

Otimização da captação de metano de um aterro sanitário do Nordeste brasileiro

Gemmelle Oliveira Santos ^[1], Eliana Dantas Ribeiro ^[2], Francisco Carlos Henrique Pio de Oliveira ^[3], Samara Castro Freire ^[4], Roberto Antônio Cordeiro da Silva ^[5]

[1] gemmelle@ifce.edu.br. [2] elianadtr@hotmail.com. [3] franciscocarlospho@gmail.com. IFCE. [4] sosamara505@gmail.com. [5] roberto@det.ufc.br. UFC.

RESUMO

A pesquisa objetivou determinar as condições ótimas de captação de metano (m³/h) em três drenos horizontais do Aterro Sanitário de Caucaia-CE a partir de ajustes e testes na pressão de sucção. No dreno PH335, a maior concentração de metano (63,6%) ocorreu com a válvula do cabeçote aberta a 25%, ou seja, trabalhando com -1,5 mb de pressão e captando 41,0 m³/h. Acima de 25%, a concentração de metano diminui e mais contaminantes (oxigênio, nitrogênio e outros gases) entram no dreno, prejudicando a qualidade. No dreno PH361, a maior concentração de metano (61,4%) ocorreu com a válvula aberta a 75 e 100%, ou seja, sob -5,9 e -7,1 mb de pressão e captando 86,1 e 92,2 m³/h, respectivamente. Diferentemente do dreno anterior, a progressiva abertura da válvula nesse dreno não arrasta contaminantes. No dreno PH363, a maior concentração de metano (55,3%) ocorreu com a válvula aberta a 75%, ou seja, a -8,2 mb de pressão e captando 52,2 m³/h. Quanto mais aberta a válvula, mais contaminantes entram nesse dreno. Esses dados mostram que cada dreno possui características únicas, exigindo controle de vácuo específico, e que a concentração de metano variou vertical e horizontalmente em curtas distâncias; portanto, a qualidade dos gases captados depende da localização do dreno.

Palavras-chave: Aterro sanitário. Drenagem de Gás. Metano.

ABSTRACT

This research aimed to determine the optimal methane uptake conditions (m³/h) in three horizontal drains of the Sanitary Landfill from Caucaia-CE from adjustments and tests on suction pressure. In the PH335 drain, the highest concentration of methane (63.6%) occurred with 25% valve aperture, i.e. working at -1.5 mb of pressure and capturing 41.0 m³/h. Above 25%, methane concentration decreases and more contaminants (oxygen, nitrogen and other gases) enter the drain, damaging its quality. In the PH361 drain, the highest methane concentration (61.4%) occurred with the valve opened at 75 and 100%, i.e., under -5.9 and -7.1 mb of pressure, capturing 86.1 and 92.2 m³/h, respectively. Unlike the previous drain, the progressive valve opening does not carry contaminants. In the PH363 drain, the highest methane concentration (55.3%) occurred with the valve open at 75%, that is, at -8.2 mb of pressure and capturing 52.2 m³/h. In the PH363 drain, the highest methane concentration (55.3%) occurred with the valve opened at 75%, i.e., at -8.2 mb of pressure and capturing 52.2 m³/h. In this drain, the larger the opening, the greater the input of contaminants. The results show that each drain has unique characteristics, requiring specific vacuum control, the quality of the gases captured depends on the location of the drain.

Keywords: Landfill. Gas drainage. Methane.

1 Introdução

Os aterros sanitários são a única alternativa de disposição final de resíduos sólidos sobre o solo permitida pela Lei Federal nº 12.305/2010, que trata da Política Nacional de Resíduos Sólidos. Para Van Elk (2007), o aterro sanitário – quase sempre – apresenta a melhor relação custo-benefício quando comparado com outras tecnologias.

O uso dos aterros sanitários não cessa os riscos inerentes aos resíduos sólidos; na realidade, o alto potencial poluidor dos resíduos e sua biodegradação exigem que os aterros sanitários sejam monitorados do ponto de vista geotécnico e ambiental durante sua operação e por muitos anos após o encerramento da sua vida útil, para evitar acidentes (desmoronamentos e explosões) e danos ambientais (contaminação do ar, dos solos e dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos).

Os processos de transbordo, espalhamento, compactação e cobertura diária dos resíduos sólidos dentro dos aterros sanitários disparam inúmeros agentes físicos, químicos e biológicos nos resíduos, que, sob influência também das condições externas, resultam na degradação dos materiais orgânicos e na geração de lixiviados e gases.

A extração dos gases e a drenagem dos líquidos são formas de reduzir a pressão interna no maciço de resíduos, permitir a acomodação das camadas (STACHOWITZ, 2001), aumentar a estabilidade do aterro sanitário, reduzir o risco de explosão (WILLUMSEN, 2001; YUCEKAYA, 2014) e viabilizar o tratamento e/ou aproveitamento dos lixiviados e gases.

Na maioria dos aterros sanitários, são instalados sistemas de captação de gases compostos por drenos horizontais e/ou verticais interligados (YUCEKAYA, 2014) feitos de tubos de PVC, concreto, PEAD etc, com extração passiva ou ativa (sob pressão de bombeamento).

A captação ativa dos gases do aterro está geralmente associada com algum projeto de aproveitamento do gás metano. Conforme Tooley (2007), o gás metano extraído de um aterro sanitário pode ser usado como combustível para geração de energia elétrica, canalizado para residências para fins de aquecimento ou uso diretamente na cozinha, e usado em processos químicos industriais. O metano, sob condição de alta purificação, pode ser injetado diretamente na rede de gás natural (WILLUMSEN, 2001).

A captação do metano em aterros demanda a escolha de bons materiais para compor o sistema de drenagem – são necessários materiais resistentes, impermeáveis e flexíveis, a exemplo dos tubos de PEAD. É importante, ainda, determinar com precisão a profundidade de instalação, inclinação e proteção mecânica de cada dreno, além da escolha precisa da pressão de sucção.

A distribuição dos poços também tem um efeito significativo na capacidade de coleta do metano em aterros sanitários (XUE; LIU, 2013). Já a pressão necessária para extrair os gases depende de muitos fatores: distância entre o aterro e a planta de aproveitamento – que influencia na perda de carga e em alterações na qualidade dos gases; espaçamento entre os drenos – o ideal seria entre 20 e 30m, conforme Stachowitz (2001); tipo de drenagem (vertical ou horizontal); qualidade do sistema de impermeabilização do aterro; concentração e volume dos gases.

Uma pressão inadequada pode gerar explosões em qualquer ponto do sistema (TERRAZA; WILLUMSEN, 2009), aumentar custos com energia elétrica, captar maiores teores de contaminantes (oxigênio, nitrogênio, umidade) ou mesmo subutilizar a planta de aproveitamento energético. O correto é equilibrar a taxa de extração com a taxa de geração (EPA, 2009).

No Brasil, existem 640 aterros sanitários, sendo que 48 (7,50%) destes possuem sistema de aproveitamento dos gases (BRASIL, 2017). No Ceará, existem 6 aterros sanitários (BRASIL, 2017), sendo que o maior deles fica na região metropolitana de Fortaleza: o Aterro Sanitário de Caucaia (ASC).

Em 2015, o ASC começou a receber as melhorias necessárias para instalação de um projeto de aproveitamento energético do metano. Em 2017, a planta entrou em operação em caráter experimental. Hoje, 2019, são comercializados aproximadamente 6.000 m³/hora de metano purificado, que é extraído do aterro através de um conjunto de drenos verticais e horizontais interligados ao sistema de bombeamento/sucção.

Várias visitas técnicas realizadas ao ASC permitiram observar que a abertura das válvulas dos cabeçotes dos drenos – que, na prática, significa mudanças na pressão de sucção e vazão de captação – ocorre de forma muito empírica (apesar da larga experiência dos técnicos responsáveis), o que suscitou a importância de desenvolver uma pesquisa piloto

voltada à determinação das condições ótimas de captação de metano.

Como bem lembrou Leone (2007), o monitoramento de um poço de gás permite avaliar sua eficácia e decidir sobre a instalação (ou não) de um poço adicional, além de verificar se há configurações ou melhorias operacionais para aumentar a eficiência da coleta e minimizar a migração de gases para fora do aterro.

Nesse contexto, esta pesquisa objetivou determinar as condições ótimas de captação de metano (m³/h) em três drenos horizontais do ASC a partir de sucessivos ajustes e testes na pressão de sucção/bombeamento.

2 Materiais e métodos

O trabalho foi desenvolvido no Aterro Sanitário de Caucaia (ASC), região metropolitana de Fortaleza. O aterro recebe aproximadamente 4.500 toneladas de resíduos sólidos urbanos por dia e dista 30 Km, pelas BR-222 ou BR-020, de Fortaleza-CE.

Em relação à tipologia, 46% (em massa) do que chega ao ASC tem origem domiciliar, 17% são provenientes dos pontos de lixo cadastrados no sistema de monitoramento da Prefeitura, 14% são resíduos da atividade de capina, 11% são resíduos da construção e demolição provenientes de pequenos geradores (utilizado em camadas intermediárias quando a disponibilidade de solo encontra-se reduzida), 7% são classificados como resíduos de particulares (provenientes de empresas em geral), 3% são resíduos de poda (submetidos à trituração para fabricação de briquetes) e 2% são resíduos de varrição.

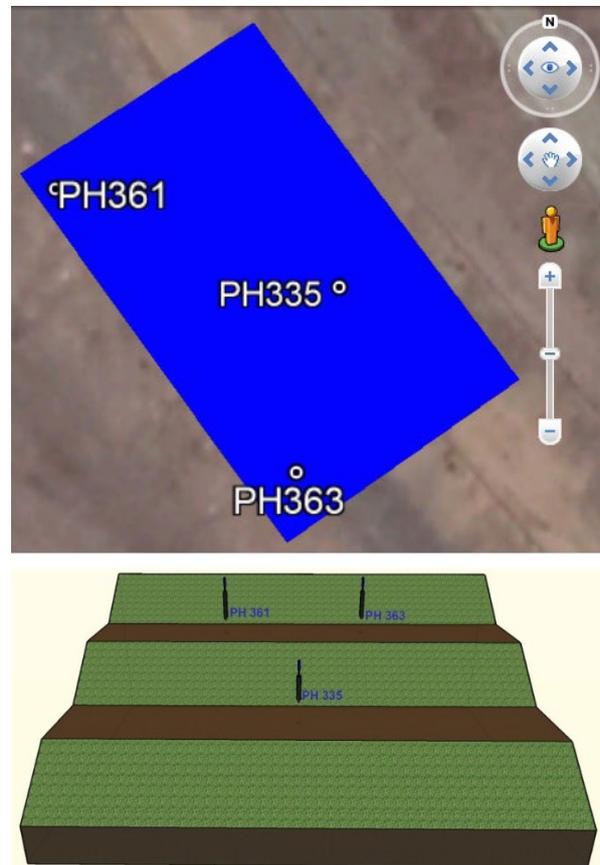
Em 2018, a análise de 32 amostras de 100 Kg (cada) de resíduos sólidos domiciliares destinados ao ASC mostrou que, em média, 34,20% são resíduos classificados como restos de alimentos, 39,20% são passíveis de recicláveis e 26,60% são rejeitos. O ASC recebeu aproximadamente 624 mil toneladas de resíduos domiciliares em 2018.

A área total do ASC equivale a 123,20 ha, sendo 78,47 ha destinados à disposição de resíduos; 32,15 ha de área de preservação ambiental; 7,04 ha de faixa de preservação de contorno; 3,19 ha de sistema viário interno; 2,35 ha de administração, urbanização e estacionamento.

A área pesquisada tem 929 m² e 125 m de perímetro. É composta por duas bermas e um talude. Foi isolada e escolhida pelos técnicos do ASC pelos constantes problemas em seus drenos. Nela existem

3 drenos horizontais de aproximadamente 60 m de comprimento (um na berma inferior, chamado pelos técnicos do ASC de PH335, e dois na berma superior, chamados PH361, PH363), conforme ilustrado na Figura 1.

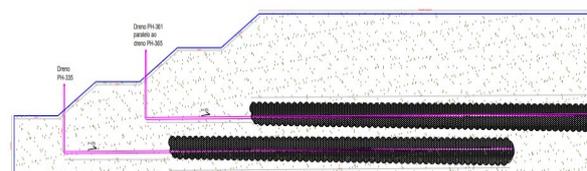
Figura 1 – Localização dos drenos horizontais monitorados na área pesquisada



Fonte: autores

Os primeiros 12 m de cada dreno são de PEAD (160 mm de diâmetro) liso, e os 48 m seguintes são de PEAD perfurado, envolvido por britas e coberto com resíduos recém-coletados (materiais de grande granulometria que devem proteger a integridade do dreno e funcionar como “filtro”), como representado na Figura 2.

Figura 2 – Representação geral dos drenos horizontais



Fonte: autores

Para a instalação horizontal dos drenos, é realizada uma escavação de aproximadamente 3 m de profundidade na sua extremidade lisa, com 2% de inclinação na direção da extremidade perfurada (essa inclinação ajuda no escoamento de líquidos, evitando a obstrução do dreno).

A extremidade lisa atravessa a camada de cobertura e se conecta a um cabeçote. Esse cabeçote possui 3 conectores (do tipo engate rápido) nas exatas especificações do leitor de gás GEM5000, exibido na Figura 3.

Figura 3 – Cabeçote do dreno horizontal conectado ao leitor de gás GEM5000



Fonte: autores

Esse equipamento permite a leitura da concentração de oxigênio (%), monóxido de carbono (ppm), dióxido de carbono (%), metano (%) e gás sulfídrico (%). Além disso, permite medir a temperatura (°C), a pressão (mb) e o fluxo de gases (m³/h). Cada dreno foi monitorado durante 9 campanhas de campo, que se iniciaram em 2018 e se encerraram em 2019, sempre no turno da manhã.

Para determinar as condições ótimas de captação de metano (m³/h), foram realizados ajustes e testes na pressão de sucção, observando seus reflexos sobre a vazão e qualidade dos gases, ou seja, abriu-se a válvula do cabeçote de cada dreno e monitorou-se sua qualidade em 4 posições: 25, 50, 75 e 100% aberta.

Após ligar e calibrar o GEM5000, realizou-se a conexão do equipamento ao cabeçote do dreno e a leitura da concentração dos gases durante 120 segundos em cada uma das 4 posições da válvula.

Entre as leituras, realizou-se uma “purga” de 15 segundos no equipamento (leitura ao ar livre para limpeza).

3 Resultados e discussão

Em linhas gerais, observou-se que cada dreno possui características únicas, exigindo controle de vácuo específico para aumentar sua eficiência na coleta dos gases, em particular do metano.

Os três drenos apresentaram maior percentual de metano que de dióxido de carbono, mostrando clara presença da fase metanogênica, mesmo com resíduos depositados há poucos anos (≤ 5 anos).

Para Kashyapa, Chughb e Nandakumarc (2016), os aterros sanitários de países tropicais atingem a fase metanogênica de degradação dos resíduos muito mais rápido que aterros de países temperados, com boa produção de metano nos 3 primeiros anos e quase toda produção de gás dentro de 20 anos após a compactação dos resíduos.

No dreno PH335, a concentração de metano foi até 1,8 vezes maior que a concentração de dióxido de carbono. Nos demais, essa diferença foi de 1,7 (dreno PH361) e 1,4 (dreno PH363).

Em dois drenos (PH335 e PH363) a concentração de oxigênio – mesmo estando dentro dos limites da literatura – aumentou com o crescimento da pressão de sucção, o que pode significar um risco de elevação das taxas de oxidação do metano ou, em outras palavras, um prejuízo direto para a planta de aproveitamento, já que a oxidação do metano resulta em dióxido de carbono (que não tem poder calorífico) e água.

Conforme Bo-Feng *et al.* (2014), a taxa de oxidação depende da composição dos resíduos, do tipo de material e espessura da cobertura do aterro e da umidade e temperatura deste. Se o teor de umidade estiver entre 11 e 25%, como o medido nesta pesquisa, tem-se a condição ideal de oxidação do metano (BOECKX, VAN CLEEMPUT, VILLARALVO, 1996; WHALEN *et al.*, 1990).

O dreno PH361 foi o que apresentou os maiores fluxos (m³/h) por unidade de pressão (mb): entre 13 e 21 m³/h para cada 1 mb. No extremo oposto ficou o dreno PH363, com 6 - 9 m³/h por unidade de pressão.

Para a EPA (2012), altos níveis de lixiviado em um poço podem reduzir a coleta do biogás, especialmente se o poço estiver submerso (no aterro pesquisado existem alguns drenos verticais nessa situação, inclusive próximos da área estudada).

Por outro lado, a produção de metano em aterros sanitários é favorecida com a prática da recirculação dos lixiviados, pois esse processo aumenta o teor de água, fornece e distribui nutrientes e biomassa (ABUSHAMMALA *et al.*, 2010; ZHANG; HE; SHAO, 2008). Além disso, a recirculação é uma opção complementar de tratamento do lixiviado, uma vez que propicia a atenuação de seus constituintes pela atividade biológica e por reações físico-químicas que ocorrem no interior do aterro (SANTOS, 2012).

Considerando apenas a concentração média geral das 09 campanhas de campo, o dreno PH335 (que está no talude inferior, portanto envolvido por um maior volume de resíduo) foi o que apresentou o maior teor de metano (61,5%), seguido do PH361 (61,2%) e do PH363 (55,1%).

Conforme Santos (2012), a velocidade e o volume da produção de gases, bem como sua composição, são específicos de cada aterro e, ao mesmo tempo, diferentes em seus diversos pontos, o que ajuda a entender as variações observadas entre os resultados dos drenos desta pesquisa.

Observou-se, também, que os drenos PH361 e PH363, apesar de instalados no mesmo talude, apresentaram diferenças de até 11,3% na concentração de CH₄. Isso significa que os perfis de concentração tiveram relevante variabilidade em curtas distâncias (o dreno PH361 dista aproximadamente 31,5 m do dreno PH363); conclusão semelhante foi realizada por Schroth *et al.* (2012) e Röwer *et al.* (2011).

Conforme González *et al.* (2011), a variação nos drenos pode significar mudanças nas condições de campo, na composição real dos resíduos, nos teores de umidade, no nível de compactação e na temperatura. Os microrganismos aumentam sua produtividade quando a temperatura está entre 35 e 45°C.

A maior temperatura média geral dos gases foi observada no dreno PH335 (48,9°C), seguido do dreno PH361 (47,7°C) e do dreno PH363 (43,6°C). Como dito anteriormente, o PH335 está no talude inferior e, portanto, sob um maior volume de resíduos; isso, de certo modo, justifica uma fase mais ativa de degradação, com geração maior de calor na sua zona de captação/influência.

Conforme Hanson, Yesiller e Kendall (2005), temperaturas mais altas são geralmente encontradas em profundidades maiores, e, para atingir concentrações de até 70% de metano, são requeridas temperaturas de até 48°C.

Observou-se, ainda, que os drenos PH361 e PH363 apresentaram uma leve correlação positiva entre o aumento da temperatura e a concentração de metano.

Conforme Santos (2012), as temperaturas interna e externa dos aterros sanitários têm importante significado no processo de decomposição dos resíduos, pois atua na cinética das reações químicas e na atividade dos microrganismos.

Como destacou Leone (2007), a qualidade dos gases captados depende da localização do dreno. Já a taxa de migração dos gases depende, em grande parte, das propriedades físicas do solo (densidade, porosidade, saturação, permeabilidade) e da pressão de sucção, conforme Vigneault, Lefebvre e Nastev (2004) e Röwer *et al.* (2011).

Segundo a *United States Army Corps of Engineer* (USACE, 2008), a migração de gases em aterros sanitários é maior por advecção (gradiente de pressão) que por difusão (gradiente de concentração).

No dreno PH335, a maior concentração média de metano (63,6%) ocorreu com a válvula aberta a 25%, ou seja, trabalhando com -1,5 mb de pressão e captando 41,0 m³/h de biogás. Acima de 25%, a concentração de metano diminui mesmo que aumente a pressão de sucção. Além disso, quanto mais aberta a válvula, mais contaminantes (oxigênio, nitrogênio, outros gases não determinados, vapor de água) entram no dreno, prejudicando a qualidade do sistema de aproveitamento (Tabela 1). A participação do vapor de água, por exemplo, pode chegar a 7% em volume (USACE, 2008).

Tabela 1 – Composição dos gases, pressão e vazão no dreno PH335, Aterro de Caucaia-CE

Concentração	Abertura da Válvula			
	25%	50%	75%	100%
%				
CH ₄	63,6	60,9	60,7	60,7
CO ₂	35,0	36,4	36,2	36,0
O ₂	0,2	0,3	0,5	0,7
Outros Gases	1,2	2,4	2,7	2,6
Pressão estática (mb)	-1,5	-8,1	-9,7	-10,0
Vazão (m ³ /h)	41,0	64,6	70,3	77,2
Temperatura (°C)	48,4	49,0	49,1	49,0

Fonte: elaboração própria

Conforme Leone (2007), a extração desproporcional de gás em um determinado dreno pode gerar o risco de entrada de ar, diminuindo a qualidade do gás captado em função do impacto negativo do ar sobre os microrganismos anaeróbios. Essa intrusão muda também o volume de coleta (EPA, 2012).

Para Pacheco (2004), se o ar atmosférico (ou oxigênio puro) for borbuhlado para o interior do aterro, a digestão aeróbia pode se estender por um longo período, e grandes quantidades de dióxido de carbono e hidrogênio serão produzidas, principalmente se o aterro estiver seco.

De acordo com a *International Solid Waste Association* (ISWA, 2010), a decomposição aeróbia pode durar seis ou mais meses, dependendo da proximidade dos resíduos com o ar da superfície do aterro.

A entrada de ar pela camada de cobertura de um aterro sanitário é provavelmente maior durante os períodos de alta pressão barométrica (USACE, 2008), quando também irá ocorrer redução das fugas de biogás (XU *et al.*, 2014).

Diversas pesquisas – Capaccioni *et al.* (2011) na Itália; Huber-Humer e Lechner (1999) na Áustria; Johnsson (2010) na Suécia; Laurila *et al.* (2006) na Finlândia; Milke, Holman e Khire (2006) na Nova Zelândia; Park e Shin (2001) na Coreia do Sul; Scheutz *et al.* (2008) na França e Stern *et al.* (2007) nos Estados Unidos – mostram que as fugas dependem do tipo de área de disposição, das características físicas dos solos, da espessura da camada de cobertura, da forma de compactação dos resíduos e da sua idade, da estação do ano, do horário de medição, da altura das camadas de resíduos e de questões relacionadas a pressão e temperatura interna-externa.

No dreno PH361, a maior concentração média de metano (61,4%) ocorreu com a válvula aberta a 75 e 100%, ou seja, sob -5,9 e -7,1 mb de pressão e captando 86,1 e 92,2 m³/h de biogás, respectivamente. Diferentemente do dreno anterior, a progressiva abertura da válvula não arrasta contaminantes para o dreno; na realidade, diminui o teor de oxigênio (%) e estabiliza a concentração de outros contaminantes, como demonstrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Composição dos gases, pressão e vazão no dreno PH361, Aterro de Caucaia-CE

Concentração	Abertura da Válvula				
	%	25%	50%	75%	100%
CH ₄		60,8	61,3	61,4	61,4
CO ₂		35,9	37,2	37,5	37,4
O ₂		1,3	0,2	0	0
Outros Gases		2,0	1,3	1,1	1,2
Pressão estática (mb)		-3,1	-3,7	-5,9	-7,1
Vazão (m ³ /h)		39,6	76,5	86,1	92,2
Temperatura (°C)		45,7	48,4	48,7	48,0

Fonte: elaboração própria

Condições muito específicas relacionadas com composição dos resíduos, tamanho das partículas, temperatura, umidade, pH, idade dos resíduos (SANTOS, 2012) devem justificar o comportamento do dreno PH361, exigindo uma pesquisa específica.

Considerando apenas a questão da pressão, é mais interessante para o dreno PH361 trabalhar com a válvula aberta a 75% (-5,9 mb), já que a concentração de metano estabiliza a partir dessa condição/abertura. Somente nesse dreno, os teores de oxigênio diminuíram com o progressivo aumento da pressão de sucção.

Para a *Agency for Toxic Substances and Disease Registry* (ATSDR, 2001), uma baixa concentração de oxigênio dentro de um aterro sanitário pode significar uma alta compactação dos resíduos, completa presença da fase anaeróbia e um bom sistema de isolamento promovido pela camada de cobertura com relação à atmosfera.

No contexto ambiental e geotécnico dos aterros sanitários, a camada de cobertura final tem como função isolar a massa de resíduos do ambiente externo e controlar o fluxo (percolação, emissão e retenção) de gases (SILVA *et al.*, 2013).

Além disso, conforme o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 2000), o sistema de cobertura tem a função de eliminar a proliferação de vetores, diminuir a taxa de formação de líquidos percolados, impedir a catação, permitir o tráfego de veículos coletores sobre o aterro e eliminar a queima de resíduos.

Alguns autores (MACIEL *et al.*, 2009; OLIVEIRA, 2011) apontam que a percolação de gases em aterros sanitários poderá ocorrer em diferentes

direções, sentidos e intensidades, variando conforme a existência (ou não) de caminhos preferenciais, além das características da camada de cobertura (compactação, fissuras), da composição e pressão do biogás imediatamente abaixo da camada.

Para Röwer *et al.* (2011), as propriedades do solo determinam os padrões de fluxo de gás. Conforme Moreira (2018), a predominância de materiais finos no solo preenche os vazios decorrentes das partículas maiores, principalmente quando o solo é bem compactado, contribuindo para a formação de uma barreira mais eficiente à passagem de gases pela camada.

Na hipótese de Chanton *et al.* (2011), que estudaram dois aterros sanitários do sudeste dos Estados Unidos, locais com baixa emissão de CH₄ devem ter altas taxas de oxidação desse gás, mas a porcentagem de oxidação não é constante; varia em função do tipo de cobertura, das condições climáticas e da carga de CH₄ logo abaixo da camada de cobertura. Depende também da temperatura do solo (HÉROUX; GUY; MILLETTE, 2010).

Conforme Vigneault, Lefebvre e Nastev (2004), os fluxos de gases de um aterro sanitário também mantêm relação com a densidade de cada gás: o metano é mais leve que o ar, com uma densidade de 0,7 kg/m³ a 10°C, enquanto o dióxido de carbono é um gás mais denso (1,9 kg/m³) e bastante solúvel em água. A densidade de CH₄ é afetada pelo calor e por efeitos espectroscópicos devido a mudanças de temperatura, pressão e vapor de água (XU *et al.*, 2014).

No dreno PH363, a maior concentração de metano (55,3%) ocorreu com a válvula aberta a 75%, ou seja, a -8,2 mb de pressão e captando 52,2 m³/h de biogás. Acima de 75%, a concentração de metano diminui (levemente) mesmo que a vazão aumente. Além disso, quanto mais aberta a válvula, mais contaminantes entram no dreno (oxigênio, nitrogênio e outros gases), prejudicando o sistema, conforme a Tabela 3.

Conforme Leone (2007), a eficiência de coleta e a qualidade do gás são afetadas também por parâmetros meteorológicos (precipitação, pressão atmosférica, temperatura, umidade do ar).

Tabela 3 – Composição dos gases, pressão e vazão no dreno PH363, Aterro de Caucaia-CE

Concentração	Abertura da Válvula			
	25%	50%	75%	100%
%				
CH ₄	54,8	55,1	55,3	55,2
CO ₂	41,8	41,3	40,9	39,4
O ₂	0,9	1,1	1,2	1,7
Outros Gases	2,5	2,5	2,6	3,7
Pressão estática (mb)	-3,5	-7,3	-8,2	-8,4
Vazão (m ³ /h)	32,3	48,1	52,2	53,6
Temperatura (°C)	43,2	43,4	43,6	44,0

Fonte: elaboração própria

Para a USACE (2008), a pressão atmosférica, por exemplo, pode diminuir ou aumentar a taxa de liberação de gás de um aterro bem como influenciar o funcionamento dos sistemas de extração de gás.

4 Conclusão

A geração e captação de gases nos aterros sanitários dependem de muitos fatores (internos e externos, isolados e combinados, temporários e permanentes), e isso transmite aos drenos condições muito particulares em termos de vazão e concentração de metano.

O monitoramento realizado no aterro estudado permitiu, de certo modo, prever a melhor condição de funcionamento para cada dreno, sugerindo melhorias na eficiência de coleta do metano e redução de contaminantes, ou seja, cada dreno tem uma forma particular de melhor explorar o aterro.

A área pesquisada se encontra na fase metanogênica de degradação dos resíduos, sendo bastante acertada, em termos energéticos e financeiros, a decisão pela instalação da estrutura de captação e da planta de aproveitamento dos gases.

A concentração de metano variou vertical e horizontalmente em curtas distâncias, considerando os resultados dos drenos monitorados.

Os valores da temperatura parecem anunciar que a área estudada está com alta taxa de degradação dos resíduos e de geração de gases e lixiviados.

A heterogeneidade dos resíduos também ajuda a entender os fluxos de gases em cada dreno, e os resultados preliminares desta pesquisa estão servindo

de base para a implantação de um programa mais amplo de diagnóstico e monitoramento de emissões no ASC, além de uma pesquisa de mestrado em desenvolvimento.

REFERÊNCIAS

- ABUSHAMMALA, M. F. M. et al. Estimation of methane emission from landfills in Malaysia using the IPCC 2006 FOD Model. *Journal of Applied Sciences*, v. 10, n. 15, p. 1603-1609, jun. 2010. DOI: 10.3923 / jas.2010.1603.1609. Disponível em: <https://scialert.net/abstract?doi=jas.2010.1603.1609>. Acesso em: 20 ago. 2019.
- AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY - ATSDR. Landfill Gas Basics. In: ATSDR. Landfill Gas Basics Primer: An Overview for Environmental Health Professionals. Atlanta: ATSDR, 2001. p. 3-14. Disponível em: <https://www.atsdr.cdc.gov/HAC/landfill/html/toc.html>. Acesso em: 25 ago. 2019.
- BOECKX, P.; VAN CLEEMPUT, O.; VILLARALVO, I. Methane emission from a landfill and the methane oxidising capacity of its covering soil. *Soil Biology & Biochemistry*, v. 28, n. 10-11, p. 1397-1405, out./nov. 1996. DOI: 10.1016/S0038-0717(96)00147-2. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038071796001472>. Acesso em: 30 maio 2019.
- BO-FENG, C. et al. Estimation of methane emissions from municipal solid waste landfills in China based on point emission sources. *Advances in Climate Change Research*, v. 5, n. 2, p. 81-91, 2014. DOI: <https://doi.org/10.3724/SP.J.1248.2014.081>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674927814500147>. Acesso em: 25 ago. 2019.
- BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – SNS. Sistema nacional de informações sobre saneamento: diagnóstico do manejo de resíduos sólidos urbanos – 2017. Brasília: MDR.SNS, 2017.
- CAPACCIONI, B. et al. Effects of a temporary HDPE cover on landfill gas emissions: multiyear evaluation with the static chamber approach at an Italian landfill. *Waste Management*, v. 31, n. 5, p. 956-965, mai. 2011. DOI: 10.1016/j.wasman.2010.10.004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X10005283>. Acesso em: 28 set. 2019.
- CHANTON, J. et al. Observations on the methane oxidation capacity of landfill soils. *Waste Management*, v. 31, n. 5, p. 914-925, may. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.08.028>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X1000454X?via%3Dihub>. Acesso em: 28 set. 2019.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. Estimates of Methane Recovery in Landfill Gas Flaring and Utilisation. Ireland: Fehily Timoney & Co. Ltd, 2009. 50 p. Disponível em: https://www.epa.ie/pubs/reports/research/climate/CCRP_3_Timoney_MethaneLandfill_web.pdf. Acesso em: 13 set. 2019.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. Design, Construction and Operation of Landfill Gas Collection and Control Systems. In: EPA. International Best Practices Guide for LFG Projects. [S. l.]: Global Methane Initiative, 2012. p. 21-32.
- GONZÁLEZ, C. R. et al. Effect of solid wastes composition and confinement time on methane production in a dump. *Journal of Environmental Protection*, v. 2, n. 10, p. 1310-1316, 2011. DOI: 10.4236/jep.2011.210151. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/265949194_Effect_of_Solid_Wastes_Composition_and_Confinement_Time_on_Methane_Production_in_a_Dump. Acesso em: 25 set. 2019.
- HANSON, J. L.; YESILLER, N.; KENDALL, L. A. Integrated Temperature and Gas Analysis at a Municipal Solid Waste Landfill. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING, 16., 2005, Osaka. Proceedings [...].Osaka: Millpress, 2005. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/49251092_Integrated_Temperature_and_Gas_Analysis_at_a_Municipal_Solid_Waste_Landfill. Acesso em: 29 set. 2019.
- HÉROUX, M.; GUY, C.; MILLETTE, D. A Statistical Model for Landfill Surface Emissions. *Journal of the Air & Waste Management Association*, v. 60, n. 2, p. 219-228, 2010. DOI: 10.3155/1047-3289.60.2.219. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.3155/1047-3289.60.2.219?needAccess=true>. Acesso em: 14 set. 2019.
- HUBER-HUMER, M.; LECHNER, P. Alternative approach to the elimination of greenhouse gases from old landfills. *Waste Management*, v. 17, n. 6, p. 443-452, dec. 1999. DOI: 10.1034/j.1399-3070.1999.00064.x. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1034/j.1399-3070.1999.00064.x>. Acesso em 25 set. 2019.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - IPT. Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado. 2. ed. São Paulo: IPT, 2000.

- INTERNATIONAL SOLID WASTE ASSOCIATION - ISWA. Landfill operational guidelines. 2. ed. [S. l.]: ISWA, 2010. 106 p. Disponível em: <https://www.iswa.org/home/news/news-detail/article/download-the-3rd-landfill-operations-guidelines/109/>. Acesso em: 30 set. 2019
- JOHNSSON, E. Correlation between methane concentration and emission from old landfills in Sweden. 2010. Thesis (Master Environmental Engineering) – Division of Water Resources Engineering, Lund University, Sweden, 2010.
- KASHYAPA, R. K.; CHUGHB, P.; NANDAKUMARC, T. Opportunities & Challenges in Capturing Landfill Gas from an Active and Un-scientificallly Managed Land Fill Site - A Case Study. *Procedia Environmental Sciences*, v. 35, p. 348-367, 2016. DOI: 10.1016/j.proenv.2016.07.015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878029616301049>. Acesso em: 28 set. 2019.
- LAURILA, T. et al. Methane emissions from three different kinds of landfills measured by the micrometeorological eddy-covariance method. In: INTERCONTINENTAL LANDFILL RESEARCH SYMPOSIUM, 4., 2006, Sweden. Proceedings [...]. Sweden: [S.n.], 2006.
- LEONE, J. The Effects of Atmospheric Pressure Changes on Landfill Gas Collection Efficiency and Quality. 2007. Thesis (Master of Science in Environment, Health & Safety Management) – Rochester Institute of Technology, Rochester, NY, 2007.
- MACIEL, F. J. et al. Recuperação de Biogás em Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos - Projeto Piloto da Muribeca. In: CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ENERGIA ELÉTRICA, 5., 2009, Belém. Anais [...]. Belém: ANEEL, 2009. Disponível em: <http://www.mfap.com.br/pesquisa/arquivos/20090922100718-2.pdf>. Acesso em: 27 ago. 2019.
- MILKE, M. W.; HOLMAM, L.; KHIRE, M. Use of gas flux measurements to infer well capture effectiveness. In: INTERCONTINENTAL LANDFILL RESEARCH SYMPOSIUM, 4., 2006, Sweden. Proceedings [...]. Sweden: [S.n.], 2006. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10092/75>. Acesso em: 29 set. 2019.
- MOREIRA, F. G. dos S. Emissões fugitivas de biogás em célula de aterro sanitário. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018.
- OLIVEIRA, C. A. A. Análises de gases na camada de cobertura do Aterro Sanitário Municipal Oeste de Caucaia (ASMOC). 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil. Saneamento Ambiental) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.
- PACHECO, J. R. Estudo de certas potencialidades de processos oxidativos avançado para o tratamento de percolado de aterro sanitário. 2004. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.
- PARK, J. W.; SHIN, H. C. Surface emission of landfill gas from solid waste landfill. *Atmospheric Environment*, v. 35, p. 3445-3451, 2001. DOI: 10.1016/S1352-2310(01)00118-2. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1352231001001182>. Acesso em: 28 set. 2019.
- RÖWER, I. U. et al. Spatial variability of soil gas concentration and methane oxidation capacity in landfill covers. *Waste Management*, v. 31, n. 5, p. 926-934, may. 2011. DOI: 10.1016/j.wasman.2010.09.013. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/47414299_Spatial_variability_of_soil_gas_concentration_and_methane_oxidation_capacity_in_landfill_covers. Acesso em: 27 set. 2019.
- SANTOS, G. O. Avaliação do cultivo de gramíneas na superfície de aterro sanitário, com ênfase para a redução da emissão de metano e dióxido de carbono para a atmosfera. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Civil: Saneamento Ambiental) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.
- SCHEUTZ, C. et al. Atmospheric emissions and attenuation of non-methane organic compounds in cover soils at a French landfill. *Waste Management*, v. 28, n. 11, p. 1892-1908, nov. 2008. DOI: 10.1016/j.wasman.2007.09.010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X07003042>. Acesso em: 11 set. 2019.
- SCHROTH, M. H. et al. Above - and below - ground methane fluxes and methanotrophic activity in a landfill-cover soil. *Waste Management*, v. 32, n. 5, p.879-889, may. 2012. DOI: 10.1016/j.wasman.2011.11.003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X11005009>. Acesso em: 23 set. 2019.
- SILVA, T. N. et al. Avaliação das emissões superficiais do gás de aterros sanitários de grande porte. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 18, n. 2, p. 95-104, abr/jun. 2013. DOI: 10.1590/S1413-41522013000200001.

Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/esa/v18n2/a01v18n2.pdf>. Acesso em: 17 ago. 2019.

STACHOWITZ, W. H. 15 years of experience in the field of landfill gas disposal – standards, problems, solution, and procedures. In: INTERNATIONAL LANDFILL SYMPOSIUM, 8., 2001. Proceedings [...]. Sardinia. Sardinia: DAS-IB, 2001, p.601-611. Disponível em: https://www.das-ib.de/vortraege/sardinia_en.pdf. Acesso em: 18 set. 2019.

STERN, J. C. et al. Use of a biologically active cover to reduce landfill methane emissions and enhance methane oxidation. *Waste Management*, v. 27, n. 9, p. 1248-1258, sep. 2007. DOI: 10.1016/j.wasman.2006.07.018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X06002364>. Acesso em: 21 set. 2019.

TERRAZA, H.; WILLUMSEN, H. C. Guidance Note on Landfill Gas Capture and Utilization. [S.l.]: Inter-American Development Bank, 2009. 68 p. Disponível em: <https://publications.iadb.org/publications/english/document/Guidance-Note-on-Landfill-Gas-Capture-and-Utilization.pdf>. Acesso em: 29 ago. 2019.

TOOLEY, J. Optimizing energy production of a landfill gas extraction system. United States: Patent Application Publication, 2007. Disponível em: <http://www.freepatentsonline.com/20070225923.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2019.

UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS - USACE. Landfill off-gas collection and treatment systems. Washington: USACE, may. 2008. 15 p.

VAN ELK, A. G. H. P.; SEGALA, K. Redução de emissões na disposição final: Mecanismo de Desenvolvimento limpo aplicado a resíduos sólidos. Rio de Janeiro: IBAM, 2007, v. 3, 40 p. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/proclima/2007/05/23/reducao-de-emissoes-na-disposicao-final-mecanismo-de-desenvolvimento-limpo-aplicado-a-residuos-solidos/>. Acesso em: 27 set. 2019.

VIGNEAULT, H.; LEFEBVRE, R.; NASTEV, M. Numerical Simulation of the Radius of Influence for Landfill Gas Wells. *Vadose Zone Journal*, v. 3, p. 909-916, 2004. DOI: 10.2136/vzj2004.0909 Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/230819114_Numerical_Simulation_of_the_Radius_of_Influence_for_Landfill_Gas_Wells. Acesso em: 30 jul. 2019.

WILLUMSEN, H. C. Energy Recovery from Landfill Gas in Denmark and Worldwide. Viborg: LFG Consult, 2001. 9 p. Disponível em: <http://www.lei.lt/Opet/pdf/Willumsen.pdf>. Acesso em: 21 set. 2019.

WHALEN, S. C. et al. Rapid methane oxidation in a landfill cover soil. *Applied and Environmental Microbiology*, v. 56, n. 11, p. 3405-3411, 1990. DOI: 0099-2240/90/113405-07\$02.00/0. Disponível em: <https://aem.asm.org/content/aem/56/11/3405.full.pdf>. Acesso em: 22 set. 2019.

XU, L. et al. Impact of Changes in Barometric Pressure on Landfill Methane Emission. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 28, n. 7, p. 679-695, 2014. DOI: 10.1002/2013GB004571. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/2013GB004571>. Acesso em: 27 set. 2019.

XUE, Q.; LIU, L. Study on optimizing evaluation and recovery efficiency for landfill gas energy collection. *Environ Prog Sustainable Energy*, v. 33, n. 3, p. 972-977, 2013. DOI: 10.1002/ep.11831. Disponível em: <https://aiche.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/ep.11831>. Acesso em: 25 ago. 2019.

YUCEKAYA, A. Landfill Gas to Energy in Turkey: Current and Future. *Journal of Science and Technology*, v. 2, n. 1, p. 55-64, 2014. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/153449313.pdf>. Acesso em: 30 jul. 2019.

ZHANG, H.; HE, P.; SHAO, L. Methane emissions from MSW landfill with sandy soil covers under leachate recirculation and subsurface irrigation. *Atmospheric Environment*, v. 42, n. 22, p. 5579-5588, jul. 2008. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2008.03.010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231008002720>. Acesso em: 30 set. 2019.