

Giovano Candiani

EMISSÕES FUGITIVAS DE GÁS METANO EM ATERRO SANITÁRIO



EDITORIA INOVAR

EMISSÕES FUGITIVAS DE GÁS METANO EM ATERRO SANITÁRIO

Giovano Candiani

EMISSÕES FUGITIVAS DE GÁS METANO EM ATERRO SANITÁRIO

1.^a edição

MATO GROSSO DO SUL
EDITORA INOVAR
2020

Copyright © do autor.

Todos os direitos garantidos. Este é um livro publicado em acesso aberto, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais e que o trabalho original dos autores e autoras seja corretamente citado.

Giovano Candiani.

Emissões fugitivas de gás metano em aterro sanitário. Campo Grande: Editora Inovar, 2020. 72p.

ISBN: 978-65-86212-58-7

DOI: 10.36926/editorainovar-978-65-86212-58-7

1. Resíduos sólidos. 2. Aterro sanitário. 3. Metano. 4. Emissão fugitiva. 5. Camada de cobertura. 6. Autor. I. Título.

CDD – 577

O conteúdo do livro é de responsabilidade do autor.

Revisão do texto: o autor.

Conselho Científico da Editora Inovar:

Franchys Marizethe Nascimento Santana (UFMS/Brasil); Jucimara Silva Rojas (UFMS/Brasil); Maria Cristina Neves de Azevedo (UFOP/Brasil); Ordália Alves de Almeida (UFMS/Brasil); Otília Maria Alves da Nóbrega Alberto Dantas (UnB/Brasil), Guilherme Antônio Lopes de Oliveira (CHRISFAPI - Cristo Faculdade do Piauí).

Editora Inovar

www.editorainovar.com.br

79002-401 - Campo Grande – MS

2020

Apresentação

O processo de urbanização e crescimento populacional, são fatores que acentuam o aumento na geração de resíduos sólidos urbanos, criando a necessidade de se estabelecer estratégias adequadas e sustentáveis para gerenciar de forma adequada estes resíduos.

Particularmente, no Brasil, os resíduos são destinados aos lixões, aterros controlados e aterros sanitários, necessitando-se, portanto, urgentemente implementar práticas mais adequadas em termos de sustentabilidade, buscando-se alternativas direcionadas ao melhor aproveitamento destes, incluindo-se a recuperação de materiais e energia.

Os resíduos depositados nos aterros sanitários, sobretudo os orgânicos, sendo biodegradados irão produzir o biogás, rico em gás metano (CH_4), que captado, pode ser convertido em energia elétrica, por meio da sua combustão em motores geradores.

Promovendo contribuição ambiental, no tocante a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE), proporcionando benefícios referente as mudanças climáticas.

Entretanto, mesmo os aterros sanitários com bons sistemas de captação do gás metano, não conseguem captar em 100% todo o gás gerado e, parcelas significativas são emitidas de maneira fugitiva a atmosfera, representando além dos impactos ambientais, perdas econômicas relacionadas a redução na recuperação e aproveitamento do gás metano, associado a sua potencial comercialização ou conversão em energia elétrica, por exemplo.

Esta obra, apresenta as perspectivas relacionadas a mensuração quantitativa dessas emissões fugitivas de gás metano nos aterros sanitários, técnicas e procedimentos de medição e boas práticas para um gerenciamento mais eficiente de gás metano nos aterros sanitários, buscando-se reduzir essas perdas.

Esta obra é útil aos gestores dos aterros sanitários e dos sistemas de captação de biogás nos aterros sanitários, pesquisadores e consultores em geral e estudantes de graduação e pós-graduação de cursos de engenharia sanitária-ambiental, gestores e cientistas ambientais.

Cada vez mais, é necessário buscar soluções e alternativas ambientais adequadas e sustentáveis em face as questões ambientais e novas formas de gestão ambiental são exigidas.

Aproveitar melhor o gás metano produzido nos aterros sanitários, é de fato um aspecto importante, representando um potencial energético significativo.

Assim, espera-se que esta obra possa ser uma leitura proveitosa aos leitores e, principalmente possa contribuir profissionalmente a todos! Boa leitura!

O Autor.

Prefácio

Este livro é estruturado em seis capítulos, iniciando-se com uma introdução, na qual pretende-se apresentar a questão dos resíduos sólidos urbanos e, principalmente, a geração de energia elétrica a partir do gás metano gerado no aterro sanitário.

No Capítulo 1, “A geração de gás metano em aterro sanitário”, busca-se efetivamente apresentar os processos e fases da geração de gás metano no aterro sanitário, analisando-se os fatores de influência e o processo de biodegradação em geral.

No Capítulo 2, “O aproveitamento do gás metano de aterro sanitário”, procura-se desenvolver os procedimentos e estratégias para o aproveitamento do gás metano no aterro sanitário, incluindo os sistemas de captação do biogás e produção de energia elétrica.

No Capítulo 3, “Os impactos das emissões fugitivas de gás metano em aterro sanitário”, pretende-se analisar os impactos causados pelas emissões fugitivas de gás metano no aterro sanitário.

No Capítulo 4, “As técnicas, procedimentos e ensaios para medição do escape fugitivo de gás metano nos aterros sanitários”, será apresentado as diferentes metodologias e ensaios para se quantificar as emissões fugitivas de gás metano em aterro sanitário.

No Capítulo 5, “As emissões fugitivas de gás metano em diferentes aterros sanitários”, descreve-se exemplos e estudos de casos realizados de monitoramento das emissões fugitivas de gás metano em diferentes aterros sanitários brasileiros e internacionais.

No Capítulo 6, “Emissões fugitivas de gás metano no Aterro Sanitário Caieiras”, especificamente apresenta-se um estudo de caso feito de emissões fugitivas de gás metano no Aterro Sanitário Caieiras, localizado no município de Caieiras, estado de São Paulo.

Em seguida, são apresentadas as principais conclusões e considerações finais da obra e finalizando, apresenta-se o posfácio, fazendo-se uma retrospectiva geral sobre a obra e as perspectivas atuais e futuras sobre o aproveitamento do gás metano em aterro sanitário.

O metano de aterro sanitário é um gás, importantíssimo do ponto de vista energético, representando uma fonte viável, renovável e sustentável, sendo, portanto, um aproveitamento que se constitui fonte de renda, emprego e benefícios socioambientais em geral.

Nesse contexto, a presente obra traz uma temática atual e relevante para a área ambiental, servindo como um guia de boas práticas para o gerenciamento mais eficiente de gás metano em aterro sanitário e seu aproveitamento energético.

O Autor

Sumário

Introdução	8
Capítulo 1: A geração de gás metano em aterro sanitário.....	11
Produção de biogás em uma célula experimental de resíduos sólidos urbanos	12
Comentários importantes	18
Capítulo 2: O aproveitamento do gás metano de aterro sanitário	19
Modelos de primeira ordem	20
Instalações para o aproveitamento energético em aterros sanitários	23
Aplicação de um modelo para a geração de metano e aproveitamento energético no Aterro Sanitário Caieiras (SP).....	26
Capítulo 3: Os impactos das emissões fugitivas de gás metano em aterro sanitário.....	33
Capítulo 4: As técnicas, procedimentos e ensaios para medição do escape fugitivo de gás metano nos aterros sanitários.....	35
Ensaio com placa/câmara de fluxo	37
Capítulo 5: As emissões fugitivas de gás metano em diferentes aterros sanitários	45
Capítulo 6: Emissões fugitivas de gás metano no Aterro Sanitário Caieiras	49
Emissões fugitivas de metano, por meio do programa computacional CALMIM no Aterro Sanitário Caieiras	59
Conclusões e Considerações Finais	61
Posfácio	64
Referências.....	65
Sobre o autor	70

Introdução

A questão dos resíduos sólidos e de sua gestão não é um problema ambiental recente, porém, no Brasil, até no ano de 2010 não existia uma política nacional específica para este problema. Entretanto, com o sancionamento da Lei Federal n.º 12.305, de 2010, a Política Nacional de Resíduo Sólido, novas concepções foram determinadas em relação à gestão dos resíduos sólidos urbanos, destacando-se a ideia da valorização ambiental e energética e da priorização da recuperação e reaproveitamento (BARROS, 2013).

Na prática, entretanto, após 10 anos do sancionamento da Política Nacional de Resíduo Sólido, o cenário da gestão dos resíduos no Brasil avançou muito pouco e estes continuam sendo destinados de maneira inadequada (ABREU, 2014).

No Brasil, em 2018, estima-se que foram produzidos cerca de 80 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos e aproximadamente 40,5% destes continuam sendo encaminhados aos aterros controlados e lixões (ABRELPE, 2019).

Mesmo com a precariedade da situação dos resíduos sólidos no Brasil, nota-se, nos últimos anos, tentativas de se recuperar a energia dos resíduos, especialmente por meio da recuperação do biogás de aterro sanitário e reaproveitamento energético, a partir da queima do metano em motores de combustão interna (BARROS, 2012; BARROS et al., 2014; LEME et al., 2014; NADALETTI et al., 2015).

Nos aterros sanitários brasileiros, os resíduos sólidos depositados, majoritariamente composto por resíduos orgânicos (cerca de 50%), irão se biodegradar anaerobicamente, por ação de microrganismos e processos físico-químicos, produzindo lixiviados e biogás, que são respectivamente coletados e captados e encaminhados para tratamento adequado.

Os gases (biogás) produzidos no aterro sanitário são captados por meio de um sistema de tubulações, composto por uma rede de drenos verticais e horizontais. Estes drenam os gases até um sistema de tratamento, comumente *flares* (queimadores), que queimam (oxidam) o gás metano, amenizando as emissões de gases de efeito estufa (ABREU, 2014; BOSCOV, 2008).

O biogás produzido nos aterros sanitários é composto principalmente pelo gás metano (CH_4 : 55-60%) e o dióxido de carbono (CO_2 : 40-45%), ambos classificados como gases de efeito estufa (gases com elevada capacidade em absorver a radiação infravermelha refletida na superfície da Terra). Os aterros sanitários, em particular, tem sido uma das fontes de emissão de CH_4 , contribuindo para as mudanças climáticas, pois o metano tem um potencial de aquecimento global pelo menos 21 vezes maior do que o CO_2 (BARROS, 2013).

Os aterros sanitários brasileiros mesmo com o sistema de captação de biogás e o uso de uma camada de solo de cobertura dos resíduos, apresentam baixos índices de eficiência na captação de biogás, pois uma parcela significativa é perdida pela superfície do aterro - interface solo-atmosfera (CANDIANI e VIANA, 2017).

O sistema de cobertura normalmente com espessura de cerca de 50 cm é um mecanismo utilizado nos aterros sanitários para evitar ou minimizar o escape superficial de gás metano. Essa quantidade de metano perdida é denominada de emissão fugitiva, ou seja, uma parcela de gás que não é coletada pelo sistema de captação de biogás do aterro sanitário (CANDIANI e MOREIRA, 2015).

Esta camada de solo compactada forma uma barreira semipermeável. Porém, ao longo do tempo e em contato com as intempéries climáticas, esta camada de cobertura reduz a sua eficiência e, consequentemente, amplia a possibilidade de escape dos gases no aterro sanitário (MARIANO e JUCÁ, 2010).

A temática “Emissão Fugitiva de Metano em Aterro Sanitário” ainda não é muito estudada no Brasil e, portanto, o número de publicações não é grande, somente mais recentemente, tem surgido publicações com o tema, principalmente em decorrência de pesquisas realizadas nas universidades brasileiras. Na literatura internacional a temática é razoavelmente mais pesquisada, aumentando a quantidade de publicações, sobretudo nos periódicos.

Nesse contexto, esta obra sintetiza de certa forma um bom número de trabalhos realizados com o tema no âmbito brasileiro e internacional, destacando-se como uma contribuição importante no Brasil, por meio da apresentação de um estudo de caso realizado no Aterro Sanitário Caieiras, no estado de São Paulo. Também, são apresentadas outras experiências e estudos realizados em aterros sanitários em outros estados brasileiros, além de vários trabalhos internacionais relativos ao tema.

Os aterros sanitários emitem parcelas significativas de gás metano (produzido a partir da biodegradação dos resíduos no aterro sanitário), porém, sua maior parte é captada pelos drenos verticais (poços de gás instalados no aterro sanitário) e tratado adequadamente por meio de sua combustão em queimadores, chamados *flares*, instalados como parte integrante do sistema de captação do biogás no aterro sanitário.

Entretanto, uma parcela do gás metano escapa pela superfície do aterro sanitário para a atmosfera (emissão fugitiva), contribuindo para o aquecimento global e, consequentemente as mudanças climáticas, já que o metano é um importante gás de efeito estufa (GEE).

Mas, deve-se ressaltar, que a disposição de resíduos em aterros sanitários (deposição adequada do ponto de vista sanitário-ambiental) no Brasil, ainda representa cerca de 60% dos resíduos produzidos e uma parcela próxima de 40% é destinada para aterros controlados (condição que não contempla de forma adequada a proteção do meio ambiente) e lixões (vazadouros a céu aberto) – representando uma condição totalmente inadequada em termos de disposição de resíduos no solo. Nestes locais de disposição inadequada de resíduos, grandes quantidades de gás metano são emitidas para o meio ambiente e, quantificar estas emissões nesses ambientes, ainda é um grande desafio.

A emissão de gases de efeito estufa (GEE) para a atmosfera, como o gás metano (CH_4) é uma preocupação mundial. No Brasil, a Política Nacional de Resíduo Sólido (Lei n.º 12.305/2010), estabelece como

prioridade a valorização econômica e ambiental do gás metano, além de ter assumido metas para redução de gases de efeito estufa (43% até o ano 2030) junto à Organização das Nações Unidas (ONU).

Considerando-se que os aterros sanitários são grandes emissores de gases de efeito estufa, principalmente gás metano, o que representa além dos impactos ambientais negativos no meio ambiente, perdas econômicas devido à redução na captação e consequentemente não aproveitamento.

Esta obra apresenta um guia de boas práticas, objetivando-se aperfeiçoar o gerenciamento de gás metano em aterro sanitário.

Capítulo 1

A GERAÇÃO DE GAS METANO EM ATERRO SANITARIO

A produção de gás em aterro sanitário, é decorrente da biodegradação da matéria orgânica presente nos resíduos sólidos urbanos. O processo de biodegradação é anaeróbio, ou seja, a ação dos microrganismos se dá na ausência de oxigênio e este é subdividido em fase não metanogênica (sem produção de gás metano) e metanogênica (com geração de gás metano, CH_4) (LIMA, 2004).

O processo de biodegradação ocorre inicialmente pela etapa de hidrólise, reduzindo a matéria orgânica complexa a componentes menores solúveis, por ação enzimática dos microrganismos. Este complexo hidrolisado é composto por aminoácidos, ácidos graxos, compostos orgânicos simples e de baixo peso molecular e açúcares simples. Ocorre ainda a formação de ácidos orgânicos (CH_3COOH) predominantemente, amônia, água e produção de gases, como, H_2S e CO_2 . Os microrganismos nesta etapa são menos exigentes em termos nutricional e mais tolerantes, sendo estes facultativos ou estritamente anaeróbios (OONK, 2010).

No estágio metanogênico, os microrganismos atuantes, são as bactérias metanotróficas do gênero *Methanobacterium*. Estes microrganismos atuam em duas rotas metabólicas distintas, reduzindo o CO_2 por meio da adição de H_2 para formar CH_4 e H_2O e transformando os ácidos orgânicos (CH_3COOH) em CH_4 e CO_2 (MONTEIRO et al., 2006).

Os principais fatores ambientais que afetam a produção de CH_4 são: umidade, necessário e fundamental para a grande maioria dos microrganismos e processos metabólicos, pH (valores da ordem de 6,4 a 7,2, seria uma faixa ideal), carbonato de cálcio e amônia também influenciam o processo, o potencial de oxirredução interfere, a temperatura também é importante, e um valor da ordem de 55°C é considerado adequado, composições nutricionais também afetam o processo, sendo uma proporção ótima de C (carbono) para N (nitrogênio) de 16:1 (FARQUHAR e ROVERS, 1973; TCHOBANOGLIOUS et al., 1993).

De acordo com Farquhar e Rovers (1973), a produção de gás metano no aterro sanitário é representada por quatro fases distintas: fase I (aeróbica), fase II (anaeróbica não metanogênica), fase III (anaeróbica metanogênica instável) e fase IV (anaeróbica metanogênica estável).

Na fase I, os resíduos depositados no aterro, são biodegradados aerobiamente com o consumo do O_2 (oxigênio) e produção de CO_2 , após a redução e eliminação do O_2 , inicia-se a fase II (anaeróbica), ocorrendo grande produção de CO_2 , nesta fase ainda não ocorre a produção de CH_4 . Na fase III, a produção de CH_4 se inicia, mas é ainda pequena e instável. Durante a fase IV, as condições tornam-se ideais para a produção de CH_4 , e, portanto, esta produção aumenta bastante. Nesta etapa, a composição de gás no aterro é da ordem de 50 a 70% de CH_4 e de 30 a 50% de CO_2 . O padrão descrito é típico, entretanto, entende-se que a duração de

qualquer uma dessas fases e as quantidades relativas dos gases produzidos, irão variar conforme as condições ambientais e operacionais de cada aterro (TCHOBANOGLIOUS et al., 1993).

Produção de biogás em uma célula experimental de resíduos sólidos urbanos

A célula experimental de resíduos sólidos urbanos (Figura 1) foi construída no Aterro Sanitário Caieiras, localizado no município de Caieiras na Região Metropolitana de São Paulo. O acesso a este aterro, se dá pela Rodovia dos Bandeirantes, Km 33 (sentido interior).

As dimensões da célula experimental foram: 30 m de largura, 35 m de comprimento e 5 m de altura e na parte central dela, foi implantado um dreno vertical (poço de gás) para captar e medir o biogás produzido.

A célula experimental foi implantada, a partir da sua base, colocando-se uma camada de solo silte-argiloso compactada de 0,50 m, em seguida, foi instalado uma geomembrana de polietileno de alta densidade (PEAD) de 2 mm de espessura e um geotêxtil de proteção e uma camada drenante de rachão com o dreno vertical no centro da célula.

Foram depositados na célula experimental 3.786 toneladas de resíduos sólidos urbanos, oriundos da cidade de São Paulo (transportados por caminhões compactadores, sendo estes pesados na balança do aterro), perfazendo uma camada de resíduo de 4,5 m de altura. O preenchimento total da célula experimental com resíduo foi de 12 dias, após o encerramento da deposição dos resíduos, a célula experimental foi fechada, por meio da instalação de uma camada de solo silte-argiloso compactado com 0,50 m no topo da célula experimental.

A célula experimental foi monitorada por um período total de aproximadamente 1.095 dias (3 anos). Após, 730 dias (2 anos) de monitoramento, foi instalado na célula experimental uma camada de geomembrana de PEAD de 2 mm de espessura no topo (Figura 2), sendo esta implementada sobre a camada de solo existente na célula experimental.



Figura 1 – Célula experimental de resíduos implantada. Fonte: CANDIANI (2015).



Figura 2 – Célula experimental com a cobertura de geomembrana de PEAD.
Fonte: CANDIANI (2015).

O monitoramento da geração e composição do biogás na célula experimental foi realizado por meio de um analisador portátil de gás, GEM™2000 da LANDTEC (Figura 3).



Figura 3 – Analisador portátil de gás, GEM™2000 LANDTEC.

Fonte: <https://www.enviroequipment.com/product/landtec-gem-2000-landfill-gas-monitor-rental>

A Figura 4 mostra a geração/composição do biogás na célula experimental. Observa-se que a fase de latência na célula experimental pode ser caracterizada até 194 dias da deposição dos resíduos.

Ela inclui as fases de hidrólise, aeróbia e anaeróbia ácida não metanogênica, pois nestas fases não há geração de gás metano. Nota-se que ocorreram oscilações na produção de biogás ao longo do período analisado, aspecto provavelmente explicado pelas alterações das condições ambientais na célula experimental oriundas da própria ação dos microrganismos e variações dos parâmetros físico-químicos (temperatura, umidade etc.) provocados pelas condições climáticas distintas ao longo do período de observação. No início do monitoramento da célula experimental as condições climáticas devem ter influenciado o processo, pois foi um período bastante chuvoso.

Entre 194 e 350 dias, a célula experimental deveria estar na fase anaeróbia metanogênica não estabilizada. Após 350 dias até cerca de 560 dias de observação, a geração metanogênica é intensa e estável (Figura 4). É possível caracterizar as cinco etapas do processo de biodegradação dos resíduos sólidos urbanos (RSU): hidrólise, aeróbia, anaeróbia ácida não metanogênica, anaeróbia metanogênica não estabilizada e anaeróbia metanogênica estabilizada.

A partir da Figura 4 vê-se que o teor de metano era pequeno e foi gradativamente aumentando, tornando-se mais estável após 320 dias e permanece desta maneira até cerca de 560 dias de observação.

Em relação ao teor de dióxido de carbono a curva de produção praticamente foi similar à curva de produção de metano, destacando-se que após 60 dias ocorreu um pico de produção de dióxido de carbono, em seguida a produção caiu e voltou a subir de maneira significativa após 250 dias, mantendo-se mais estável a produção a partir deste período e se manteve até o momento analisado.

Analisando a Figura 4 é possível observar que a fase de hidrólise e a aeróbia na célula experimental apresentaram uma duração de aproximadamente de 56 dias. Após esse período, nota-se o início da fase anaeróbia acidogênica com significativa redução de oxigênio (19,9 para 1,2%) e aumento significativo de dióxido de carbono (2,9 para 56%).

Essa fase permaneceu por até aproximadamente 80 dias. A fase anaeróbia metanogênica instável inicia-se após esse período, permanecendo até cerca de 250 dias. Nota-se que quando o teor de oxigênio ficou abaixo de 5% a produção de metano aumentou, representando o fim da fase aeróbia e início da fase anaeróbia.

Após 280 dias de monitoramento, foi possível verificar que a concentração de metano aumentou de maneira significativa (26 para 42%) e que após 360 dias de monitoramento o teor de metano continua aumentando, atingindo valor de 57%, aspecto que caracteriza a fase anaeróbia metanogênica estável.

Após 600 dias de monitoramento na célula experimental o teor de metano está diminuindo. O monitoramento dos gases produzidos na célula experimental possibilitou caracterizar as distintas fases de biodegradação dos resíduos, como foi descrito pela análise das Figuras 4 e 5.

O início do monitoramento na célula experimental foi marcado por um período bastante úmido, condição que favoreceu a percolação de água, fato que pode ter contribuído para elevar o teor de oxigênio nos primeiros meses de monitoramento.

A Tabela 1 resume as várias fases identificadas do processo de biodegradação de geração de metano na célula experimental.

De acordo com Tchobanoglous et al. (1993) todas as etapas juntas da produção de biogás em aterro sanitário podem demorar mais de 40 anos e cada fase apresenta um tempo de duração específico.

O tempo de duração das duas fases iniciais (aeróbia e transição) juntas demora de 30 a 180 dias, a fase ácida demora de 180 a 1080 dias e a fase (metanogênica) demora de 3 a 40 anos (TCHOBANOGLIOUS et al., 1993).

A fase metanogênica caracteriza-se pela ação dos microorganismos metanogênicos (bactérias do gênero *Methanobacterium*), que atuam na redução dos gases (H_2 e CO_2) formando metano (CH_4) e água (H_2O) e transformam ácido acético (CH_3COOH) em metano e dióxido de carbono (CO_2).

Na fase metanogênica existe a produção de 0 a 45% de metano (CH_4), porém essa geração é muito instável. A fase metanogênica estável é caracterizada pela produção de metano na proporção de 50 a 70% e

de CO₂ na proporção de 30 a 50% (FARQUHAR; ROVERS e 1973; SILVA e CAMPOS, 2008, TEIXEIRA et al., 2009, OONK, 2010).

Monteiro et al. (2006) salientam que a produção mais significativa de metano, em uma célula experimental no Aterro da Muribeca-PE, ocorreu após 300 dias de monitoramento. A presença de umidade em excesso reduz drasticamente a produção e a qualidade do biogás no aterro sanitário (SILVA e CAMPOS, 2008).

Entretanto, o fator umidade associado à temperatura adequada, pode favorecer o processo de biodegradação dos resíduos, antecipando a produção de metano. Na literatura são apresentados poucos trabalhos brasileiros relacionados à biodegradação de resíduos sólidos em aterros sanitários. Isto dificulta estabelecer comparações relacionadas às fases do processo de biodegradação.

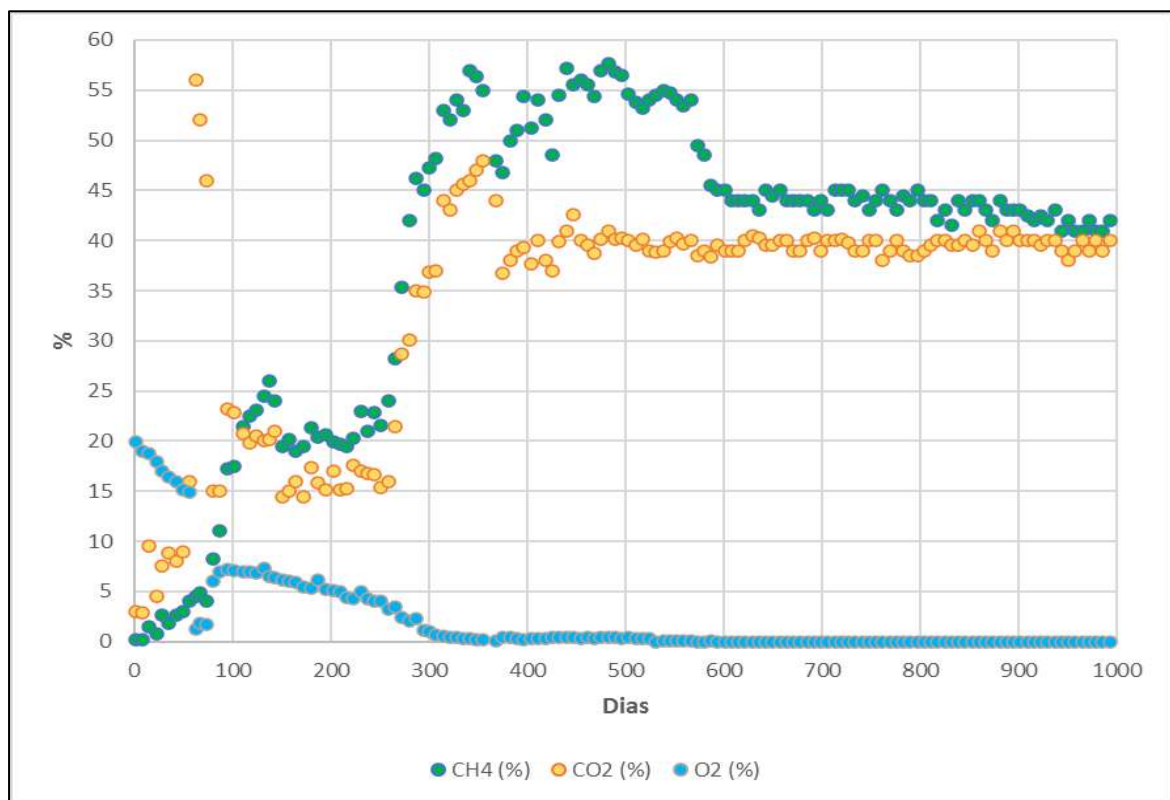


Figura 4 – Composição do biogás produzido na célula experimental. Fonte: CANDIANI (2015).

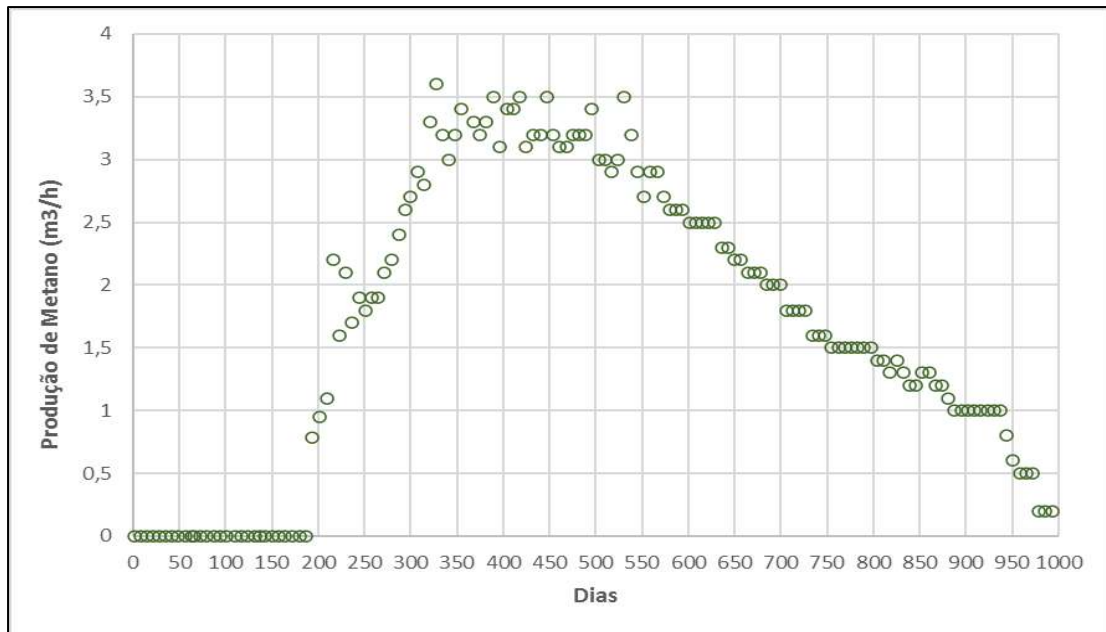


Figura 5 – Produção de gás metano na célula experimental. Fonte: CANDIANI (2015).

Tabela 1 – Fases do processo de biodegradação e geração de metano na célula experimental.

Fase	Intervalo de tempo (dias)	Características
I - Aeróbia (ajuste inicial)	0 a 50	presença de oxigênio (20%) - fase relativamente curta.
II - Anaeróbia (transição)	50 - 100	presença de CO ₂ - produção significativa de CO ₂ (57%), redução no teor de O ₂ (0%), início da produção mais efetiva de CH ₄ .
III - Ácida	100 - 200	presença de água (hidrólise) - caracterizada pela transformação dos compostos complexos, aumento na produção de CH ₄ .
IV - Metanogênica	200 - 550	produção significativa de CH ₄ , concentração de CH ₄ estável por um período longo em patamares da ordem de 50 a 60%, etapa mais longa do processo.
IV - Maturação (uma melhor definição desta etapa depende da continuação do monitoramento na célula experimental)	550 - 1.000	a geração de biogás neste período começa a declinar, esta etapa consiste na etapa final do processo de biodegradação dos RSU.

Fonte: CANDIANI (2011).

Comentários importantes

Na célula experimental, foi possível caracterizar as seguintes fases do processo de biodegradação: fase aeróbia, fase anaeróbia não metanogênica e fase metanogênica. Uma melhor caracterização destas etapas dependerá do acompanhamento do processo por um período mais longo.

De maneira geral a composição dos gases (metano, dióxido de carbono e oxigênio) na célula experimental apresentou oscilações, provavelmente devido às condições climáticas com consequentes alterações ambientais.

Com a célula experimental foi possível entender melhor o comportamento do processo de biodegradação de resíduos em aterro sanitário. O acompanhamento dos teores de metano, dióxido de carbono e oxigênio contribuiu para identificar as diferentes fases do processo de biodegradação.

Com os resultados obtidos (1.000 dias de monitoramento), pode-se dizer que a célula experimental se encontra na fase metanogênica. A produção de metano já atingiu o pico, sendo possível notar uma queda acentuada no momento. Uma melhor definição dependerá das futuras observações. Verifica-se também que após 350 dias o teor de oxigênio no biogás é muito baixo ou desprezível.

As maiores dificuldades encontradas no monitoramento na célula experimental foram: controlar a influência do ar atmosférico nas medições com os equipamentos utilizados, prever efetivamente o efeito do excesso de líquidos no interior da célula experimental e gerenciar a qualidade do biogás em função das variações climáticas, principalmente nos períodos chuvosos. Entretanto, o monitoramento do biogás na célula experimental permitiu melhorar a compreensão dos processos de biodegradação de resíduos e geração de metano em um aterro sanitário.

Capítulo 2

O APROVEITAMENTO DO GAS METANO DE ATERRO SANITARIO

O processo de biodegradação temporal dos resíduos sólidos urbanos por microrganismos metanogênicos, é descrito por vários modelos matemáticos. A complexidade destes modelos é grande se for considerado que nem todo o metano produzido em um aterro sanitário é emitido e/ou captado, pois parcelas são oxidadas ou aprisionadas no maciço sanitário.

Deve-se ainda estimar as perdas de metano, associadas às emissões fugitivas pela camada de solo da cobertura na superfície do aterro e ainda a eficiência do sistema de captação de gás do aterro, formado pelos drenos verticais (poços de gás) e sistema operacional, que pode ser passivo ou ativo, com o uso de motores elétricos para fazer a sucção dos gases (BOSCOV, 2008).

Nesse contexto, os modelos temporais de geração de biogás em aterros sanitários e de emissão de gases do aterro para a atmosfera normalmente seguem uma premissa fundamental: estimam o volume de gás gerado em um determinado tempo considerando o percentual de matéria orgânica presente inicialmente em uma massa de resíduo e um fator de conversão da massa de resíduo em volume de gás (BOSCOV, 2008; PINÁS et al., 2016; SANTOS, ROMANEL e VAN ELK, 2017).

Normalmente os modelos apresentam uma função resposta de geração de metano devido à deposição de uma massa de resíduo. Esses modelos são categorizados de ordem zero, primeira ordem, segunda ordem ou multifásicos.

Existem vários *softwares* para previsão da geração de biogás em um aterro sanitário, sendo possível mencionar (BARROS, 2013).

- Biogás, geração e uso energético – aterros, versão 1.0 (CETESB, 2006);
- E-PLUS – Gás de aterro, versão 1.0 (USEPA, 1998);
- INPCC – National Greenhouse Gas Inventories Programme do Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática (IPCC, 2006);
- LandGEM, versão 3.02 da Agência Ambiental Americana (USEPA, 1998);
- Modelo Scholl Canyon do Banco Mundial (BANCO MUNDIAL, 2003).

Modelos de primeira ordem

Os modelos de primeira ordem são aqueles que consideram que a taxa de variação da massa de resíduo devido à biodegradação seja proporcional à massa de resíduo depositada e segue um decaimento exponencial (USEPA, 1998; BOSCOV, 2008; CANDIANI e MOREIRA, 2015). Os modelos de primeira ordem representados são muito utilizados para dimensionamento do potencial de geração de biogás em aterros sanitários. Nos modelos de primeira ordem a função resposta é dado pela Equação 1

$$R(0, t) = L k e^{-kt} \quad (\text{Equação 1})$$

onde: L é o potencial de geração de biogás do resíduo sólido urbano - RSU [$\text{mol CH}_4/\text{t RSU}$] e k é a constante de biodegradação do RSU (ano^{-1}).

Os modelos da USEPA (1998), BANCO MUNDIAL (2003) e IPCC (2006) são os modelos de primeira ordem mais conhecidos e relacionam massa de resíduo que entra anualmente no aterro sanitário, tempo de atividade do aterro, tempo após seu fechamento, potencial de geração de metano e taxa de geração de metano.

O modelo da USEPA para estimativa de emissões de gás metano de aterros sanitários é dado por (Equação 2)

$$R(t) = L R_M (e^{-kc} - e^{-kt}) \quad (\text{Equação 2})$$

onde: $R(t)$ = taxa de geração de metano no tempo t (Nm^3/ano), L = potencial de geração de metano ($\text{Nm}^3/\text{t RSU}$), R_M = taxa de deposição de RSU durante a vida útil do aterro ($\text{t RSU}/\text{ano}$), k = constante de biodegradação que gera metano (ano^{-1}), c = tempo desde o fechamento (ano), t = tempo desde o início do aterramento (ano).

O modelo de estimativa de emissões de gás metano de aterros sanitários do Banco Mundial (2003) - Modelo Scholl Canyon - é expresso por (Equação 3)

$$R(t) = M R(0, t) \quad (\text{Equação 3})$$

onde: $R(0, t)$ é dada pela Equação 1 e M é a massa depositada inicialmente. O outro parâmetro já foi definido anteriormente.

Os valores típicos para k segundo este modelo variam de $0,02 \text{ ano}^{-1}$ para aterros com baixo teor de umidade a $0,7 \text{ ano}^{-1}$ para aterros com alto teor de umidade. Valores típicos para L variam de 125 a $310 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4/\text{t RSU}$ de acordo com este modelo (MACHADO et al., 2008).

Alguns modelos consideram várias categorias de resíduos com diferentes constantes de biodegradação k_g , onde g identifica a categoria. Alguns modelos consideram duas categorias distintas, isto é, biodegradação rápida e lenta (USEPA, 1998). Outros modelos apresentam 4 categorias ou mais. Nestes casos, a taxa de geração de metano é dada por (Equação 4)

$$R(t) = M L \times \sum_g (f_g k_g e^{-k_g t}) \quad (\text{Equação 4})$$

onde f_g = fração mássica da categoria g e M = massa em tonelada depositada inicialmente em tonelada.

O modelo do IPCC (2006) é similar aos anteriores, mas apresenta também um modelo para estimar o potencial de geração de metano, de oxidação e escape fugitivo para a atmosfera. Neste modelo também se utiliza de uma equação cinética de decaimento de primeira ordem. Também são considerados os seguintes parâmetros: condição climática (médias anuais de temperatura e precipitação), quantidade de resíduo, composição do resíduo, além de outros parâmetros estimados.

A taxa de geração de metano, $R(t)$, e o potencial de geração de metano, L , são dados por (Equações 5, 6 e 7)

$$R(t) = k L M e^{-k(x-t)}, \quad (\text{Equação 5})$$

$$L = FCM_t \text{ COD}_t \text{ COD}_f F \frac{16}{12}, \quad (\text{Equação 6})$$

$$\text{COD}_t = 0,17 A + 0,26 B + 0,45 C + 0,47 D + 0,07 E, \quad (\text{Equação 7})$$

onde: x = anos considerados no inventário, t = ano do inventário, FCM_t = fator de correção de metano no ano x (adimensional – aterros sanitários é igual a 1), COD_t = fração de carbono orgânico degradável no ano x , COD_f = fração do carbono orgânico degradável assimilado, F = fração de metano no biogás, $\frac{16}{12}$ = conversão de carbono a metano, A = fração de papel/papelão, B = fração de tecido/têxtil, C = fração de alimentos, D = fração de madeira e jardinagem e E = fração de couro.

Os modelos de primeira ordem incluem o efeito da idade sobre a geração de metano e assume-se que a formação do biogás de aterro a partir de um determinado montante de resíduos decaia exponencialmente com o passar do tempo. Outros fatores, como as fases de biodegradação, principalmente a metanogênica, e a dependência da temperatura também são incorporados nos modelos. Estes modelos são os mais utilizados e de fato várias pesquisas laboratoriais e de campo atuais, apontam que estes modelos representam bem o comportamento da geração de metano em aterros sanitários quando os parâmetros cinéticos são precisos. Segundo a ABRELPE, esses são os modelos mais indicados para se fazer uma boa previsão da geração de metano em um aterro sanitário (ABRELPE, 2012).

Os modelos cinéticos mais comuns são os de 1.^a ordem que descrevem o processo de geração de metano a partir de 2 parâmetros cinéticos, L e k conforme apresentado na Equação 5. Esses parâmetros dependem do tipo de resíduo que é depositado, teores de resíduo orgânico, temperatura, umidade, acidez e outras variáveis. A grande maioria dos projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) nos aterros sanitários brasileiros, que realiza a captação de metano para queima ou para geração de energia elétrica utiliza um modelo cinético de 1.^a ordem, recomendado pelas metodologias disponíveis em instituições como IPCC (2006), BANCO MUNDIAL (2003) e USEPA (1998), apresentados anteriormente.

Em relação ao L , potencial de geração de metano, valores sugeridos por estas instituições variam de 4.285 a 7.586 mol/t RSU (96 a 170 Nm³/t RSU). A constante de biodegradação, k , é o parâmetro que controla o tempo de biodegradação dos resíduos e, consequentemente, a taxa de produção de metano em um modelo. Os valores sugeridos por estas instituições variam de 0,02 a 0,7 ano⁻¹, entretanto é possível encontrar na literatura modelos sugerindo valores para k de 0,01 a 0,2 ano⁻¹.

É necessário conhecer bem estes valores, principalmente em função das condições de coleta/deposição de RSUs e climáticas locais para se ter maior certeza quanto ao retorno econômico de possíveis empreendimentos. Experimentos laboratoriais ou em células experimentais de aterros, como o da Figura 1, permitem obter esses parâmetros com maior precisão para cada aterro (USEPA, 1998; MACHADO et al., 2008; SILVA, 2010; SILVA, FREITAS e CANDIANI, 2013; CANDIANI e MOREIRA, 2015).

Uma boa previsão da geração de metano no aterro sanitário é de fundamental importância, principalmente em termos econômicos, pois a venda da energia elétrica garante a continuidade de um projeto. Estudos de 2014 apontam a necessidade de se comercializar a energia no patamar de 200,00 a 250,00 R\$/MWh para se viabilizar o aproveitamento energético do metano de aterro no Brasil (ABREU, 2014).

Instalações para o aproveitamento energético em aterros sanitários

Os gases fluem do maciço sanitário até os drenos verticais (poços de gás), por onde sobem à superfície e podem ter dois destinos. Podem ser queimados em queimadores (*flares*) evitando-se a emissão de gás metano para a atmosfera ou podem ser extraídos e direcionados para tratamento ou aproveitamento energético (CANDIANI e MOREIRA, 2015; ABREU, 2014).

A Figura 6 apresenta dois tipos de drenos verticais: (A) drenos com extração passiva (o biogás é extraído de forma natural sem uso de exaustores) e (B) drenos de extração forçada (o biogás é extraído por meio de exaustores – motores elétricos) para aproveitamento energético.

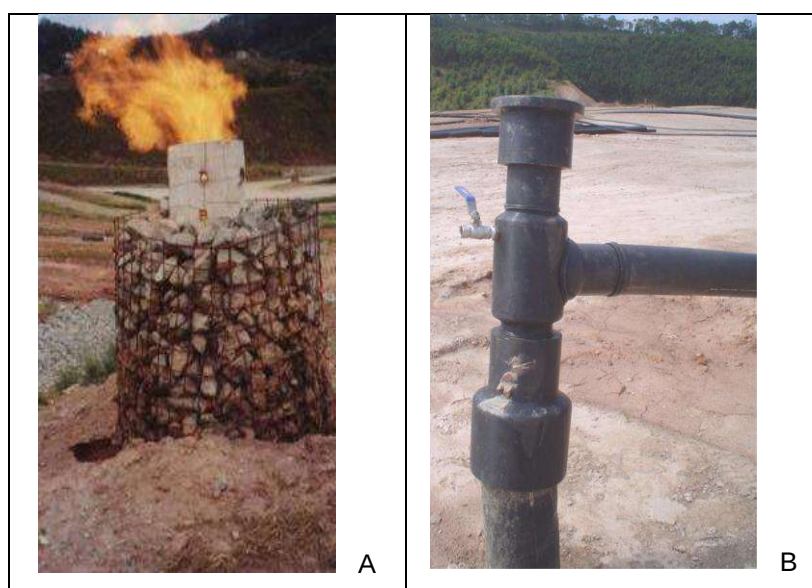


Figura 6 – Dois tipos de dreno vertical de extração de biogás em aterro sanitário.

(A) Dreno de extração passiva para queima do biogás em aterro sanitário (sistema passivo).

(B) Dreno de extração forçada adaptado para encaminhamento do biogás para aproveitamento energético (sistema ativo).

Fonte: Acervo pessoal do autor.

O aproveitamento energético de biogás de aterro sanitário depende fundamentalmente de um sistema de captação de biogás (Figura 7), que normalmente é composto pelos seguintes sistemas: drenos verticais de captação de gás (Figura 6), tubulações adaptadas (cabeçotes) aos drenos verticais formando uma rede de drenos, sistema de sucção com instalação de motores elétricos – exaustores (Figura 8), filtros para remoção de condensado (Figura 9), *flare* para queima do excesso de biogás e motores (motogeradores) para geração de energia elétrica (Figuras 10 e 11).



Figura 7 – Sistema de captação de biogás no Aterro Sanitário Caieiras (SP).
Fonte: Acervo pessoal do autor.



Figura 8 – Exautores para sucção do biogás. Unidade de captação de biogás no Aterro Sanitário Caieiras (SP). Fonte: Acervo pessoal do autor.



Figura 9 – Filtros para remoção de condensado. Unidade de captação de biogás no Aterro Sanitário Caieiras (SP). Fonte: Acervo pessoal do autor.



Figura 10 – Motogeradores a biogás para geração de energia elétrica no Aterro Sanitário Caieiras (SP). Fonte: Acervo pessoal do autor.



Figura 11 – Motogeradores a biogás para geração de energia elétrica no Aterro Sanitário Salvador (BA). Fonte: Acervo pessoal do autor.

O biogás de aterros sanitários é queimado em motores a combustão interna (ciclo Otto) na grande maioria dos projetos existentes no Brasil. Esses motores apresentam custos relativamente baixos comparado com sistemas de geração por turbinas, por exemplo, apresentam elevada eficiência (25 a 35%) e se adequam bem ao biogás gerado em aterros sanitários.

Os motores utilizados em aterros sanitários têm potência nominal variando entre 0,5 a 1,5 MW. Normalmente as instalações têm um número variado de motores ao longo da vida do aterro porque a taxa de geração de metano varia com a quantidade de RSU depositada no aterro e com a idade deste (ABRELPE, 2012).

Aplicação de um modelo para a geração de metano e aproveitamento energético no Aterro Sanitário Caieiras (SP)

O Aterro Sanitário Caieiras localiza-se no município de Caieiras no estado de São Paulo, Brasil. O município de Caieiras se situa na Região Metropolitana de São Paulo, tem uma área de 95,89 km² e população de 86.623 habitantes.

Está inserido em uma região de clima regional do tipo Cwa - temperado úmido com verões chuvosos e invernos secos, conforme a classificação de Köppen.

O relevo acentuado influencia fortemente o clima na região. A região encontra-se no Planalto Atlântico, mais precisamente na Zona Serrana de São Roque, o solo é siltoso e as altitudes variam de 1.100 m (topos e encostas) e 750 m nos fundos de vale (CANDIANI e VIANA, 2017).

A Tabela 2 apresenta dados técnicos sobre o Aterro Sanitário Caieiras e a Figura 12 mostra o conjunto de motogeradores com uma potência instalada de aproximadamente 29,5 MW.

Tabela 2 – Dados técnicos sobre o Aterro Sanitário Caieiras
(CANDIANI e MOREIRA, 2015).

Item	Informação
Empreendimento	Aterro Sanitário Caieiras
Proprietário	Solvi
Endereço	Caieiras (SP) Rodovia dos Bandeirantes, km 33.
Coordenadas	23°21'51"S; 46°44'26"W
Empresa operadora	Essencis
Início de operação do aterro sanitário	2002
Vida útil estimada	30 anos (2002 a 2032)
Espessura de resíduos de projeto	90 m
Área para o aterro sanitário	2.000.000 m ²
Quantidade diária de resíduo depositado no aterro sanitário	7.000 t/dia
Quantidade de resíduo depositado de 2002 a 2014	26.000.000 t
Geração de lixiviado	1.700 m ³ /dia
Destino do lixiviado	SABESP (Barueri)
Índice pluviométrico	1.450 mm/ano
Número de drenos verticais	140
Produção de metano	7.000 m ³ /h
Aproveitamento energético (aproximado)	Termelétrica (Termoverde Caieiras): 29,5 MW

Fonte: Acervo pessoal do autor.



Figura 12 – Conjunto de motogeradores elétricos da termelétrica no Aterro Sanitário Caieiras (SP).
Fonte: Acervo pessoal do autor.

Para estimar a taxa de geração de metano no Aterro Sanitário Caieiras foi adotado o modelo IPCC (2006) adaptado à realidade brasileira, com a adoção de parâmetros obtidos em células experimentais de aterros sanitários brasileiros (CANDIANI e MOREIRA, 2015). Utilizando-se as Equações 5 a 7 e valores de L de $70 \text{ Nm}^3/\text{t RSU}$ (MACHADO et al., 2008) e k de $0,18 \text{ ano}^{-1}$ (CANDIANI e MOREIRA, 2015). A estimativa de potência máxima gerada no aterro sanitário foi calculada utilizando (CETESB, 2006; BARROS, 2013) (Equação 8).

$$P = \eta \frac{\text{PCI}}{860.000} \varepsilon_c Q \quad (\text{MW}) \quad (\text{Equação 8})$$

onde: P = potência disponível (MW), Q = vazão de metano ($\text{Nm}^3 \text{ h}^{-1}$), ε_c = eficiência de captação de metano (50%), η = eficiência do motor: 0,35, fator de conversão: $1 \text{ kcal/h} = (1/860.000) \text{ MW}$ e $\text{PCI} = 8.500 \text{ kcal/Nm}^3 \text{ CH}_4$ (BARROS, 2012).

A Figura 13 apresenta a taxa de geração de metano anual estimada para o Aterro Sanitário Caieiras (SP) ao longo dos próximos anos a partir da expectativa de deposição de RSU ao longo dos anos e utilizando o modelo do IPCC com os parâmetros cinéticos apresentados acima.

O aterro iniciou sua operação no ano de 2002 e espera descontinuar o recebimento de RSU em 2033. Observa-se que à medida que a quantidade de RSU aumenta cresce a taxa de geração de metano e em 2015 já se nota uma redução no crescimento da taxa de geração de metano. Isto ocorre porque o resíduo antigo já apresenta taxas de produção de metano decrescentes e contribui cada vez menos para a geração total de metano. Por volta de 2030 espera-se atingir a maior taxa de geração de metano.

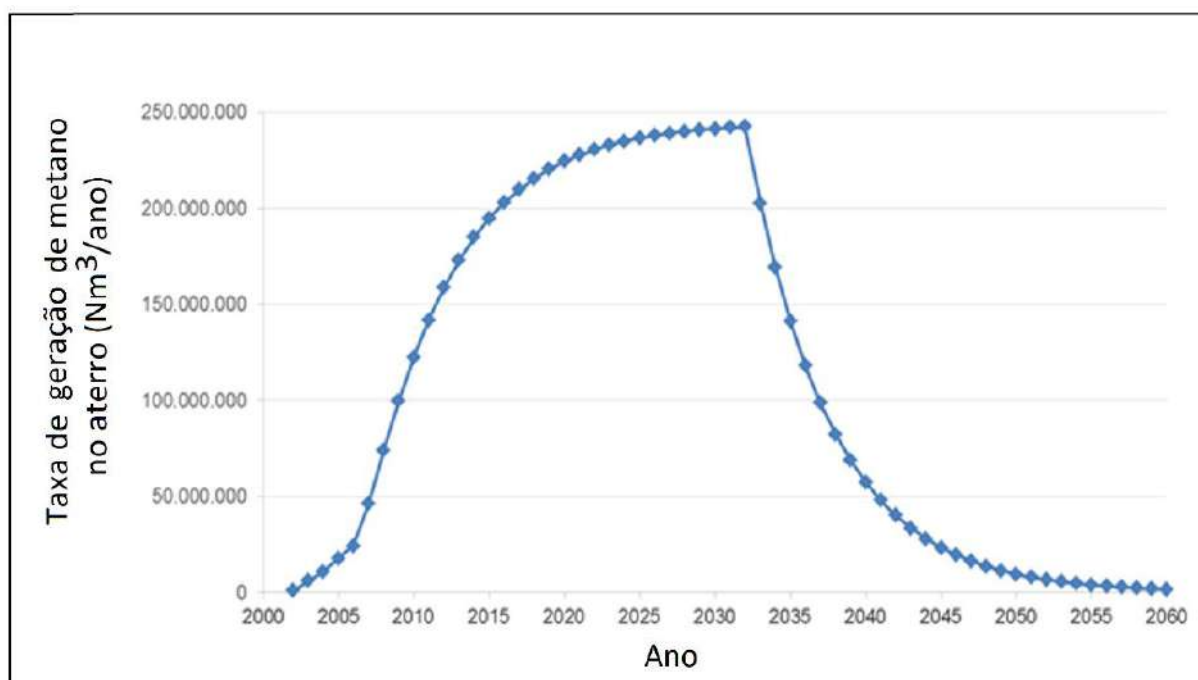


Figura 13 – Estimativa da taxa de geração de metano no Aterro Sanitário Caieiras.

A potência máxima disponível para geração de potência foi estimada utilizando a Equação 8. A taxa de geração de metano anual foi convertida em taxa de geração por hora.

A potência (Figura 14) efetivamente a ser gerada depende da motorização da instalação, isto é, da quantidade de geradores instalados para aproveitar a taxa de metano disponível. Atualmente a planta opera com capacidade abaixo do máximo teórico devido a acertos econômicos e requisitos de despacho de potência.

O metano não aproveitado para a geração de eletricidade é queimado em queimadores para reduzir o impacto quanto a emissão de gases do efeito estufa, uma vez que o potencial de aquecimento global do CH_4 é mais que 21 vezes maior que o do CO_2 .

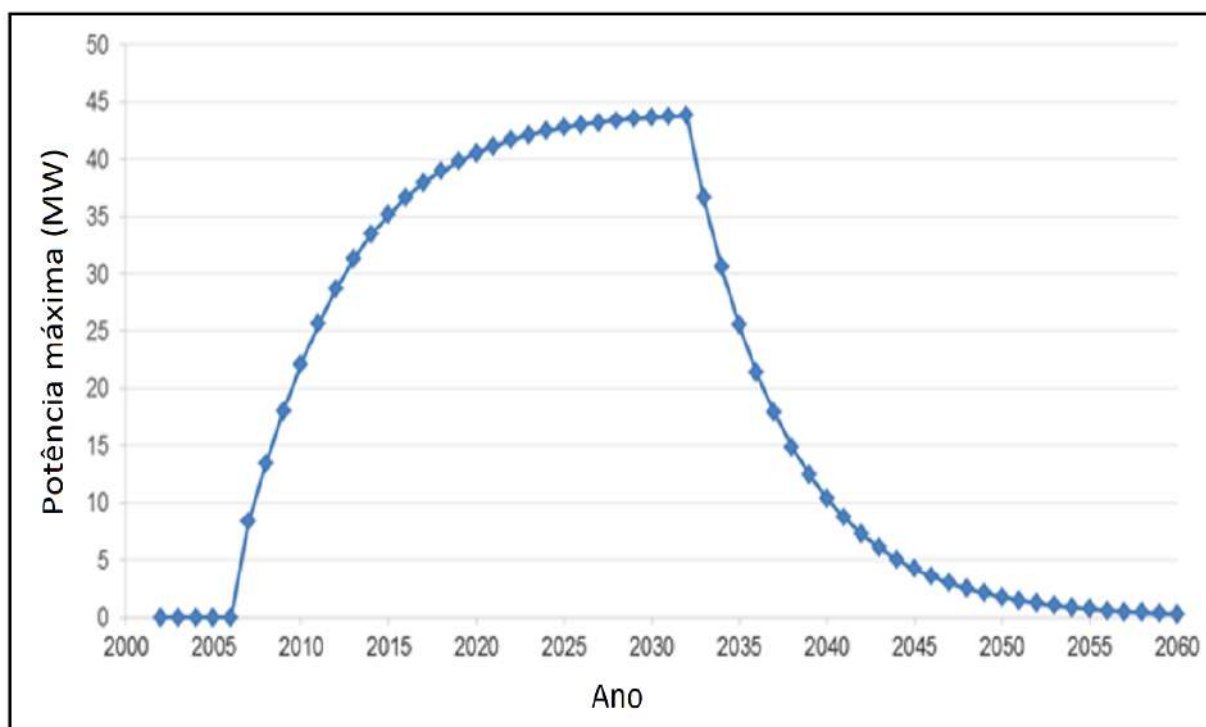


Figura 14 – Potência máxima disponível estimada para o Aterro Sanitário Caieiras ao longo dos anos. O aproveitamento desta potência disponível depende da motorização realizada no aterro ao longo dos anos.

Quando encerrar o recebimento de RSU em Caieiras a taxa de geração de metano irá reduzir exponencialmente com o passar dos anos. O número de motogeradores operacionais no aterro busca seguir a curva apresentada na Figura 14, devendo aumentar até por volta de 2030 e depois começar a reduzir com a desativação de motogeradores à medida que o potencial energético do aterro vai decaindo.

No Brasil existem 21 aterros sanitários (ANEEL, 2020) realizando o aproveitamento energético do biogás, gerando cerca de 174,3 MW (Tabela 3). No estado de São Paulo, se todo o resíduo disposto em aterros fosse aproveitado para a geração de energia elétrica (por meio da queima do biogás em motores), estima-se que a potência instalada atingiria 495 MW (ANEEL, 2018). Entretanto, somente 7 aterros sanitários no estado contemplam instalações de geração, produzindo cerca de 74 MW. Os principais projetos são: Aterro Caieiras, Essencis (29,5 MW), Aterro São João, cidade de São Paulo (21,5 MW), Aterro Guataparã, Estre (5,7 MW), Aterro Bandeirantes, município de São Paulo (4,6 MW), Aterro Santana de Parnaíba, Tecipar (5,7 MW), Aterro Tremembé (4,3 MW) e Aterro Cabreúva (2,7 MW). Os aterros sanitários, portanto, possibilitam a instalação de unidades de geração de eletricidade de pequeno porte.

Tabela 3 – Usinas de geração de energia elétrica, a partir de biogás de aterro sanitário em operação no Brasil (ANEEL, 2020).

Usina	Potência (MW)	Empresa Proprietária	UF
Asja BH	1,4	Consortio Horizonte Asja	MG
Asja Jabotão	14,3	Asja Serviços Ambientais LTDA.	PE
Asja Sabará	7,1	Asja Sabará Serviços AS.	MG
Bandeirantes	4,6	Biogás Energia Ambiental SA.	SP
Biotérmica Recreio	12,7	Biotérmica Energia SA.	RS
Usinaverde	0,44	Usinaverde SA.	RJ
CTR Juiz de Fora	4,3	Valorgas - Energia e Biogás	MG
Curitiba Energia	8,5	Curitiba energia LTDA.	PR
Fátima do Sul	2,55	Eco Business Resíduos LTDA.	MS
Guataparã	5,7	Guataparã Energia SA.	SP
Itajaí Biogás	1,1	Itajaí Biogás e Energia SA.	SC
Nova Iguaçu	16,9	Nova Iguaçu Energia e Gás	RJ
Novagerar	4,0	Novagerar Eco-energia LTDA.	RJ
Salvador	19,7	Termoverde Salvador SA.	BA
São João Biogás	21,5	São João Energia SA.	SP
Tecipar	5,7	Tecipar Engenharia LTDA.	SP
Termoverde Caieiras	29,5	Termoverde Caieiras LTDA.	SP
Tremembé	4,3	Tremembé Energia LTDA.	SP
Uberlândia	4,3	Energas Energia LTDA.	MG
Usitrar Manaus	3,0	Eco Business Serviços LTDA.	AM
Usitrar Cabreúva	2,7	Eco Business Resíduos LTDA.	SP
Total	174,3 MW	-	-

Fonte: ANEEL. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/siga>. Acesso em: 08/08/2020.

O aproveitamento do metano para a geração de energia elétrica apresenta efeitos benéficos do ponto de vista ambiental e econômico. A combustão do metano (CH_4) produz calor, água e CO_2 . Do ponto de vista ambiental, a combustão do metano para gerar energia reduz a emissão de gases do efeito estufa devido ao potencial de aquecimento global do metano ser cerca de 21 vezes mais elevado que o do CO_2 (IPEA, 2012). Embora emita CO_2 , a queima do metano no processo de geração de energia é sustentável do ponto de vista de gases do efeito estufa, pois reduz substancialmente as emissões de CO_2 -equivalente para a atmosfera.

Do ponto de vista econômico, o aproveitamento de energia em um aterro sanitário pode, adicionalmente, gerar recursos devido à comercialização da energia elétrica e de créditos de carbono por evitar a emissão de gases do efeito estufa. A emissão para a atmosfera de metano em aterros sanitários sem aproveitamento de energia ocorre por meio de drenos de exaustão passivos (não forçada) e a partir da interface aterro sanitário com a atmosfera e são normalmente denominadas de emissões fugitivas. Nem todo o

metano produzido no aterro escapa para a atmosfera devido ao processo de oxidação do metano mediado por microrganismos existentes na terra utilizada como cobertura e proteção dos aterros. A maximização do processo de oxidação de metano na cobertura dos aterros sanitários também reduz as emissões fugitivas de metano para a atmosfera que pode ser contabilizada e proporcionar créditos de carbono quando regulamentado (BOSCOV, 2008).

Capítulo 3

OS IMPACTOS DAS EMISSIONES FUGITIVAS DE GAS METANO EM ATERRO SANITARIO

As mudancas climáticas referem-se as variações no estado do clima de uma região ou do planeta como um todo, sendo possível identificá-las como alterações no valor médio do clima ou variações de seus elementos, como por exemplo, precipitação, temperatura, vento etc., persistindo por um período relativamente longo, normalmente várias décadas. Desde à sua formação, a Terra sofreu muitas mudancas em seu clima por causa da variabilidade natural do sistema climático, tais variações cíclicas em sua maioria, alteram a radiação no sistema climático, causando mudancas na temperatura do planeta. Entretanto, essas mudancas na maioria dos casos ocorrem na escala de milhares de anos, ou seja, muito lentas para serem percebidas durante a vida dos seres humanos. As mudancas climáticas que vem sendo observadas nas últimas décadas, são mais intensas e rápidas, por isso se dá como certo o fato de que as atividades humanas são as principais responsáveis pelas mudancas climáticas, ditas antropogênicas (CAPAZ e NOGUEIRA, 2014).

Em 2007, o IPCC - Painel Intergovernamental sobre Mudancas Climáticas, divulgou o seu 4º Relatório, enfatizando-se os assuntos relativos às mudancas climáticas e ao aquecimento global. O IPCC é um órgão intergovernamental criado em 1988 pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e pela Organização Meteorológica Mundial (OMM). As discussões das suas consequências, rapidamente foram ampliadas e a responsabilidade humana no aquecimento global se fez ainda mais presente. O termo mudancas climáticas tem um significado mais amplo, envolvendo todos os fenômenos naturais que estão sendo afetados pelo processo de mudança do clima, enquanto o termo aquecimento global refere-se mais especificamente ao aumento médio da temperatura na superfície do planeta (IPCC, 2006).

Dados do IPCC (2006) corroboram com a hipótese do aquecimento global e da responsabilidade humana nas mudancas climáticas. Entre os argumentos do IPCC (2006) a favor da hipótese de que estaria ocorrendo um aquecimento global pode-se citar, principalmente, a de que entre os anos de 1995 e 2006 registraram-se 11 dos 12 anos mais quentes desde 1850 e que no século XX a temperatura média da atmosfera aumentou aproximadamente 0,7°C.

Com relação à responsabilidade humana, podem ser destacadas as seguintes informações dos relatórios do IPCC (2006): há grande correlação entre as curvas de aumento da concentração de gases de efeito estufa e as curvas de aumento médio da temperatura do planeta; e a curva de aquecimento médio global dos últimos 150 anos, quando comparada com a curva que utiliza um modelo que associa fenômenos naturais à ação humana, tem encontrado uma correlação muito maior do que quando comparada com aquelas que

utilizam modelos que consideram somente fenômenos naturais ou apenas a ação humana (CAPAZ e NOGUEIRA, 2014).

O quarto Relatório do IPCC, conclui que as emissões de gases de efeito estufa antropogênicos (gases emitidos de atividades industriais, agrícolas, aterros sanitários e centros urbanos, tais como, o dióxido de carbono, metano, óxido nitroso etc.) afetam o clima da Terra e continuarão a fazê-lo de modo cada vez mais acentuado.

Desde a revolução industrial até os dias de hoje, a concentração dos gases de efeito estufa (GEE) tem aumentado notavelmente na atmosfera. Por exemplo, a concentração de CO₂ aumentou em mais de 35%, enquanto a concentração de metano (CH₄), aumentou mais de 2,5 vezes. O uso de combustíveis fósseis, mudanças no uso da terra, queimadas, as práticas agrícolas e pecuárias, aterros sanitários e as atividades humanas urbanas em geral, são os principais responsáveis pelo aumento da concentração de GEE na atmosfera, acentuando o efeito estufa e o aquecimento global (CAPAZ e NOGUEIRA, 2014).

Os aterros sanitários são grandes emissores de gases de efeito estufa, principalmente em termos de CO₂ e CH₄. O metano é considerado um gás 21 vezes mais potente do que o CO₂, em termos de contribuição para o efeito estufa e o metano está cada vez mais presente na atmosfera.

De acordo com Borba et al. (2018), a emissão do CH₄ no setor dos resíduos equivale a 18% das emissões antropogênicas de CH₄ em todo o mundo. A estimativa é que sejam emitidas de 35 a 69 toneladas de CH₄ para a atmosfera por meio dos aterros sanitários.

Por isso, controlar as emissões fugitivas de metano nos aterros sanitários é de fundamental importância. A gestão adequada dos resíduos sólidos e a geração de energia elétrica por meio do gás metano gerado nos aterros sanitários, é uma prática ambiental adequada, produzindo energia de uma fonte renovável, o biogás, além disso, permite reduzir a fuga de gases de efeito estufa para a atmosfera, diminuindo os efeitos relacionados ao aquecimento global e mudanças climáticas.

Aliás, os efeitos destes fenômenos que já tem sido estudados no Brasil e no mundo, estão cada vez mais presentes nos dias atuais, na forma de extremos climáticos que afetam as populações, as cidades, com graves perdas de vidas humanas, atingem as atividades econômicas, as produções agrícolas, efeitos a saúde pública e ao meio ambiente e impactos graves aos ecossistemas e a biodiversidade em geral.

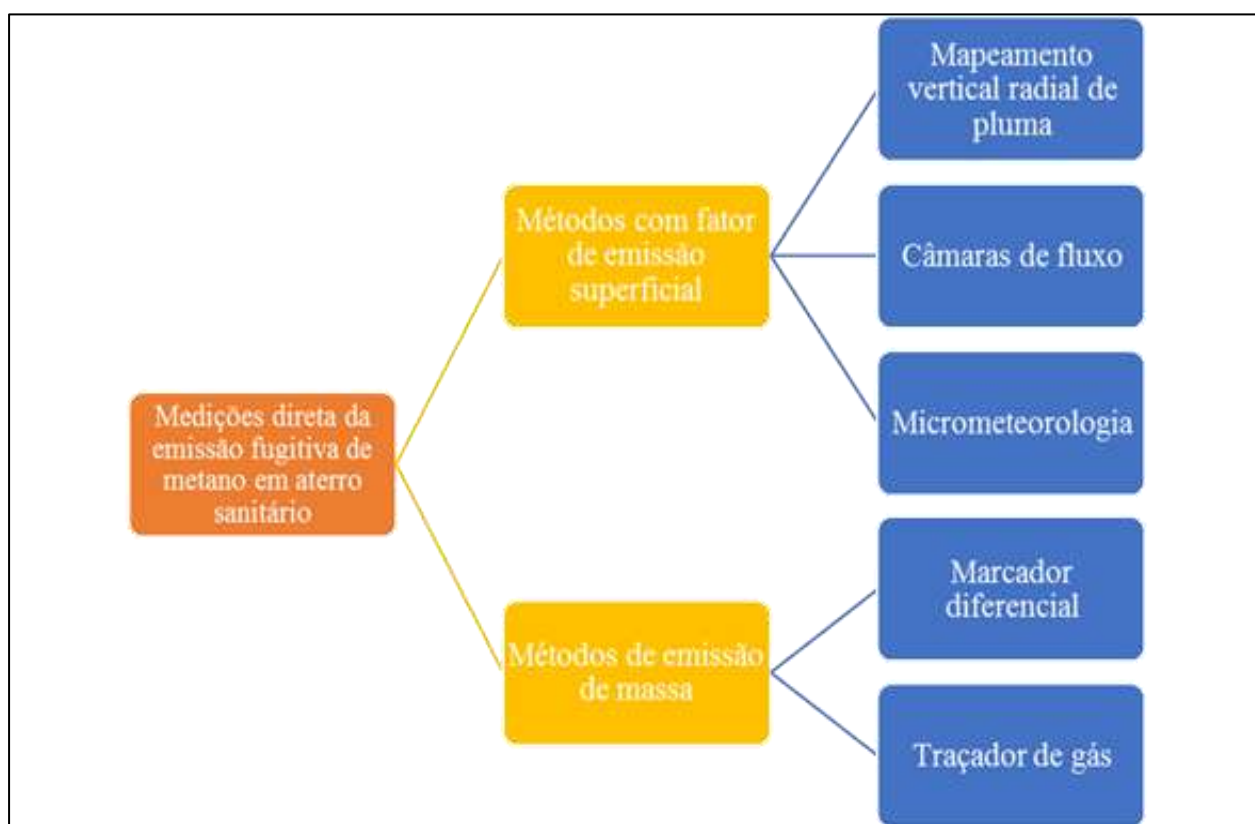
As mudanças climáticas podem ter consequências graves, como, aumento das secas graves e prolongadas, derretimento generalizado da neve e gelo e elevação do nível global médio do mar, inundação de áreas agrícolas, regiões costeiras, contaminação por água salgada de aquíferos costeiros de água doce, extremos de calor, ondas de calor, eventos de forte precipitação, intensidade de ciclones tropicais, redução de áreas agrícolas, ameaças a biodiversidade e a saúde pública, com proliferação de doenças.

Capítulo 4

AS TÉCNICAS, PROCEDIMENTOS E ENSAIOS PARA MEDIÇÃO DO ESCAPE FUGITIVO DE GÁS METANO NOS ATERROS SANITÁRIOS

A literatura aponta a existência de várias técnicas para se determinar as emissões fugitivas de metano em aterro sanitário (SPOKAS et al., 2003; SPOKAS et al., 2006; BABILOTTE et al., 2010; MARIANO e JUCÁ, 2010; MACIEL e JUCÁ, 2011; CAPACCIONI et al., 2011; ABICHOU et al., 2011; SCHEUTZ et al., 2011; SCHROTH et al., 2012; BATTAGLINI et al., 2013; SAURI-RIANCHO et al., 2013; SILVA et al., 2013; AUDIBERT; FERNANDES, 2009; GOLDSMITH JR. et al., 2012; DI BELLA et al., 2011; DI TRAPANI et al., 2013; SCHEUTZ et al., 2008; SCHEUTZ et al., 2014; MONSTER et al., 2014; GALLEGU et al., 2014).

Os principais métodos diretos de medições das emissões fugitivas de metano em aterro sanitário são (Figura 15): métodos com fator de emissão superficial: mapeamento vertical radial de pluma, câmaras de fluxo (placa de fluxo) e micrometeorologia e métodos de emissão de massa: marcador diferencial e traçador de gás.



.Figura 15 – Principais métodos diretos de medições das emissões fugitivas de metano em aterro sanitário
Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Entretanto, existem também métodos indiretos de medições das emissões fugitivas de metano em aterro sanitário, através de programas computacionais que podem utilizar modelos matemáticos e/ou parâmetros climáticos para realizar inventários de metano em aterro sanitário (SPOKAS et al., 2011; SPOKAS e BOGNER, 2011; BOGNER et al., 2011).

Um programa computacional consolidado na literatura é o Calmim (Figura 16) Versão 5.4 – *California Landfill Methane Inventory Model* (Modelo de Inventário de Metano em Aterro), muito utilizado nos Estados Unidos pelo Departamento de Agricultura (USDA).



Figura 16 – Programa Computacional CALMIM.

<https://www.ars.usda.gov/research/software/download/?softwareid=300>

O programa computacional Calmim - Modelo de Inventário de Metano em Aterro, estima a emissão fugitiva de metano em aterro sanitário, considerando o transporte unidimensional e a oxidação, calculando as emissões de metano anuais em aterros sanitários, com base nos seguintes aspectos: área de superfície do aterro sanitário, a porcentagem e as propriedades das diferentes tipologias de cobertura no aterro sanitário (camada de solo siltoso, camada de solo argiloso, camada com cobertura vegetação - gramíneas etc.), a porcentagem relacionada à área do aterro sanitário com sistema de captação do gás metano e a oxidação sazonal de metano para cada tipo de cobertura, considerando os fatores climáticos.

O Calmim é um modelo de cálculo validado pelo IPCC - Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas para as emissões de metano em aterros sanitários. O programa calcula as emissões fugitivas diárias de metano, sendo esta medida dada em gramas de metano por dia e em uma determinada área no aterro sanitário ($\text{g CH}_4/\text{m}^2/\text{dia}$).

As emissões diárias são somadas ao longo do ano, os cálculos são efetuados considerando as condições climáticas, que são automaticamente acessadas com base na localização geográfica do aterro sanitário e as propriedades físicas e químicas dos materiais de cobertura. Por meio do programa Calmim, é possível fazer simulações para se estimar as emissões fugitivas de metano. O sistema de cálculo é baseado em uma série de caixas de entrada. Ao contrário de outros modelos de inventário de emissões de metano em aterro sanitário, o Calmim não depende de uma equação cinética de primeira ordem com base na quantidade anual e composição dos resíduos sólidos depositados no aterro sanitário.

Com isto, o programa CALMIM apresenta avanços científicos para se estimar com maior precisão as emissões de metano em aterro sanitário, pelas seguintes razões: existe elevada incerteza dos modelos teóricos cinéticos de primeira ordem, assumindo que os resíduos são homogêneos e as taxas de biodegradação são hipotéticas em ambientes heterogêneos como os aterros sanitários, é bastante complexo caracterizar a geração de metano em aterros sanitários específicos, com características peculiares, como: sistemas operacionais, eficiências na recuperação de biogás, taxas de oxidação, etc e a necessidade de se utilizar uma metodologia que possa ser validada diretamente em campo, para se estimar as emissões de metano nos aterros sanitários.

Ensaio com placa/câmara de fluxo

Uma das técnicas mais utilizadas em campo para se quantificar a emissão fugitiva de metano em aterro sanitário é o ensaio da placa (câmara) de fluxo (Figura 17). É um método clássico e consagrado na literatura internacional, pois é um ensaio simples, direto, de baixo custo e eficiente para medições pontuais (SPOKAS et al., 2006; SCHEUTZ et al., 2008; NETO, 2009; SCHEUTZ et al., 2009; ABICHOU et al., 2011; MARIANO E JUCÁ, 2010; MACIEL e JUCÁ, 2011; GOLDSMITH JR. et al., 2012; SCHEUTZ et al., 2014). A única desvantagem desse método, é a necessidade de se fazer várias medições para determinar com menor grau de incerteza, as emissões fugitivas de gás metano em um aterro sanitário.

Segundo MARIANO e JUCÁ (2010) a utilização das placas de fluxo apresenta inúmeras vantagens, tais como: método mais preciso para a determinação de fluxos pontuais de metano, não é necessário mão de obra especializada, possibilidade de determinar as características e parâmetros do solo de cobertura no local

do ensaio, permite a realização da avaliação simultânea de diversos gases e possibilita fazer a análise da influência da idade do resíduo, das condições atmosféricas e das pressões do gás no contato solo-resíduo.



Figura 17 – Principais tipos de placas de fluxo para medir o escape fugitivo de metano em aterro sanitário. Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Como mencionado anteriormente, existem outras técnicas para quantificação da emissão fugitiva de metano em aterro sanitário, porém muitas destas utilizadas internacionalmente não se encontram disponíveis no Brasil, como por exemplo, as técnicas relacionadas ao uso de infravermelho e, portanto são metodologias que demandam elevados recursos financeiros, equipamentos e tecnologias específicas para realização de ensaios. Entre estas técnicas é possível citar as seguintes mais importantes.

- Mapeamento de pluma radial (MPR) – é um método baseado na instrumentação utilizando sensores ópticos remotos, que medem a concentração de gases no aterro sanitário, é uma técnica utilizada pela Agência Americana de Proteção Ambiental - EPA (BABILONTE et al., 2010; GOLDSMITH, JR. et al., 2012; MONSTER et al., 2014);
- Método de medição de pluma (técnica de traçadores de gases) – esta técnica consiste em medir as concentrações simultâneas de metano e direção do vento no aterro sanitário, utilizando como parâmetro um traçador de gás inerte, como o N_2O (óxido nitroso), com estas informações pode-se

determinar por meio de modelagem numérica matemática de dispersão, os fluxos de metano emitidos pelo aterro sanitário (BABILOTTE et al., 2010; SCHEUTZ et al., 2011; MONSTER et al., 2014);

- Técnica da absorção diferencial – é uma técnica de monitoramento utilizando sensores remotos, baseados na aplicação de *laser* que permite fazer as medições de concentrações de metano com grandes alcances. Para esta técnica é necessário o uso de veículos (caminhões) com equipamentos de apoio (BABILOTTE et al., 2010);
- Modelagem inversa – esta técnica utiliza um veículo adaptado com equipamentos para realizar os monitoramentos no aterro sanitário, baseando as análises em espectrometria de absorção. Um *software* de modelagem faz uma análise de modelagem inversa de acordo com as concentrações de metano georreferenciados (BABILOTTE et al., 2010);
- Espectroscopia por helicóptero – a técnica consiste em utilizar um helicóptero equipado, com um equipamento industrial para detectar remotamente a *laser* as concentrações de metano no aterro sanitário (BABILOTTE et al., 2010);
- Termografia – a técnica se baseia em medições de temperatura na interface aterro-atmosfera. A inspeção termográfica (Figura 18) é baseada na captura de imagens relativas à distribuição das temperaturas na superfície do aterro sanitário, fornecendo indicações sobre os caminhos preferenciais de escape do metano no aterro sanitário (BATTAGLINI et al., 2013).

A Tabela 4 apresenta um resumo geral dos principais métodos e técnicas para determinar o escape fugitivo de metano em aterro sanitário.

Tabela 4 – Síntese dos métodos para determinar as emissões fugitivas de metano em aterros sanitários.

Métodos	Vantagens	Desvantagens
Perfil vertical de concentração de gás metano no solo (gradiente subsuperficial) Medição de gás metano em um ponto único, determinando-se um perfil de gradiente de concentração e pressão com a profundidade na camada de cobertura de solo do aterro.	Determina a direção de um fluxo de difusão e convecção de gás metano no aterro.	As medições sofrem grande variabilidade espacial e não é um método bom para medir grandes áreas.

Câmaras/placas de fluxo de superfície fechada (estática) Medição de gás metano em um ponto único, usando uma câmara/placa de fluxo, colocada na superfície do solo no aterro, as medições são feitas com base na concentração do metano dentro da placa, considerando-se um tempo determinado.	Bom para medir as concentrações de metano, combinando-se perfis de concentração e oxidação de metano. Técnica simples, conseguindo medir concentrações baixas. É o método mais frequentemente usado em aterros.	As medições dependem de equipamentos e instrumentos de análise. Sofre bastante influência das condições ambientais locais, podendo subestimar as emissões. Exige grande número de ensaios.
Câmaras/placas de fluxo de superfície aberta (dinâmica) Medição de gás metano em um ponto único, usando uma câmara/placa de fluxo, colocada na superfície do solo no aterro, as medições são feitas com base na diferença de concentração entre a entrada e saída de gás metano da câmara/placa.	Bom para medir as concentrações de metano, combinando-se perfis de concentração e oxidação de metano. Técnica simples, sendo bastante usado em aterro sanitário.	As medições dependem de equipamentos e instrumentos de análise. Sofre bastante influência das condições ambientais locais, podendo subestimar as emissões. E ainda não permite quantificar fluxos muito baixos ou negativos de metano, devido a diluição de gás na câmara/placa.
Método de Covariância de Vórtices Turbulentos ou “Eddy Covariance” (EC) (técnicas micrometeorológicas) Medições de fluxos turbulentos de gás metano, entre a superfície do solo no aterro e a atmosfera.	Apresenta uma medida integrada dos fluxos de gases no ambiente, se adequa bem as mudanças das condições atmosféricas.	As medições dependem das condições climáticas e precisam ser feitas mediante as medidas da velocidade e direção do vento, a topografia do terreno dificulta as medições. É necessário o uso de instrumentos de alta precisão e rapidez de medição. Não é usado frequentemente em aterro.

Balanco de massa estacionario As concentracoes de metano sao medidas em diferentes alturas acima da superficie do aterro, combinando-se calculos do fluxo horizontal de metano e medicoes das condicoes atmosfericas.	Apresenta uma medida integrada dos fluxos de gases no ambiente, se adequa bem as mudancas das condicoes atmosfericas.	As medicoes dependem das condicoes climaticas e precisam ser feitas mediante as medidas da velocidade e direcao do vento, a topografia do terreno dificulta as medicoes. E necessario o uso de instrumentos de alta precisao. Raramente e usado em aterro sanitario.
Mapeamento de pluma radial As medicoes sao feitas por meio da aplicacao de <i>laser</i> e medicao de vento, calculando-se pluma de concentracao de metano.	Apresenta uma medida integrada entre vento e a emissao de metano. E um metodo bastante usado nos EUA pela EPA.	As medicoes necessitam de ventos relativamente estaveis, sendo necessario o uso de instrumentos de medicao a <i>laser</i> e multiplas medicoes no aterro.
Balanco de massa usando medicoes aereas As concentracoes de metano sao medidas, por meio de uma pluma de metano, a favor do vento no aterro, combinando-se simultaneamente a medicao das condicoes atmosfericas e o calculo do fluxo horizontal de metano no aterro.	Apresenta uma emissao integrada do aterro inteiro, atendendo grandes areas.	Requer dados meteorologicos precisos e uma aeronave com instrumentacao de alta precisao. A tecnica encontra-se em estagio de desenvolvimento e aperfeicoamento.
Dispersao estacionaria de gas usando um marcador (pluma de dispersao) Medicao simultanea de metano atmosferico e um gas traçador (SF_6 ou N_2O) em um ou mais pontos fixos a favor do vento. O gas traçador e lançado a uma taxa conhecida e o fluxo da emissao de metano, pode	Apresenta uma medicao integrada de fluxos no aterro inteiro. Não depende das condicoes da atmosfera. Tem sido usado nos aterros sanitarios.	O metodo esta sendo substituido. Os traçadores utilizados sao potentes gases de efeito estufa. A topografia do terreno dificulta as medicoes.

ser determinada pela razão dos fluxos.		
Dispersão dinâmica de gás usando um traçador Medições de metano e um gás traçador, usando-se a razão da concentração conhecida do gás traçador e a taxa de emissão de metano. Utiliza-se um veículo em movimento contra o vento.	Apresenta uma medição integrada de fluxos no aterro inteiro. Não depende das condições da atmosfera. Tem sido usado nos aterros sanitários.	Requer o uso de uma estrada a uma distância adequada e a favor do vento no aterro. A EPA (EUA) está aprimorando os instrumentos de medição da técnica.
Absorção diferencial Um <i>laser</i> é lançado na atmosfera, sendo este usado para o metano no aterro, via absorção, combinando-se concentração e medidas de velocidade e direção do vento.	Pode fornecer a emissão de metano em grandes áreas.	A configuração analítica é robusta, complexa e cara, dependendo de medições do vento e modelagem atmosférica.
Modelagem inversa - estacionária Medições contínuas da concentração de metano em um ou mais pontos, a favor do vento, combinando-se medições de direção e velocidade do vento.	Pode fornecer a emissão de metano em grandes áreas. Capaz de monitorar longas séries temporais de dados.	Necessita de bons dados e condições atmosféricas, as medições são bem sensíveis as variações do ambiente. O método está em desenvolvimento, sendo necessário comprovar sua precisão nas medições em aterro.
Modelagem inversa - dinâmica Medição da pluma de metano a favor do vento, combinando-se com boa precisão nas medições das condições atmosféricas e taxas de emissão no aterro.	As medições são rápidas e fornecem estimativas das emissões para todo o aterro.	A instrumentação deve ser de boa precisão e de rápida medição. Não é uma abordagem amplamente usada.
Modelagem inversa - aérea Medição da pluma de metano, a favor do vento, combinando-se uma	As medições são rápidas e fornecem estimativas das emissões para todo o aterro.	A instrumentação deve ser rápida e precisa e instalada em uma aeronave. Tem sido usado pelos

boa precisão na medição das condições atmosféricas e da taxa de emissão no aterro.		aterros nos EUA.
--	--	------------------

Fonte: Adaptado de Monster et al. (2014).

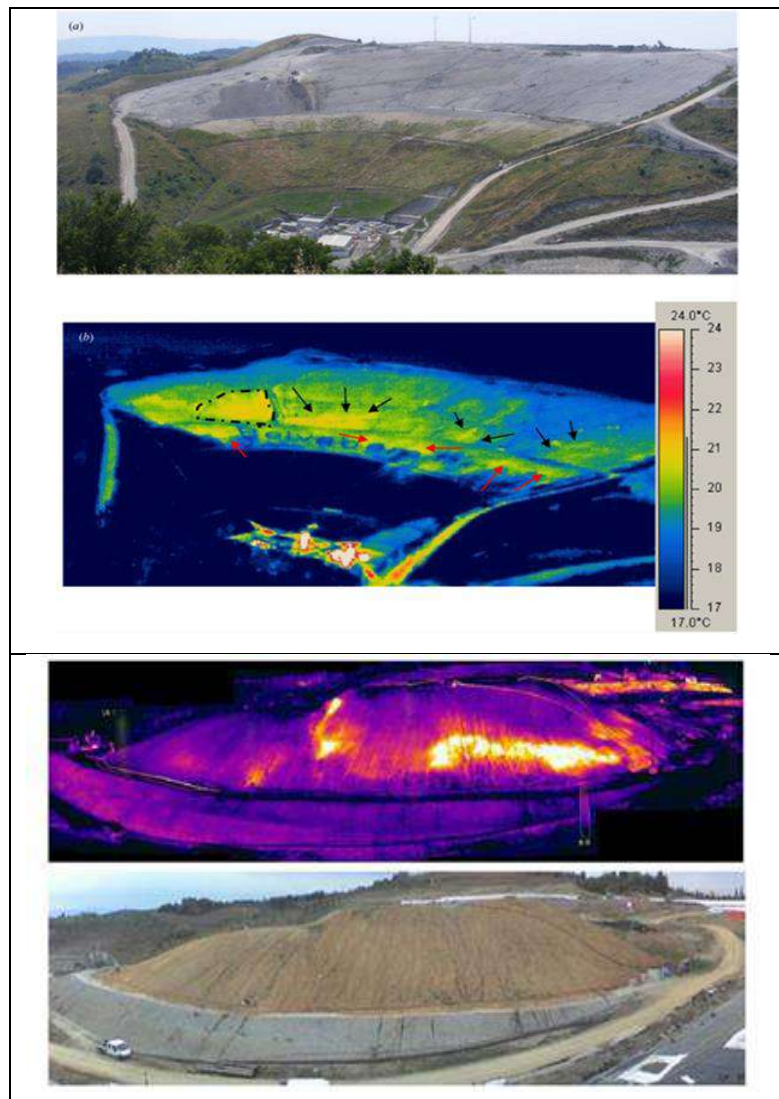


Figura 18 – Estudos termográficos em aterro sanitário.

Fonte: BATTAGLINI et al. (2013).

Considerando as dificuldades em relação à disponibilidade de técnicas de monitoramento do escape fugitivo de metano em aterro sanitário, além dos elevados custos para a realização de ensaios mais complexos, sugere-se aos aterros sanitários brasileiros realizarem as medições das emissões fugitivas de gás metano, por meio do método de placa/câmara de fluxo e de modo complementar também utilizar o programa computacional CALMIM, simulando os valores das emissões de metano, já que é um *software* de acesso livre,

desta maneira, é possível fazer uma comparação dos valores obtidos com uma técnica de campo e um modelo matemático de simulação.

Capítulo 5

AS EMISSÕES FUGITIVAS DE GÁS METANO EM DIFERENTES ATERROS SANITÁRIOS

Estudos sobre emissão fugitiva de metano em aterro sanitário mostram a existência de grandes variações (BABILOTTE et al., 2010; GOLDSMITH JR. et al., 2012). Babilotte et al. (2010) estudaram a emissão fugitiva de gás metano em um aterro sanitário na França, as medições em campo ocorreram entre os dias 22 a 31 de outubro de 2007. No estudo foram utilizados cinco métodos distintos de medição: técnica de gás traçador, mapeamento de pluma radial a laser, técnica de modelagem inversa, detecção diferencial de luz por absorção e alcance e espectroscopia de helicóptero. Neste estudo, os valores de emissão de metano foram da ordem de 0,5 a 2,3 g CH₄/s. Scheutz et al. (2011) encontraram valores da emissão de metano da ordem de 32,6 kg CH₄/h no Aterro de Fakse na Dinamarca. Spokas et al. (2003) pesquisaram a distribuição espacial das emissões de metano no Aterro de Bordeaux na França. O fluxo de metano variou de 2,58 a 298,6 kg CH₄/dia. Quanto a distribuição espacial da emissão de metano no aterro, a Figura 19 mostra os resultados dos fluxos.

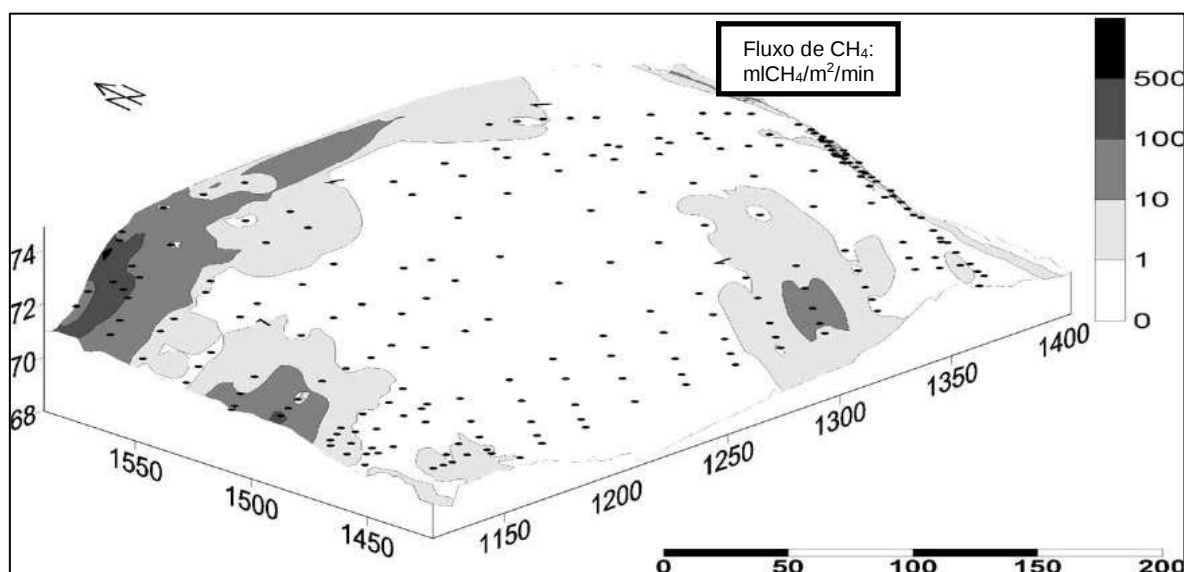


Figura 19 - Distribuição espacial dos resultados de fluxo de metano no aterro.
Fonte: Spokas et al. (2003).

Abichou et al. (2011) obtiveram valores da emissão de metano na ordem de 0,1 a 596 g CH₄/m²/dia em onze aterros nos EUA, utilizando uma placa de fluxo como técnica de medição. Capaccioni et al. (2011) encontraram no Aterro Fano na Itália, um valor de 2.483 g CH₄/m²/dia. Maciel e Jucá (2011) estudando a emissão fugitiva de metano em uma célula de resíduos, no Aterro da Muribeca na Região Metropolitana de

Recife, obtiveram valores variando de 0 a 984,7 g CH₄/m²/dia. Mariano (2008) apresenta 12 estudos sobre medição das emissões de CH₄ em aterros de resíduos sólidos por meio de placa de fluxo, onde as taxas de emissões variam de 0 a 401 g/m²/dia.

Em um estudo realizado no Aterro da Seropédica no Rio de Janeiro, foram encontrados valores de emissão de metano da ordem de 574,6 g/m²/dia (BORBA et al., 2018). Moreira et al. (2020) estudaram a emissão de metano no Aterro de Campina Grande na Paraíba e encontraram valores na ordem de 0,09 a 2,85 g CH₄/m²/dia.

Candiani e Viana (2017) encontraram valores de emissão de metano no Aterro Caieiras, SP, valores de 18,6 a 149,8 g/m²/dia. Goldsmith Jr. et al. (2012) estudaram as emissões de metano em 20 aterros nos EUA e encontraram valores que variaram de 32 a 207 g CH₄/m²/dia. Damasceno (2018) estudou as emissões fugitivas de metano no Aterro Sanitário Metropolitano Centro, localizado na Região Metropolitana de Salvador na Bahia, e encontrou valores da ordem de 0 a 355,55 g/m²/dia.

Mariano e Jucá (2010) estudaram as emissões de metano no aterro de Aguazinha, que se situa no Município de Olinda, Zona Norte da Região Metropolitana do Recife no Pernambuco, encontrando-se valores na ordem de 0 a 400 g/m²/dia. Maciel (2009) apresenta 23 estudos de emissões de CH₄, nos quais essas taxas variam de 102 a 1.332 g/m²/dia. Di Trapani et al. (2013) estudando o Aterro de Palermo na Itália, encontraram valores de emissão de metano na faixa de 0,09 a 1.118 g/m²/dia.

Scheutz et al. (2014) estudaram as emissões fugitivas de metano no Aterro de Klintholm localizado em Svendborg um município na costa leste da ilha de Fuen na Dinamarca. Neste estudo, os autores encontraram valores da ordem de 446 g CH₄/m²/dia. Sauri-Riancho et al. (2010) estudaram a emissão de metano no Aterro de Mérida no México e obtiveram valores na ordem de 0 a 6,004 g CH₄/m²/dia.

A ampla faixa de variação do fluxo de CH₄ indica que existem vários fatores que interferem na emissão dos gases pela camada de cobertura, que vão desde as características geotécnicas do solo (tipo, grau de compactação e de saturação), qualidade e espessura da camada de cobertura, pressões de gases no contato solo-resíduo, idade dos resíduos, condições climáticas da região, entre outros (MARIANO, 2008). Esses valores indicaram que as emissões de gases pela camada de cobertura representaram 22% do total das emissões de CH₄ do aterro. Portanto, as emissões fugitivas influenciam de maneira significativa, a eficiência de captação de gás em aterro sanitário.

Os sistemas mais eficientes são capazes de captar cerca de 75% do biogás gerado em um aterro sanitário, entretanto, na maioria dos casos a eficiência está entre 40 e 60% (PARK e SHIN, 2001; SPOKAS et al., 2006; SCHEUTZ et al., 2009; MONSTER et al., 2014).

Estudos realizados em aterros sanitários no Brasil referente ao escape fugitivo de metano mostram que este representa valores de 16 a 35% do total de metano coletado pelo sistema de captação de biogás

(MARIANO e JUCÁ, 2010; MACIEL e JUCÁ, 2011; SILVA et al., 2013; CANDIANI e MOREIRA, 2018), aspecto que reduz a eficiência de captação de biogás nos aterros sanitários brasileiros.

A Tabela 5 apresenta alguns estudos realizados no Brasil com a emissão fugitiva de metano em aterro sanitário, por meio da placa de fluxo.

Ressalta-se, que as placas de fluxo utilizadas nas distintas pesquisas, diferem entre si, em termos de forma (cilíndrica ou retangular), dimensões (diferentes medidas, mas predominando a seguinte dimensão: 40 x 40 x 5 cm) e volumes (também distintos, predominando o volume de 8 l). Também existem diferenças significativas em termos de área de estudo (m²), que variaram de 1.625 a 1.300.000 m². E ainda diferenças no número de pontos de amostragem, variando de 3 a 480 pontos e número de ensaios por ponto, variando de 1 a 14 ensaios por ponto. Em relação a quantidade de ensaios, para se obter uma boa amostragem das emissões de metano em aterro sanitário, pode-se utilizar em áreas com mais de 5.000 m², as seguintes Equações 9 e 10 (DAMASCENO, 2018).

$$n^{\circ} = 6 + 0,15 \cdot \sqrt{A} \quad (\text{Equação 9})$$

$$e = \sqrt{\frac{A}{n^{\circ}}} \quad (\text{Equação 10})$$

onde: n° é o número de pontos de medição em campo, e é o espaçamento médio entre os pontos (m) e A é a área total pesquisada (m²).

E para locais com área igual ou menor a 5.000 m², o número de pontos de medidas pode ser calculado pela Equação 11 (DAMASCENO, 2018).

$$n^{\circ} = \left(\frac{A}{5.000} \right) \times 16 \quad n^{\circ} \geq 6 \quad (\text{Equação 11})$$

Tabela 5 – Estudos brasileiros com emissões fugitivas de metano em aterros sanitários, por meio da técnica da placa de fluxo.

Autores	Aterros	Emissões de metano g CH₄/m²/dia
Mariano (2008)	Aterro Aguazinha (PE)	0 a 401
Audibert e Fernandes (2013)	Aterro Belo Horizonte (MG)	23,3 a 337,6
Maciel (2009)	Aterro Muribeca (PE)	0 a 1.332

Moreira (2018)	Aterro Campina Grande (PB)	0 a 2,85
Regattieri (2009)	Aterro São Carlos (SP)	0 a 90,7
Candiani e Viana (2017)	Aterro Caieiras (SP)	18,6 a 149,8
Borba et al. (2018)	Aterro Seropédica (RJ)	0,1 a 574,6

Fonte: Adaptado de DAMASCENO (2018).

Capítulo 6

EMISSIONES FUGITIVAS DE GAS METANO NO ATERRO SANITARIO CAIEIRAS

O Aterro Sanitário Caieiras (Figura 20), localiza-se no município de Caieiras na Região Metropolitana de São Paulo no estado de São Paulo, apresentando as seguintes coordenadas geográficas: 23°21'51" S e 46°44'26" W (Figura 21).



Figura 20 – Aterro Sanitário Caieiras.

Fonte: <https://www.solvi.com/tratamento-e-destinacao?lightbox=dataitem-jsaoxrc3>

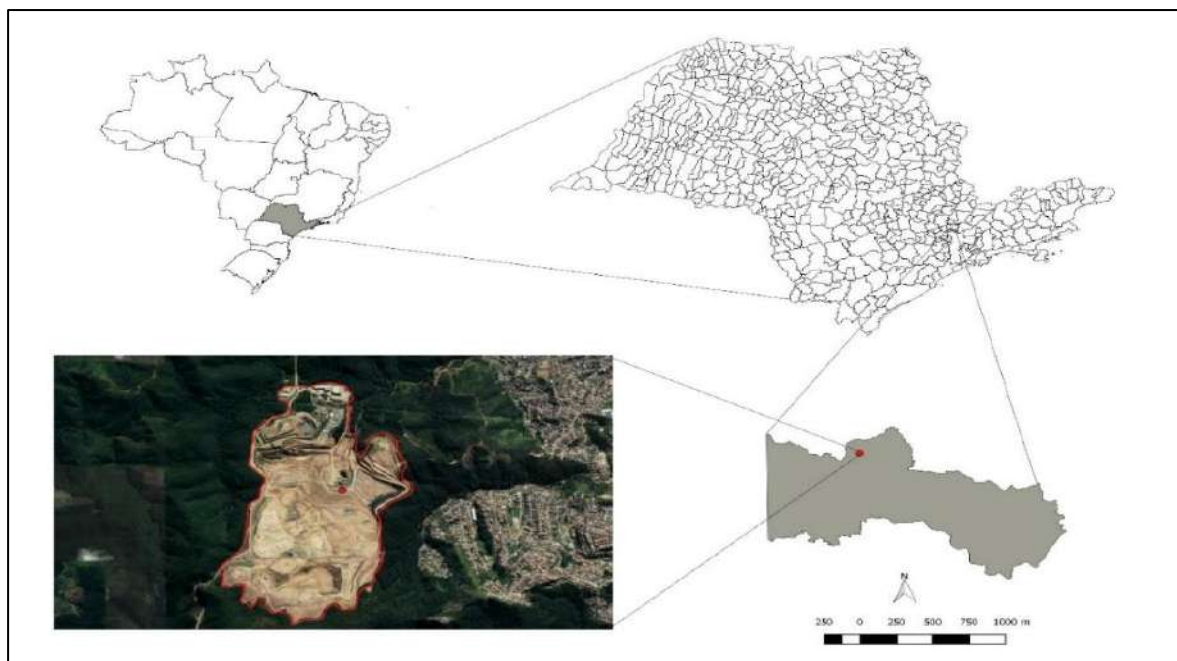


Figura 21 – Localização do Aterro Sanitário Caieiras, no município de Caieiras na RMSP.
Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

O Aterro Sanitário Caieiras ocupa uma área de 350 hectares (ha) e sua base foi impermeabilizada utilizando-se a seguinte composição construtiva: camada de 3 m de solo silte-argiloso compactada, camada de 1 m de argila compactada, camada de geotêxtil bentonítico, camada de geomembrana de polietileno de alta densidade (PEAD) de 2,5 mm de espessura e camada drenante de brita (Figura 22)



Figura 22 – Construção da base do Aterro Sanitário Caieiras.
Fonte: Acervo pessoal do autor.

O Aterro Sanitário Caieiras recebe cerca de 10.000 toneladas de resíduos por dia, atendendo o município de Caieiras e região de entorno e a cidade de São Paulo.

Estima-se que este aterro, no período de 2002 (ano do início das operações) até 2020, tenha recebido aproximadamente 54 milhões de toneladas de resíduos. Os resíduos depositados no aterro, são compactados e diariamente recebem uma camada de solo com espessura de cerca de 50 cm.

O biogás produzido no aterro é captado por um sistema de captação, composto por drenos verticais (poços de gás) e uma rede de tubulações espalhados pelo aterro. O biogás é encaminhado para uma termelétrica, onde é queimado em motogeradores, produzindo energia elétrica. Atualmente, o aterro possui uma capacidade potencial de geração de 29,5 MW (Figura 23).



Figura 23 – Unidade de captação de biogás e termelétrica no Aterro Sanitário Caieiras.

Fonte: <https://www.solvi.com/valorizacao-energetica?lightbox=datatem-jsas9git1>

Para medir a emissão fugitiva de metano no Aterro Sanitário Caieiras, foi utilizado como metodologia o ensaio com uma placa de fluxo. Os pontos de amostragem foram distribuídos aleatoriamente de forma a cobrir as seguintes fases deste aterro: fases I, II, III e IV.

A placa de fluxo utilizada, foi construída com chapa de aço galvanizado com 1 mm de espessura, apresentando um degrau para evitar a entrada de ar atmosférico no interior da caixa. No topo da placa existem duas conexões de saída, onde são conectados os equipamentos de medição. A placa apresenta as seguintes

medidas: $0,50 \times 0,50 \times 0,05 \text{ m}^3$, porém o volume útil de amostragem é de $0,40 \times 0,40 \times 0,05 \text{ m}^3$, pois $0,10 \text{ m}$ formam flanges nos lados da placa, que é colocada na superfície do aterro e coberta com solo, evitando o escape de gás pelas bordas da placa. Assim, o volume de coleta de gás é de $0,008 \text{ m}^3$ e a área é de $0,16 \text{ m}^2$. O fluxo de metano na superfície do aterro é determinado pela taxa de coleta de gás na placa de fluxo, ou seja, quantidade de gás coletada em um dado intervalo de tempo (Figura 24).



Figura 24 – Medição do escape fugitivo de gás metano por meio de placa de fluxo no Aterro Sanitário Caieiras. Fonte: Acervo pessoal do autor.

A taxa de metano para a placa de fluxo de área, A_p foi obtida assumindo que o fluxo de metano seja constante sob a área da placa de fluxo e igual à J_i , de acordo com a Equação 12.

$$\int_{A_i} J(r_s) \cdot da = J_i A_p \quad (\text{Equação 12})$$

Fazendo-se a medida por um intervalo de tempo Δt , a quantidade de metano que acumula na placa, $C_i V_p$, é igual à $J_i A_p \Delta t$, onde, C_i é a concentração de metano no interior da placa de fluxo e V_p é o volume da placa. Então, é possível obter o fluxo de metano a partir da seguinte Equação 13.

$$J_i = \frac{C_i V_p}{A_p \Delta t} \quad (\text{Equação 13})$$

Para se ter precisão na medida é necessário fazê-la de tal forma, que não sature o interior da placa com o metano. Para realizar as medições da quantidade de metano foi utilizado um analisador portátil de gases, tipo GASTECH marca INNOVA LSTTM, projetado para monitorar metano e outros gases em aterros sanitários em ppm (partes por milhão - volumétrico).

O procedimento para se fazer as medições do fluxo de metano foi o seguinte: o local da medição no aterro foi preparado, utilizando-se uma enxada para adequar o terreno, a placa de fluxo foi colocada na superfície do solo com os instrumentos acionados para fazer as medidas, antes que ocorra à saturação da placa com metano, o tempo da medida foi mensurado, durante a instalação da placa de fluxo, o solo retirado do acerto do terreno, foi recolocado e compactado manualmente nas bordas da placa, minimizando as trocas gasosas entre a placa e o meio ambiente, as amostras foram coletadas em quatro tomadas, com intervalos de zero minuto, 1 minuto, 2 minutos e 4 minutos, as coletas nestes intervalos de tempo são necessárias para que não ocorra a saturação da concentração de metano na placa de fluxo.

As medições feitas são dadas em concentração, C_i , na unidade métrica ppm (partes por milhão). Considerando-se o biogás como um gás ideal, é possível apresentar as concentrações nas unidades desejadas.

Os cálculos para determinar as emissões de metano no aterro sanitário foram realizados considerando-se as Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTP) - Equação 14 e medidas em campo de temperatura ao longo dos períodos dos ensaios.

$$pV = nRT \quad (\text{Equação 14})$$

onde:

p: pressão atmosférica no aterro;

V: volume;

n: número de mols;

R: constante dos gases ideais (62,4 mmHg/mol K) e;

T: temperatura (em graus K - Kelvin).

As medidas do escape de metano foram convertidas, segundo a Equação 15.

$$C_i \left(\frac{\text{mol CH}_4}{\text{m}^3} \right) = \frac{p}{RT} 10^{-3} C_i (\text{ppm vol}) \quad (\text{Equação 15})$$

Os resultados obtidos nos ensaios com a placa de fluxo nos pontos amostrados foram multiplicados pela área de cada fase do aterro, obtendo-se uma estimativa da taxa média de emissão de metano no Aterro Sanitário Caieiras. As medições do escape de metano foram realizadas semestralmente, entre os meses de março a setembro.

Para determinação das incertezas nas medições foram considerados os erros sistemáticos dos instrumentos utilizados e as flutuações durante os procedimentos de medição. O erro de medição foi determinado de forma indireta, já que é difícil repetir as medições diversas vezes em campo. Para contornar essa dificuldade, foram realizadas, separadamente, 30 medições de cada variável em condições de campo com a instrumentação mencionada (NETO, 2009).

Foram amostrados um total de 480 pontos, distribuídos ao longo das quatro fases do aterro, ou seja, 120 pontos em cada fase, considerando-se os dois períodos distintos dos ensaios. A fase I - ocupa um total de 55.000 m², sendo depositadas cerca de 1.108.000 toneladas de resíduos (no período de 2002 a 2004), fase II - ocupa um total de 165.000 m², sendo depositadas cerca de 3.500.000 toneladas de resíduos (2005 a 2007), fase III - ocupa um total de 110.000 m², sendo depositadas cerca de 4.400.000 toneladas de resíduos (2008 a 2011) e fase IV - ocupa um total de 100.000 m², sendo depositadas cerca de 3.800.000 toneladas de resíduos (2009 a 2014), Figura 25.



Figura 25 – Localização dos pontos amostrados nos ensaios de emissão fugitiva de metano nas diferentes fases do Aterro Sanitário Caieiras.

Fonte: CANDIANI e VIANA (2017).

Os dados foram analisados através de análise de variância (ANOVA) em blocos casualizados com repetições, sendo utilizado o programa computacional estatístico ASSISTAT - Assistência Estatística Versão 7.7 beta – 2014, sendo aplicado o teste t ao nível de significância de 5% de probabilidade para comparação das médias (ASSISTAT, 2014).

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de campo em relação ao monitoramento do escape fugitivo de metano no Aterro Sanitário Caieiras.

Observa-se que houve diferença significativa entre os valores obtidos de metano entre as fases do aterro sanitário. Estas diferenças tornam-se mais evidentes quando se compara as emissões de metano entre a fase I e demais fases, esta diferença ocorre devido à idade da deposição dos resíduos no aterro, ou seja, a fase I é a mais antiga, fato que devido ao processo de biodegradação mais avançado, a maior parte do metano já foi produzido.

Tabela 6 – Análise de variância com aplicação de teste t para os valores médios por fase do escape fugitivo de metano no Aterro Sanitário Caieiras.

Fases do Aterro	Emissão média de metano (mol CH₄/m²h)
Fase I	0,04860 a*
Fase II	0,13714 b
Fase III	0,30668 c
Fase IV	0,39027 d
*as médias seguidas de letras minúsculas distintas, diferem entre si ao nível de 5%.	

Fonte: CANDIANI e VIANA (2017).

Portanto, resíduos mais novos, emitem parcelas maiores de metano, fato que acaba ocorrendo nas etapas mais recentes da operação de um aterro sanitário. Estudos realizados no Brasil apontam essa tendência, resíduos depositados recentemente em aterros sanitários produzem taxas de emissão de metano da ordem de 70,33 kg/m²ano, enquanto resíduos depositados anteriormente nos aterros geram taxas de metano de 24 Kg/m²ano (MACIEL, 2009; MARIANO e JUCÁ, 2010), aspecto que corrobora com o resultado obtido no Aterro Sanitário Caieiras.

A Figura 26 mostra a distribuição dos pontos de escape fugitivo de metano ao longo das fases do Aterro Sanitário Caieiras, demonstrando a ocorrência das maiores taxas de emissão do metano nas fases 3 e 4 (resíduos mais recentes) em comparação com as fases 1 e 2 (resíduos mais antigos).

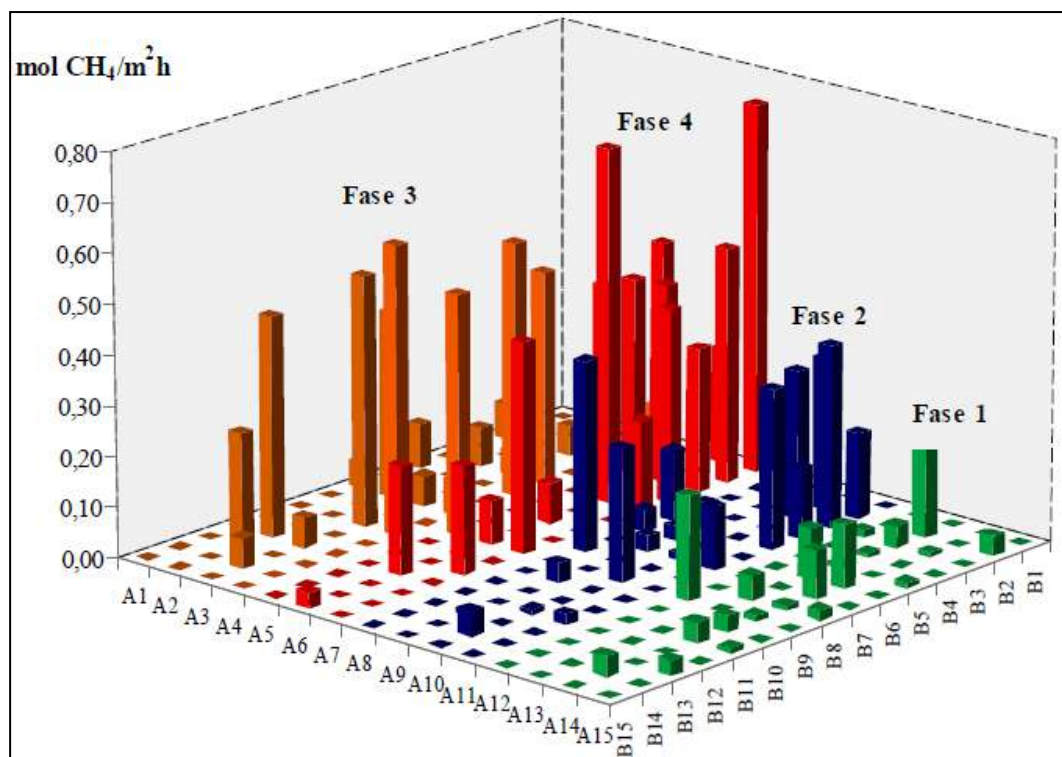


Figura 26 – Distribuição dos pontos de medição do escape de metano no Aterro Sanitário Caieiras. Fonte: CANDIANI e VIANA (2017).

A Tabela 7 mostra a emissão média de metano, considerando-se o período do ano em que foi realizado o monitoramento. Observa-se a existência de diferença significativa entre os dois períodos monitorados no aterro sanitário. A diferença obtida é devido à condição climática distinta ao longo do ano, ou seja, período com maior intensidade pluviométrica provoca a saturação do solo de cobertura no aterro sanitário, condição que dificulta o escape fugitivo de metano no contato aterro-atmosfera.

Tabela 7 – Análise de variância com aplicação de teste t para os valores médios por período de monitoramento do escape fugitivo de metano no Aterro Sanitário Caieiras.

Período de Monitoramento	Emissão média de metano (mol CH ₄ /m ² h)
Março-Abril	0,28736 a*
Setembro-Outubro	0,15398 b
*as médias seguidas de letras minúsculas distintas, diferem entre si ao nível de 5%.	

Fonte: CANDIANI e VIANA (2017).

A variação do fluxo de metano indica a existência de vários fatores que interferem em sua emissão pela camada de cobertura, que vão desde as características geotécnicas do solo (tipo, grau de compactação e de saturação), qualidade e espessura da camada de cobertura, pressões de gases no contato solo-resíduo, idade dos resíduos e condições climáticas da região (MACIEL, 2003; MARIANO e JUCÁ, 2010; AUDIBERT e FERNANDES, 2013). No Aterro Sanitário Caieiras foi registrado entre os meses de setembro-outubro um  ndice pluviométrico de 277 mm e nos meses entre março-abril 162 mm, aspecto que influenciou a ocorrência do maior escape de metano entre os meses de março-abril.

A Tabela 8 apresenta as emissões médias de metano por fase do aterro sanitário, sendo que os resultados foram convertidos de mol para m³, considerando que 1 mol de gás metano ocupa 22,4 l (0,0224 m³) na CNTP (1 atm. e 273,15 K).

Tabela 8 – Emissões médias de metano por fase no Aterro Sanitário Caieiras.

Fases do Aterro	Emissão média fugitiva de metano (mol CH ₄ /m ² h)	Emissão média fugitiva de metano (m ³ CH ₄ /m ² h)	�rea de cada uma das fases do aterro (m ²)	Emissão média fugitiva total de metano por fase do aterro (m ³ CH ₄ /m ² h)
Fase I	0,04860	0,001088	55.000	59,84
Fase II	0,13714	0,003071	165.000	506,71
Fase III	0,30668	0,006869	110.000	755,59
Fase IV	0,39027	0,008742	100.000	874,2
-	-	-	-	2.196,34 (Total)

Fonte: CANDIANI e VIANA (2017).

A emissão média total de metano por fase do Aterro Sanitário Caieiras foi obtida multiplicando-se a emissão média de metano pela área de cada fase. Observa-se que a Fase IV (mais recente em relação   deposição de resíduos) contribui mais para a emissão fugitiva de metano no aterro. O total de emissão média fugitiva de metano no aterro foi de 2.196,34 m³CH₄/m²h.

Considerando-se, que a produção de metano no Aterro Sanitário Caieiras era de cerca de 7.000 m³/h, incluindo aproximadamente 140 drenos verticais para captação de biogás e o escape total de metano foi de 2.196,34 m³/h, este escape representa 31% do total produzido de metano no aterro.

Estudos realizados no Brasil mostram que a emissão fugitiva representa 22% do total de metano emitido por um aterro (MACIEL e JUCÁ, 2011). No Aterro Sanitário Caieiras, o valor obtido de 31%,   um

resultado ainda mais expressivo, aspecto que reforça ainda mais a necessidade de se controlar de maneira mais adequada as emissões fugitivas de metano no aterro.

A Tabela 9 apresenta as emissões de metano por fase no aterro. Os valores obtidos foram convertidos de mol/h para g/dia, considerando-se, que a massa molar do CH₄ é de 16 g/mol. Desta maneira, os valores obtidos variaram entre 18,66 a 149,86 g CH₄/m²dia, resultados menores comparados aos encontrados na literatura, emissões de 0,004 a 363 g CH₄/m²dia (MACIEL, 2003; MARIANO, 2008; MARIANO e JUCÁ, 2010). Essas diferenças podem estar relacionadas com o procedimento operacional de cada aterro sanitário, considerando-se a camada de cobertura, característica do solo, grau de compactação, condições climáticas locais e sistema de captação de biogás.

Tabela 9 – Emissões médias fugitivas totais de metano por fase no Aterro Sanitário Caieiras.

Fases do Aterro	Emissão média fugitiva de metano (molCH₄/m²h)	Emissão média fugitiva total de metano por fase do aterro (gCH₄/m²dia)
Fase I	0,04860	18,66±3,15
Fase II	0,13714	52,66±3,15
Fase III	0,30668	117,76±3,15
Fase IV	0,39027	149,86±3,15

Fonte: CANDIANI e VIANA (2017).

A Tabela 10 apresenta as taxas do escape fugitivo de metano em diferentes aterros sanitários. É possível verificar a existência de diferentes taxas da emissão de metano, variando de 18 a 3.800 g CH₄/m²dia. Essas diferenças encontradas, ocorrem em função das características locais e específicas de cada aterro sanitário. Entretanto, nota-se que a taxa de emissão no Aterro Sanitário Caieiras (149,86 g CH₄/m²dia) é praticamente idêntica à do Aterro Sanitário Bandeirantes (148,4 g CH₄/m²dia), fato que pode ser explicado devido à proximidade geográfica entre os dois aterros e, principalmente devido as condições climáticas semelhantes. Estes aterros, também apresentam semelhanças em relação aos aspectos operacionais e de controle ambiental, destacando-se a presença nos dois aterros também de sistemas de captação de biogás bem parecidos.

Tabela 10 – Emissões fugitivas de gás metano em diferentes aterros sanitários.

Local do estudo	Valores de emissão fugitiva de metano em aterro sanitário (g CH ₄ /m ² dia)
Aterro Sanitário da Flórida (EUA)	53,6 a 596
Aterro Sanitário “Fano” (Itália)	3.800
Aterro Célula Experimental, Recife-PE (Brasil)	984,7
Aterro da Muribeca-PE (Brasil)	362,9
Célula Experimental no Aterro da Muribeca-PE (Brasil)	1.332
Aterro de Aguazinha-PE (Brasil)	18 a 401
Aterro Sanitário Bandeirantes-SP (Brasil)	148,4
Célula experimental no Aterro de Belo Horizonte-MG (Brasil)	23,24 a 337,67
Aterro Sanitário Caieiras, SP (Brasil)	18,66 a 149,86

Fonte: CANDIANI e VIANA (2017).

Emissões fugitivas de metano, por meio do programa computacional CALMIM no Aterro Sanitário Caieiras

A emissão fugitiva de metano no Aterro Sanitário Caieiras, a partir do programa computacional CALMIM foi obtida considerando-se os seguintes parâmetros: área total do aterro: 3.500.000 m² (fases I, II, III e IV), localização: 23°21'51" S e 46°44'26" W (coordenadas geográficas), tipo e camada de cobertura: solo silte-argiloso (50 cm de espessura), área ocupada pelo sistema de captação do biogás no aterro: 50%, temperatura média no aterro: 25°C, umidade média no aterro: 1.400 mm/ano (índice pluviométrico) e concentração média de metano no aterro: 45%.

A emissão média de metano no Aterro Sanitário Caieiras, pelo programa computacional CALMIM foi de 190 g CH₄/m²dia (Figura 27), valor próximo ao obtido a partir do estudo de campo, com a placa de fluxo (149,86 g CH₄/m²dia), mostrando que a duas técnicas de monitoramento podem ser utilizadas para determinar as emissões fugitivas de gás metano em aterro sanitário.

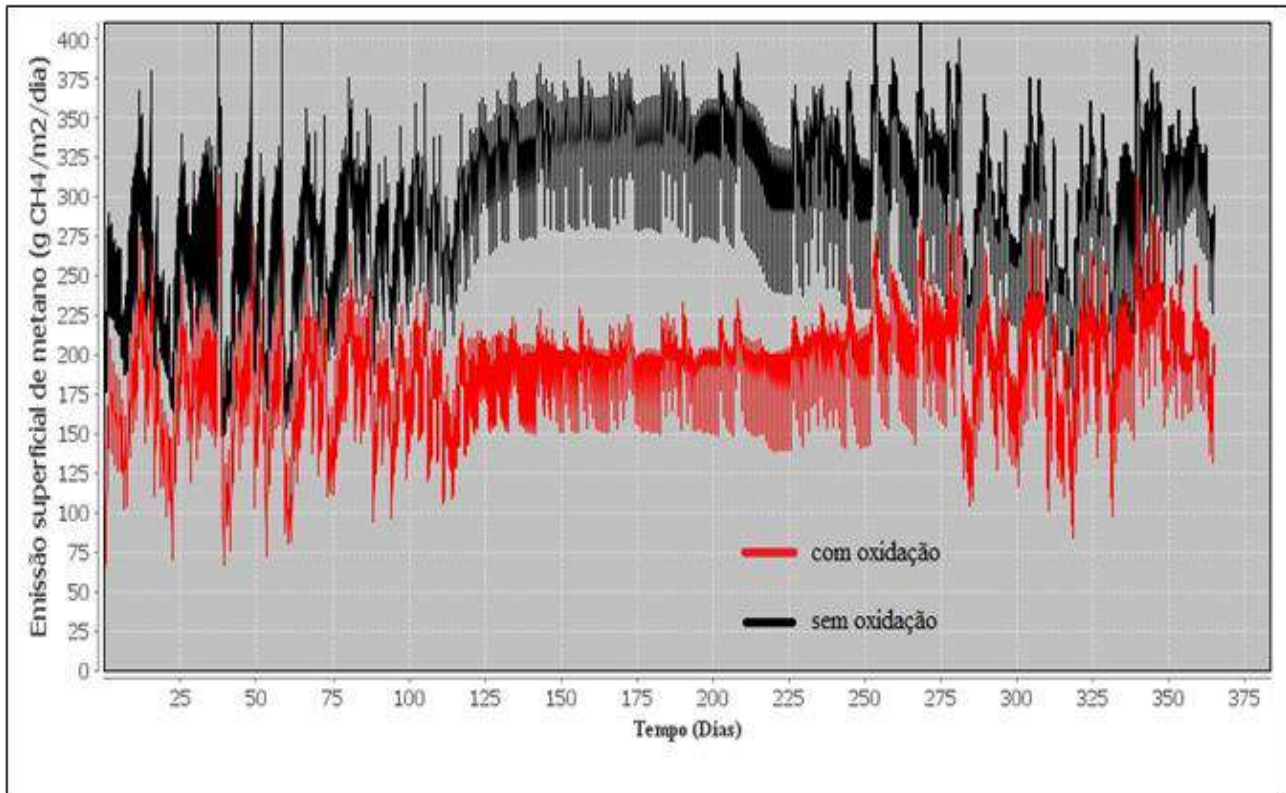


Figura 27 – Emissão fugitiva de metano no Aterro Sanitário Caieiras, utilizando-se o programa computacional CALMIM. Fonte: CANDIANI (2020), dados não publicados.

CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os sistemas de captação de gás metano nos aterros sanitários, normalmente apresentam eficiências da ordem de 50 a 75% e uma parcela, na ordem de 22 a 31% escapam para o meio ambiente, representando impactos socioambientais significativos, como: emissão de metano para a atmosfera (efeito estufa) e perdas econômicas pela não geração de créditos de carbono, valorização ambiental e energética do gás metano.

O maior escape de metano ocorre devido à perda de eficiência da camada de solo de cobertura, devido as condições climáticas e intempéries, número inadequado e problemas relacionados aos drenos verticais (poços de gás) para captação do biogás durante a operação do aterro sanitário, dificuldade na integração entre a operação do aterro sanitário e o sistema de captação do gás, constante movimentação da rede de tubulações para ajustes operacionais relacionados à disposição dos resíduos no aterro sanitário, presença de trincas e fissuras no aterro sanitário oriundo dos recalques do maciço sanitário, inadequação do sistema de sucção de biogás no aterro sanitário, baixa eficiência da camada de cobertura final no aterro sanitário e não instalação de sistemas impermeáveis no topo do aterro sanitário, como a aplicação de geomembranas sintéticas ou camadas de solo com maior rigor tecnológico quanto à compactação.

O maior controle das emissões fugitivas de metano em um aterro sanitário é de fundamental importância para o aprimoramento e aumento na eficiência da captação de biogás. O metano deve ser valorizado do ponto de vista ambiental e energético, porém seu maior aproveitamento depende dos avanços no sistema de captação. Esta obra, se propôs a mostrar algumas técnicas para se controlar de maneira mais efetiva o escape fugitivo de metano em aterro sanitário.

A adoção do método da placa de fluxo em um aterro sanitário, é uma prática simples e de baixo custo, podendo contribuir para aumentar a eficiência de captação de gás metano no aterro, representando ganhos econômicos e redução de impactos ambientais.

Uma alternativa é a aplicação de geomembrana como cobertura final de topo no aterro sanitário, mas esta prática precisa ser mais bem avaliada, sobretudo em relação aos efeitos nos aterros sanitários brasileiros, principalmente na estabilidade dos maciços sanitários.

No Brasil, a cobertura do aterro sanitário com geomembrana ainda é uma questão complexa, representando muita resistência, principalmente em função dos possíveis impactos na operação e monitoramento dos aterros sanitários, porém a própria Política Nacional de Resíduo Sólido direciona esforços para ampliação do aproveitamento energético do metano nos aterros sanitários e, pesquisas, que possam avaliar os efeitos da cobertura com geomembrana nos aterros sanitários seriam fundamentais e urgentes.

Com base na aplicação do ensaio da placa de fluxo e a simulação com o CALMIM, para se determinar as emissões fugitivas de gás metano no Aterro Sanitário Caieiras, pode-se concluir que:

- a técnica da placa de fluxo pode ser considerada adequada para análise do escape fugitivo de metano em aterro sanitário, fornecendo informações importantes sobre a dinâmica dos gases no aterro sanitário, eficiência do sistema de captação de gás, além de ser um procedimento de fácil aplicação, simples e de baixo custo;
- a emissão fugitiva superficial de metano no Aterro Sanitário Caieiras foi de 149,86 g CH₄/m²dia (placa de fluxo) e 190 g CH₄/m²dia (programa CALMIM);
- as emissões fugitivas de metano para a atmosfera pela camada de cobertura representam 31% das emissões totais de CH₄ no Aterro Sanitário Caieiras;
- os resultados obtidos mostram uma relação entre o aumento do grau de saturação do solo e retenção de gases, ou seja, solos mais úmidos apresentam um escape fugitivo de metano menor do que solos mais secos;
- pesquisas da emissão fugitiva de metano em aterro sanitário, pode ser considerada uma boa prática, proporcionando benefícios técnico-operacionais, ganhos econômicos e reduções nos impactos ambientais, além de subsidiar estudos para aplicação de geomembrana como cobertura final de topo no aterro sanitário.

Como conjunto de boas práticas nos aterros sanitários, esta obra sugere-se a adoção pelos aterros das seguintes medidas:

- recompor a camada de solo (com compactação satisfatória) de cobertura final em vários locais no aterro sanitário, principalmente nas fases mais recentes (maior escape fugitivo superficial de metano);
- mapear em campo fissuras e trincas existentes na camada de cobertura do aterro sanitário, pois são caminhos preferenciais do escape de gás;
- executar o plantio de grama em todas as células do aterro sanitário concluídas, a cobertura vegetal nas células de resíduos aumenta a retenção de água na camada de solo, reduzindo o escape fugitivo de gás e a infiltração de água pluvial, aspecto que reduz a produção de chorume no aterro sanitário, proporcionando economia em relação aos custos do tratamento de chorume e ganhos com maior recuperação de gás metano no aterro;
- analisar a qualidade do solo de cobertura, que não foi contemplado na presente obra, correlacionando-se as emissões fugitivas com o tipo de solo;

- avaliar a oxidação biológica de metano realizada por ação de microrganismos no solo de cobertura, influenciando a eficiência da captação de metano no aterro sanitário e/ou aplicação de barreiras biológicas oxidativas, evitando-se a emissão de metano para a atmosfera, medidas também não contempladas nesta obra;
- estudar outras técnicas relacionadas às emissões fugitivas de metano em aterro sanitário, como por exemplo: ensaios com técnicas termográficas e mapeamentos com sensores remotos de plumas, destacando-se a necessidade de maiores investimentos financeiros.

POSFÁCIO

Esta obra, apresenta a importância da avaliação das emissões fugitivas de gás metano nos aterros sanitários e, principalmente o uso da placa de fluxo, como técnica para controle das emissões de metano e aperfeiçoamento dos sistemas de captação do gás metano em aterro sanitário.

Entretanto, ressalta-se que em relação ao ensaio da placa de fluxo, não foi possível determinar uma padronização em termos do tamanho e formato da placa de fluxo e número de ensaios. Portanto, quando se busca fazer possíveis comparações de emissões entre aterros, deve-se considerar tais ressalvas.

Também aspectos relacionados as condições ambientais e a infraestrutura dos aterros sanitários devem ser consideradas, assim como, tipo de solo, variáveis climáticas, tipologias de resíduos, idade dos resíduos, sistema operacional, número de drenos verticais, camada de solo de cobertura dos resíduos, grau de compactação da camada de cobertura e do aterro e gestão das águas pluviais no aterro.

A maior atenção a emissão fugitiva de gás metano nos aterros sanitários, sobretudo na busca pela sua redução, representa de fato ganhos ambientais e econômicos significativos, aumentando a comercialização do próprio gás metano e créditos de carbono e produção de energia elétrica.

As práticas sugeridas nesta obra, são de baixo custo e de simples implementação no aterro sanitário e podem proporcionar benefícios interessantes. Aperfeiçoar a recuperação de metano no aterro sanitário, representa um insumo energético importante, renovável e em consonância com as diretrizes e legislações atuais de biogás e biomassa.

O uso do metano é uma fonte energética com grande potencial atual e futuro, ampliando-se o aproveitamento energético do metano com a produção de energia elétrica e purificação para geração de combustível veicular.

O aproveitamento do metano representa excelente contribuição para a prática da sustentabilidade, proporcionando desenvolvimento tecnológico, ganhos ambientais e sociais, com a geração de empregos e renda.

Referências

- ABICHO, T.; MAHIEU, K.; YUAN, L.; CHANTON, J.; HATER, G. Effects of compost biocovers on gas flow and methane oxidation in landfill cover. *Waste Management*, v. 29, p. 1595-1601, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). Atlas Brasileiro de Emissões de GEE e Potencial Energético na Destinação de Resíduos Sólidos. ABRELPE: São Paulo, 2012, 109p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil – 2018/2019. ABRELPE: São Paulo, 2019, 68p.
- ABREU, F. V. Biogás: economia, regulação e sustentabilidade. 1ª ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2014, 196p.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resíduos Sólidos. Disponível em: <http://www.energia.sp.gov.br/energias-renovaveis/residuos-solidos/>. Acesso em: ago. de 2020.
- ASSISTAT - Assistência Estatística Versão 7.7 beta (2014). Disponível em: <<http://www.assistat.com>>. Acesso em: jun. 2014.
- AUDIBERT, J. L.; FERNANDES, F. Preliminary qualitative and quantitative assessment of gases from biodigestion of solid wastes in the landfill of Londrina, Paraná State, Brazil. *Acta Scientiarum. Technology*. v. 35, n. 1, p. 45-52, 2013.
- BABILOTTE, A.; LAGIER, T.; FIANI, E.; TARMINI, V. Fugitive Methane Emissions from Landfills: Field Comparison of Five Methods on a French Landfill. *Journal of Environmental Engineering*, n. 139, p. 777-784, 2010.
- BANCO MUNDIAL (2003). Manual para preparação de gás de aterro sanitário para projetos de energia na América Latina e Caribe.
- BARROS, R. M. et al. The electric energy potential of landfill biogas in Brazil. *Energy Policy*. V. 65, p. 150-164, Ed. Elsevier, 2014.
- BARROS, R. M. Tratado sobre resíduos sólidos: gestão, uso e sustentabilidade. Rio de Janeiro: Interciência, 2013. 374p.
- BARROS, R. T. V. Elementos de resíduos sólidos. Belo Horizonte: Tessitura, 2012. 424 p.
- BATTAGLINI, R.; RACO, B; SCOZZARI, A. Effective monitoring of landfills: flux measurements and thermography enhance efficiency and reduce environmental impact. *Journal of Geophysics and Engineering*, v. 10, p. 1-14, 2013.
- BOGNER, J., SPOKAS, K.; CHANTON, J. Seasonal Greenhouse Gas Emissions (methane, carbon dioxide, nitrous oxide) from Engineered Landfills: Daily, Intermediate, and Final California Landfill Cover Soils. *Journal Environmental Quality*, v. 40, p. 1010-1020, 2011.
- BORBA, P. F. S.; MARTINS, E. M.; CORREA, S. M.; RITTER, E. Emissão de gases do efeito estufa de um aterro sanitário no Rio de Janeiro. *Engenharia Sanitária Ambiental*, v. 23, n. 1, p. 101-111, 2018.

- BOSCOV, M.E.G. Geotecnia Ambiental. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 248p.
- CALIFORNIA LANDFILL METHANE INVENTORY MODEL (CALMIM). Versão 5.4 (2013). <http://www.ars.usda.gov>. Acesso em: 18 de ago. 2018.
- CANDIANI, G. Estudo da geração de metano em uma célula de aterro sanitário. 173p. Tese (Doutorado em Energia) - Pós-Graduação em Energia. Universidade Federal do ABC, Santo André-SP, 2011.
- CANDIANI, G.; MOREIRA, J. M. L. Avaliação dos parâmetros cinéticos da geração de metano em uma célula experimental de resíduos sólidos. Engenharia Sanitária Ambiental, v. 23, n. 3, p. 459-470, 2018.
- CANDIANI, G.; MOREIRA, J. M. L. Estudo da Geração de Metano em uma Célula de Aterro Sanitário, Jundiaí: Paco Editorial, 2015. 176p.
- CANDIANI, G.; VIANA, E. Emissões fugitivas de metano em aterros sanitários. Geosp – Espaço e Tempo (Online), v. 21, n. 3, p. 845-857, 2017.
- CAPACCIONI, B.; CARAMIELLO, C.; TATANO, F.; VISCIONE, A. 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, p. 956-965, 2011.
- CAPAZ, R. S.; NOGUEIRA, L. A. H. Ciências ambientais para engenharia. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). Biogás: projetos e pesquisas no Brasil. São Paulo: SMA, 2006, 184p.
- DAMASCENO, L. A. G. Emissão fugitiva de metano através do sistema de cobertura de um aterro sanitário considerando a ocorrência de zonas com fissuramento. Dissertação de Mestrado no Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal da Bahia - BA, Salvador, 2018, 188p.
- DI BELLA, G.; DI TRAPANI, D.; VIVIANI, G. Evaluation of methane emissions from Palermo Municipal Landfill: comparison between field measurements and models. Waste Management, v. 31, p. 1820-1826, 2011.
- DI TRAPANI, D.; DI BELLA, G.; VIVIANI, G. Uncontrolled methane emissions from a MSW landfill surface: Influence of landfill features and side slopes. Waste Management, v. 33, p. 2108-2115, 2013.
- FARQUHAR, G. J.; ROVERS, F. A. Gas production during refuse decomposition. Water, Air, and Soil Pollution, n. 2, p. 483-495, 1973.
- GALLEGO, E.; PERALES, J. F.; ROCA, F. J.; GUARDINO, X. Surface emission determination of volatile organic compounds (VOC) from a closed industrial waste landfill using a self-designed static flux chamber. Science of the Total Environment, v. 470-471, p. 587-599, 2014.
- GOLDSMITH JR., C. D.; CHANTON, J.; ABICHOU, T.; SWAN, N.; GREEN, R.; HATER, G. Methane emissions from 20 landfills across the United States using vertical radial plume mapping. Journal of the Air & Waste Management Association, v. 62, n. 2, p. 183-197, 2012.
- INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). Diagnóstico dos Instrumentos Econômicos e Sistemas de Informação para Gestão de Resíduos Sólidos: Relatório de Pesquisa. Brasília: IPEA, 2012, 46p.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC (2006). Guidelines for National Greenhouse Inventories. Reference Manual, v. 3.

LEME, M.M.V.; ROCHA, M.H.; LORA, E.E.S.; VENTURINI, O.J.; LOPES, B.M.; FERREIRA, C.H. (2014) Techno-economic analysis and environmental impact assessment of energy recovery from Municipal Solid Waste (MSW) in Brazil. Resources, Conservation and Recycling, v. 87, p. 8-20.

LIMA, L. M. Q. Lixo: Tratamento e Biorremediação. São Paulo: Hemus, 265 p., 2004.

MACHADO, S. L.; CARVALHO, M. F.; GOURC, J. P.; VILAR, O. M.; NASCIMENTO, J. C. F. Methane generation in tropical landfills: simplified methods and field results. Waste Management, v. 29, 2008, p. 153-61.

MACIEL, F. J. Estudo da geração, percolação e emissão de gases no aterro de resíduos sólidos na Muribeca/PE. 173p. Tese (Mestre em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco-PE, 2003.

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

MACIEL, F. J.; JUCÁ, J. F. T. Evaluation of landfill gas production and emissions in a MSW large-scale Experimental Cell in Brazil. Waste Management, v. 31, p. 966-977, 2011.

MARIANO, M. O. H. Avaliação da retenção de gases em camadas de cobertura de aterros de resíduos. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Pernambuco, Recife-PE, 2008.

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 Ambiental, v. 15, n. 3, p. 223-228, 2010.

MONSTER, J. G.; SAMUELSSON, J.; KJELDTSEN, P.; RELLA, C. W.; SCHEUTZ, C. Quantifying methane emission from fugitive sources by combining tracer release and downwind measurements - A sensitivity analysis based on multiple field surveys. Waste Management, v. 34, p. 1416-1428, 2014.

MONTEIRO, V. E. D. et al. Estudo do comportamento de RSU em uma célula experimental e suas correlações com aspectos microbiológicos, físicos e químicos. Eng. Sanit. Ambient., Rio de Janeiro, v. 11, n. 3, p. 223-230, 2006.

MOREIRA, F. G. S. Emissões fugitivas de biogás em célula de aterro sanitário. Dissertação de Mestrado no Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Campina Grande - PB, 2018, 90p.

NADALETTI, W. C. ; CREMONEZ, P. A.; DE SOUZA S. N. M.; BARICCATTI, R. A.; BELLI FILHO, P.; SECCO D. Potential use of landfill biogas in urban bus fleet in the Brazilian states: A review. Renewable & Sustainable Energy Reviews, v. 41, p. 277-283, 2015.

NETO, J. B. Medidas da emissão de gases em oito aterros de resíduos sólidos urbanos no estado de São Paulo, Brasil. 530p. Tese (Doutorado) em Engenharia Ambiental. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos-SP, 2009.

OONK, H. (2010) Literature review: methane from landfills: methods to quantify generation, oxidation and emission. Innovations in Environmental Technology, The Netherlands, Oonkay.

PARK, J. W; SHIN, H. C. Surface emission of landfill gas from solid waste landfill. Atmospheric Environment, v. 35, p. 3445-3451, 2001.

PIÑAS, J. A. V.; VENTURINI, O. J.; LORA, E. E. S.; OLIVEIRA, M. A. DE; ROALCABA, O. D. C. Aterros sanitários para geração de energia elétrica a partir da produção de biogás no Brasil: comparação dos modelos LandGEM (EPA) e Biogás (Cetesb). Revista Brasileira de Estudos de População, v. 33, n. 1, p. 175-188, 2016.

REGATTIERI, C. R. Quantificação de emissão de biogás em aterro sanitário - estudo de caso do aterro sanitário de São Carlos. 138p. Tese (Doutorado) em Engenharia Mecânica. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos-SP, 2009.

SANTOS, M. M.; ROMANEL, C.; VAN ELK, A. G. H. P. Análise da eficiência de modelos de decaimento de primeira ordem na previsão da emissão de gás de efeito estufa em aterros sanitários brasileiros. Engenharia Sanitária Ambiental, v. 22, n. 6, p. 1151-1162, 2017.

SAURI-RIANCHO, M. R.; STENTIFORD, E. I.; GAMBOA-MARRUFO, M.; REZA-BACELIS, G.; CAHUICH-POOT, N.; MÉNDEZ-NOVELO, R. Superficial Methane Emissions from a Landfill in Mérida, Yucatan, México. Ingeniería Investigación y Tecnología, v. 15, n. 3, p. 299-310, 2013.

SCHEUTZ, C.; BOGNER, J.; CHANTON, J. P; BLAKE, D.; MORCET, M.; ARAN, C.; KJELDSSEN, J. Atmospheric emissions and attenuation of non-methane organic compounds in cover soils at a French landfill. Waste Management, v. 8, p. 1892-1908, 2008.

SCHEUTZ, C.; KJELDSSEN, P.; BOGNER, J. E.; DE VISSCHER, A.; GEBERT, J.; HILGER, H. A.; HUBER-HUMER, M.; SPOKAS, K. Microbial methane oxidation processes and technologies for mitigation of landfill gas emissions. Waste Management, v. 27, n. 5, p. 409-455, 2009.

SCHEUTZ, C.; PEDERSEN, R. B.; PETERSEN, P. H.; UCENDO, I. M. B.; MONSTER, J. G.; SAMUELSSON, J.; KJELDSSEN, P. Mitigation of methane emission from an old unlined landfill in Klintholm, Denmark using a passive biocover system. Waste Management, v. 34, p. 1179-1190, 2014.

SCHEUTZ, C.; SAMUELSSON, J.; FREDENSLUND, A. M.; KJELDSSEN, P. Quantification of multiple methane emission sources at landfills using a double tracer technique. Waste Management, v. 31, p. 1009-1017, 2011.

SCHROTH, M. H.; EUGSTER, W.; GOMEZ, K. E.; GONZALEZ-GIL, G.; NIKLAUS, P. A.; OESTER, P. Above and below-ground methane fluxes and methanotrophic activity in a landfill-cover soil. Waste Management, v. 32, p. 879-889, 2012.

SILVA, E. R. Modelagem Matemática da Produção e Transporte de Biogás em Aterros Sanitários. 2010. 82 f. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade Federal do ABC, Santo André, 2010.

SILVA, T. N.; CAMPOS, L. M. S. Avaliação da produção e qualidade do gás de aterro para energia no Aterro Sanitário dos Bandeirantes-SP. Engenharia Sanitária Ambiental, v. 13, n. 1, p. 88-96, 2008.

SILVA, T. N.; FREITAS, F. S. N. DE; CANDIANI, G. Avaliação das emissões superficiais do gás de aterros sanitários de grande porte. Engenharia Sanitária Ambiental, v. 18, n. 2, p. 95-104, 2013.

SPOKAS, K.; BOGNER J.; CHANTON, J. A Process-Based Inventory Model for Landfill CH₄ Emissions Inclusive of Soil Microclimate and Seasonal Methane Oxidation. *Journal Geophysical Research Biogeosciences*, v. 116, p. 235-247, 2011.

SPOKAS, K.; BOGNER, J. Limits and dynamics of methane oxidation in landfill cover soils, *Waste Management*, v. 31, p. 823-832, 2011.

SPOKAS, K.; BOGNER, J.; CHANTON, J. P.; MORCET, M.; ARAN, C.; GRAFF, C.; MOREAU-LE GOLVAN, Y.; HEBE, I. Methane mass balance at three landfill sites: What is the efficiency of capture by gas collection systems? *Waste Management*, v. 26, p. 516-525, 2006.

SPOKAS, K.; GRAFF, C.; MORCET, M.; ARAN, C. Implications of the spatial variability of landfill emission rates on geospatial analyses. *Waste Management*, v. 23, p. 599-607, 2003.

TCHOBANOGLOUS, G.; THEISEN, H.; VINIL, S. *Integrated Solid Waste Management: Engineering principles and management issues*. New York, USA: McGrawHill Inc., 938 p., 1993.

TEIXEIRA, C. E.; TORVES, J. C.; FINOTTI, A. R.; FEDRIZZI, F.; MARINHO, F. A. M.; TEIXEIRA, P. F. Estudos sobre oxidação aeróbia do metano na cobertura de três aterros sanitários no Brasil. *Engenharia Sanitária Ambiental*, v. 14, n. 1, p. 99-108, 2009.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA (1998). *Landfill gas emissions model, Version 3.02 user's guide – LandGEM*.

SOBRE O AUTOR***Giovano Candiani***

É Ecólogo e Doutor em Energia pela Universidade Federal do ABC e atualmente é professor de Gestão Ambiental na Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP), Campus Diadema, ministrando aulas na graduação nos cursos de Ciências Ambientais e Ciências-Licenciatura e no programa de pós-graduação em Análise Ambiental Integrada. É autor de artigos, livros e capítulos de livros na área de Ciências Ambientais, com foco em gestão ambiental, avaliação de impacto ambiental, educação ambiental, energia, resíduos sólidos e biogás de aterro sanitário.

E-mail: gcandiani@unifesp.br

CV: <http://lattes.cnpq.br/9950995765229751>

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9896-4390>

<http://www.cambientais.sites.unifesp.br/index.php/pt/>

<http://ciencias.sites.unifesp.br/>

<https://ppgaai-unifesp.webs.com/>

Esta obra, apresenta a importância da avaliação das emissões fugitivas de gás metano nos aterros sanitários e, principalmente o uso da placa de fluxo, como técnica para controle das emissões de metano e aperfeiçoamento dos sistemas de captação do gás metano em aterro sanitário.

Entretanto, ressalta-se que em relação ao ensaio da placa de fluxo, não foi possível determinar uma padronização em termos do tamanho e formato da placa de fluxo e número de ensaios. Portanto, quando se busca fazer possíveis comparações de emissões entre aterros, deve-se considerar tais ressalvas.

Também aspectos relacionados as condições ambientais e a infraestrutura dos aterros sanitários devem ser consideradas, assim como, tipo de solo, variáveis climáticas, tipologias de resíduos, idade dos resíduos, sistema operacional, número de drenos verticais, camada de solo de cobertura dos resíduos, grau de compactação da camada de cobertura e do aterro e gestão das águas pluviais no aterro.

A maior atenção a emissão fugitiva de gás metano nos aterros sanitários, sobretudo na busca pela sua redução, representa de fato ganhos ambientais e econômicos significativos, aumentando a comercialização do próprio gás metano e créditos de carbono e produção de energia elétrica.

As práticas sugeridas nesta obra, são de baixo custo e de simples implementação no aterro sanitário e podem proporcionar benefícios interessantes. Aperfeiçoar a recuperação de metano no aterro sanitário, representa um insumo energético importante, renovável e em consonância com as diretrizes e legislações atuais de biogás e biomassa.

O uso do metano é uma fonte energética com grande potencial atual e futuro, ampliando-se o aproveitamento energético do metano com a produção de energia elétrica e purificação para geração de combustível veicular.

O aproveitamento do metano representa excelente contribuição para a prática da sustentabilidade, proporcionando desenvolvimento tecnológico, ganhos ambientais e sociais, com a geração de empregos e renda.

ISBN 978-65-86212-58-7

