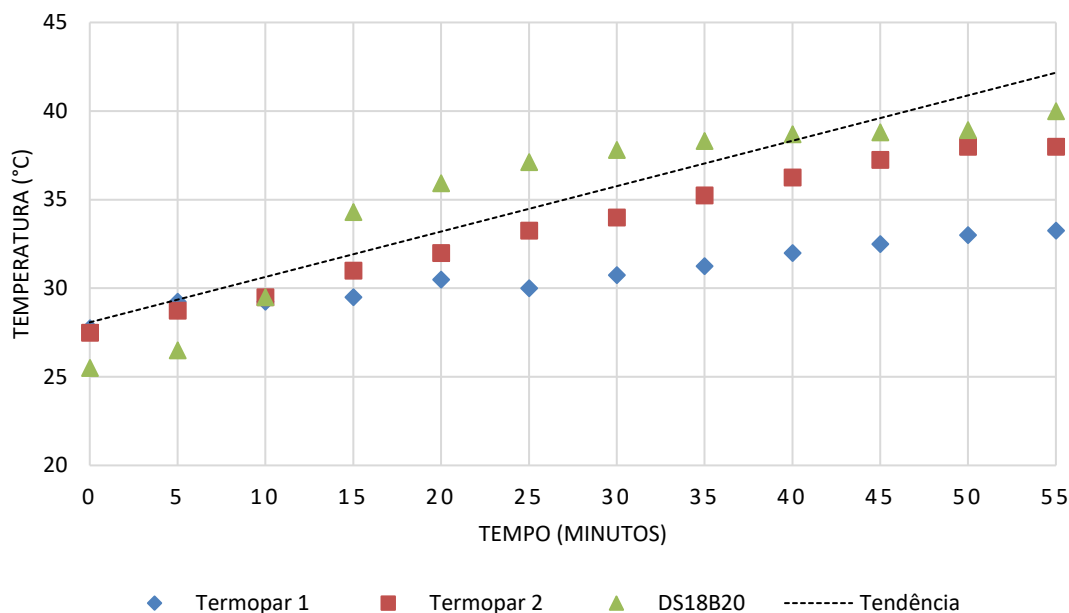


(a) Imagem lateral

(b) Imagem longitudinal

Com temperatura ambiente medida em 25°C, a temperatura inicial representada pelos valores do Sensor DS18B20 indicam a injeção inicial de ar quente a 25,5°C, enquanto na temperatura de superfície, os valores dos termopares 1 e 2 equivalem à 25°C, conforme mostrado no gráfico da Figura 9.

Figura 9: Gráfico de evolução da temperatura no meio poroso.



5. CONCLUSÃO

O ACJ ainda recebe resíduos do setor de construção, resultando em uma camada irregular do solo que pode dificultar o escape do fluxo de gases pela superfície. Neste cenário, é possível explicar a diferença entre a baixa concentração de metano e a alta temperatura da superfície nos pontos 6 e 9, onde a reação de degradação dos resíduos ali dispostos pode ter sido a principal causa do aquecimento da superfície. As emissões foram medidas na superfície da encosta e as concentrações de CH₄ variaram entre 1 e 38%, de CO₂ entre 0,3 e 37% e a temperatura do solo variou entre 10 e 55°C. Considerando que não houve interferência da incidência solar nos resultados dos dez pontos analisados, oito pontos mostraram convergência entre os aumentos da temperatura e altas concentrações de CH₄ e CO₂, o que mostra uma correlação entre as emissões fugitivas do ACJ e a temperatura dada pela termografia.

Em laboratório, foi confirmado que o aquecimento se dá preliminarmente em regiões de fissura. A medição de temperatura por sensores e as imagens termográficas mostram o aquecimento desigual entre as camadas inferiores e a região menos densa do meio poroso. Fissuras são regiões que aqueceram mais intensamente e com maior velocidade em relação a demais áreas, e foram detectadas com mais precisão pelo infravermelho. Foi observado, também, a partir das medições de concentração de gás *in situ*, que o biogás escapa preferencialmente por fissuras no solo. São dados que proporcionaram uma boa correlação entre vazamento de gás e aquecimento do solo pelo uso da termografia.

Foi observado que a interferência climática deve ser considerada na aplicação da termografia como instrumento de detecção de vazamento de biogás. É necessário que os dados sejam coletados antes do nascer do sol para ampliar o contraste de temperatura entre o solo e o ambiente, visto que durante a noite o solo perde calor para o ambiente por radiação.

Por não contar com adequada impermeabilização da camada de solo que recebeu resíduos para o seu aterramento, a estrutura do ACJ está suscetível ao ressecamento e abertura de fissuras que proporcionam emissões fugitivas de gases. Pelo histórico de depósito irregular de resíduos no Brasil, pode-se concluir que esta é uma situação recorrente em diversos lixões, aterros controlados e sanitários no país. Assim, o teste de novas ferramentas confiáveis de baixo custo é necessário

para otimizar a manutenção e a captura de gás de aterro para remediação ambiental e recuperação energética. A literatura indica o uso de termografia na triagem e detecção de vazamentos de gás em aterros como uma ferramenta que ainda precisa de complementação, o que foi verificado durante a coleta de dados realizada.

Por isso, este estudo mostra que a termografia por infravermelho é uma metodologia promissora para complementar a identificação de vazamentos de gases em aterros, mostrando-se extremamente adequada para situações de aterros sanitários e controlados no Brasil, que possuem pouca infraestrutura de quantificação e coleta de gases, além de baixa capacidade de investimento.

1.

2. REFERÊNCIAS

ALVES, J.W.S. Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado pela digestão anaeróbia de resíduos, 2000. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo.

BATTAGLINI, R., RACO B. e Scozzari, A.. "Effective monitoring of landfills: Flux measurements and thermography enhance efficiency and reduce environmental impact". *Journal of Geophysics and Engineering*, Vol. 10, No. 6. ISSN 17422132. doi:10.1088/1742-2132/10/6/064002. 2013.

CAVALCANTI, M.M. "Aplicação De Métodos Geométricos no delimitamento da pluma de contaminação nos limites do aterro controlado do Jockey Clube de Brasília". p. 128., 2013. Tese (Doutorado) – Universidade de Brasília.

COSTA, D.F., "Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto". Relatório Técnico. Universidade de São Paulo, 2006.

DESIDERI, U., LEONARDI, D. PROJETTI, S., 2007. "APPLICATION OF INFRARED THERMOGRAPHY TO STUDY BEHAVIOUR OF BIOGAS CAPTATION WELLS". Relatório Técnico, 2017.

EPA, U.S. Agência de Proteção Ambiental. Summary Report: Greenhouse Gas Emissions: 1990-2030, 2012.

FJELSTED, L., "Detection of gas leakage from landfills using infrared thermography - Applicability and limitations". *Waste Management and Research*, Vol. 21, No. 5, pp. 436–447. ISSN 0734242X. doi:10.1177/0734242X0302100506.

LEWIS, A.W., Yuen, S.T. and Smith, A.J., "Detection of gas leakage from landfills using infrared thermography - Applicability and limitations". doi:10.1177/0734242X0302100506. 2003.

OLIVEIRA, L.R.G. de. "Estudo das emissões de biogás em camadas de coberturas de aterro de resíduos sólidos urbanos". 2005. Tese (doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco.