

FATORES INTERVENIENTES NA OXIDAÇÃO BIOLÓGICA DO METANO EM ATERRO SANITÁRIO: UMA REVISÃO

INTERVENING FACTORS IN THE BIOLOGICAL OXIDATION OF METHANE IN LANDFILL: A REVIEW

FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA OXIDACIÓN BIOLÓGICA DEL METANO EN RELLENO SANITARIO: UNA REVISIÓN

Rafaela Franqueto¹

Resumo

Emissões gasosas em aterros sanitários resultam da decomposição anaeróbia de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) e o subproduto dessas emissões é a produção de biogás. A quase totalidade do biogás proveniente da degradação da matéria orgânica é emitida para a atmosfera na forma de emissões pontuais; ou seja, através do sistema de drenagem do aterro e fugitivas, e nesse caso, pela camada de cobertura do solo do aterro sanitário. Para mitigar as emissões fugitivas pela camada de cobertura, estudos que abordam a oxidação biológica do metano na camada de cobertura têm sido desenvolvidos. A presente pesquisa elencou as principais características de uma camada de cobertura, bem como os fatores que podem interferir na oxidação biológica do metano e no controle das emissões fugitivas em aterros sanitários.

Palavras-chave: Biogás. Emissões de gases. Emissões fugitivas. Oxidação biológica.

Abstract

Gaseous emissions from landfills are the result of anaerobic decomposition of Municipal Solid Waste (MSW) and biogas production is its subproduct. Almost all the biogas from the degradation of organic matter is emitted to the atmosphere in the form of point emissions; it happens through the landfill drainage system and fugitive, in this case, the land cover layer of the landfill. To mitigate fugitive emissions by the cover layer, studies comprising the biological oxidation of methane in the cover layer have been developed. The present research listed the main characteristics of a cover layer as well as the factors that may interfere in the biological oxidation of methane and, consequently, in the control of fugitive emissions in landfills.

Keywords: Biogas. Gas emissions. Fugitive emissions. Biological oxidation.

Resumen

Emisiones gaseosas en rellenos sanitarios resultan de la descomposición anaeróbica de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) y el subproducto de esas emisiones es la producción de biogás. La casi totalidad del biogás proveniente de la degradación de la materia orgánica se dispersa en la atmósfera bajo la forma de emisiones puntuales, es decir, a través del sistema de drenaje del relleno y de las fugas que, en ese caso, se producen por la cobertura del suelo del relleno sanitario. Para disminuir las fugas por la capa de cobertura, se han desarrollado estudios que tratan la oxidación biológica del metano en la capa de cobertura. Esta investigación presenta las principales características de una capa de cobertura, así como los factores que pueden interferir en la oxidación biológica del metano y en el control de las fugas de emisiones de los rellenos sanitarios.

Palabras-chave: Biogás. Emisiones de gases. Fuga de emisiones. Oxidación biológica.

1 Introdução

¹ Engenheira Ambiental e Mestre em Engenharia Sanitária e Ambiental (Universidade Estadual do Centro-Oeste), Doutoranda em Engenharia Ambiental (Universidade Regional de Blumenau). E-mail: rafaela.eng@meioambiente.eng.br.

No Brasil, a destinação final de resíduos sólidos urbanos (RSU) é um sério problema ambiental. Esse problema tende a se acentuar devido ao aumento da renda e consumo de bens e serviços pela população, o qual acarreta um crescimento no volume desses resíduos.

As emissões de gases em aterros sanitários resultam da decomposição anaeróbia dos RSU. Como subproduto da degradação dos RSU, tem-se a geração de biogás — que pode afetar negativamente o meio ambiente, caso não seja adequadamente gerido. Devido ao potencial combustível do metano, a recuperação do biogás gerado em aterros sanitários para fins energéticos se constitui em uma opção que pode ser interessante economicamente e que vem ao encontro da crescente demanda por combustíveis renováveis e da preocupação internacional com a sustentabilidade.

Estudos de campo têm mostrado que mais de 90% das emissões de metano pela camada de cobertura podem ser reduzidas com uma cobertura final adequada, associada a uma eficiente coleta de gás. Para mitigar essas emissões superficiais, estudos que compreendem a quantificação dos gases e a oxidação biológica do metano na camada de cobertura vêm sendo desenvolvidos (Barlaz *et al.* 2004; Scheutz *et al.* 2004; Abichou *et al.* 2006; Stern *et al.* 2007; Cabral *et al.* 2010; Roncato; Cabral, 2012; Capanema, 2013). O processo de oxidação biológica auxilia na redução das emissões fugitivas e pode ser considerado com um método para redução de metano em pequenos e antigos aterros que não possuam sistema de coleta de gases (NG *et al.* 2014) ou quando os gases do aterro são produzidos em quantidades muito pequenas (BAHR *et al.* 2006). A barreira de oxidação passiva do metano serve de habitat para os microrganismos metanotróficos, que utilizam o metano como fonte de carbono e energia, transformando-o em dióxido de carbono, água e biomassa celular (MARINHO; SOUSA, 2010).

2 Resíduos sólidos urbanos

A geração de resíduos é uma característica relacionada à atividade humana e tende a se agravar com o maior consumo de bens descartáveis, gerando um aumento na produção de resíduos com destinação final, muitas vezes, inadequada (HUSE, 2007; PARO, *et al.* 2008). Neste cenário, a gestão dos resíduos sólidos urbanos representa um grande desafio para os centros urbanos atualmente.

Resíduo sólido urbano é o termo destinado para conceituar “lixo” e resulta das atividades domésticas e comerciais, tendo a sua composição variando de local para local. A

sigla utilizada para o termo é RSU, reportada em livros, artigos e revistas da área de gestão de resíduos (PORTAL RESÍDUOS SÓLIDOS, 2017).

Por definição, de acordo com a Norma ABNT NBR 10.004:2004, resíduos sólidos urbanos (RSU) são os rejeitos de origem doméstica e os procedentes de: comércio, limpeza de vias públicas, escritórios, serviços, mercados, feiras, festejos, materiais e eletrodomésticos inutilizados. Este conceito é ainda estendido aos lodos provenientes de estações de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, e aos líquidos cujo lançamento na rede pública de esgotos ou corpos hídricos não é recomendável, devido as suas particularidades (ABNT, 2004).

Os resíduos sólidos urbanos podem ainda ser definidos com base no texto da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) do Brasil (Lei Federal nº 12.305/2010, regulamentada pelo Decreto Federal nº 7404/2010) que, em seu Artigo 13, traz uma definição mais clara dos resíduos dessa natureza: “a) resíduos domiciliares: os originários de atividades domésticas em residências urbanas; b) resíduos de limpeza urbana: os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana” (BRASIL, 2010).

Vale ressaltar, ainda, que a Lei no 12.305/2010 aborda um conjunto de princípios, objetivos, instrumentos e diretrizes com vistas à gestão integrada e ao gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos (BRASIL, 2010; BECHARA, 2013).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos busca novas soluções para o gerenciamento adequado dos resíduos sólidos e isso deve ser encarado como um desafio para toda a sociedade (setor público e privado). A melhoria somente será alcançada se todos estiverem comprometidos com a implementação de tais ações na construção de um mundo sustentável.

Os RSU representam hoje um dos principais temas no que se refere à gestão ambiental em centros urbanos. No Brasil, segundo dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), foram geradas, no ano de 2014, 215.297 toneladas de resíduos sólidos por dia; dessas toneladas, 195.233 foram coletadas diariamente (ABRELPE, 2014). A mesma pesquisa relatou a realidade da disposição dos RSU empregada no Brasil: 17,4% em lixões (vazadouros a céu aberto), 24,2% em aterros controlados e 58,4% em aterros sanitários (ABRELPE, 2014), que seria a alternativa mais viável para disposição e tratamento dos RSU, de forma ambientalmente segura (MACHADO *et al.* 2009).

3 Aterro sanitário

A disposição em aterros sanitários é o método mais utilizado para o tratamento e destinação final dos RSU (STAUB *et al.* 2011), por apresentar menor custo e maior minimização dos impactos ambientais quando comparada às outras formas de tratamento de RSU como incineração e compostagem. A NBR 8419 da ABNT (1992) define aterro sanitário como: uma técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos sem causar danos à saúde pública e à segurança, minimizando os impactos ambientais. Este método utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho ou a intervalos menores, se for necessário.

Além de um método de disposição final, o aterro sanitário atua no tratamento dos RSU, o que pode ser avaliado em termos de produção de biogás, que pode ser proporcional à taxa de redução da matéria orgânica (IMRE *et al.* 2009). Nesse contexto, os aterros representam cerca de 20% da emissão global anual de metano na atmosfera (USEPA, 2010). No Brasil, os RSU representam cerca de 12% das fontes emissoras de metano (VAN ELK, 2007); os gases oriundos do processo de degradação dos resíduos nos aterros brasileiros geralmente são tratados com a queima simples.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos havia definido metas para adequação da destinação final de resíduos até o ano de 2014; contudo, o Projeto de Lei do Senado no 425, de 2014, estendeu o prazo até o ano de 2024. O prazo foi estendido para que o Brasil tenha a estrutura necessária para dar a destinação adequada a todo tipo de resíduo sólido, ou seja, eliminação de lixões, associada à inclusão social e à autonomia econômica dos catadores de resíduos recicláveis e reutilizáveis.

No aterro sanitário, mesmo com o reaproveitamento do biogás, direcionando-o do interior das células para fontes pontuais (drenos de captação) ou para poços de bombeamento (para o aproveitamento nas usinas de geração de energia elétrica), grande parte do gás gerado atravessa o sistema de cobertura (camada de solo) na forma de emissões fugitivas (MACHADO *et al.* 2009; MACIEL; JUCÁ, 2011). Nesses casos, emissões fugitivas de metano podem ser controladas por sistemas que visem à minimização de emissões, em especial com sua oxidação por bactérias metanotróficas no solo de cobertura (GEBERT, *et al.* 2003; BÖRJESSON, *et al.* 2004; GEBERT; GRÖNGRÖFT, 2006). A oxidação de metano tem sido sugerida como uma tecnologia de baixo custo (IPCC, 2007), não requerendo manutenção específica, o que reduz os custos referentes à fase de pós-fechamento (MARINHO; SOUSA, 2010).

4 Camada de cobertura em aterro sanitário

Tradicionalmente, a camada de cobertura é definida como um recurso de engenharia para fechamento e isolamento dos resíduos confinados com o ambiente externo (MACIEL, 2003; GUEDES, 2007). Além de isolar, algumas outras funções da camada de cobertura foram reportadas por Teixeira (2008): auxilia na minimização da geração de lixiviado após o fechamento do aterro, auxilia no escoamento superficial de água, evita o espalhamento de resíduo ou poeira, acomoda possíveis recalques das camadas de resíduos, previne contra proliferação de vetores e permite que o local possa ser utilizado com algum benefício social.

Paralelamente a todas as funções explicitadas acima, a camada de cobertura tem uma grande importância na minimização da emissão de gases nos aterros sanitários (GUEDES, 2007), bem como na oxidação do metano (TEIXEIRA, 2008). Plaza *et al.* (2007) e Cabral *et al.* (2007) mostraram que, além de cumprir o seu papel de controlar a infiltração, uma camada de cobertura pode agir como uma barreira, reduzindo a difusão de gases e odores, bem como atenuar as emissões de biogás para atmosfera.

A Tabela 1 apresenta algumas taxas de oxidação de metano encontradas na literatura e as profundidades das camadas que contribuem para esse efeito.

Tabela 1: Taxas de oxidação de metano na camada de cobertura reportadas na literatura

Referências	Tipo de estudo	Taxa de oxidação (g/m ² .dia)	Máxima oxidação verificada entre
Whalen, Reeburgh & Sandbeck (1990)	Laboratório	45	0 – 0,12 m
Czepiel <i>et al.</i> (1996)	Laboratório	1,1 – 70	0,05 – 0,10 m
Borjensson & Svensson (1997)	Laboratório	3,4-403	0,50- 0,60 m
Cabral <i>et al.</i> (2010)	Campo	804	0,60 – 0,80
Capanema <i>et al.</i> (2013)	Campo	166,8	0 – 0,40

O maior consumo de metano ocorre em profundidades menores e refere-se a presença de matéria orgânica, responsável pela oxidação, exceto para os valores encontrados por Borjensson & Svensson (1997) e Cabral *et al.* (2010), que observaram a máxima oxidação ocorrendo entre 0,50 – 0,80 m da camada de cobertura.

De acordo com Maciel (2003) e Lopes *et al.* (2010), os sistemas de cobertura empregados nos aterros sanitários podem ser dos mais variados. Os mais relevantes encontrados na literatura são: camada homogênea de argila (com graduações distintas) e, mais

recentemente, o emprego de materiais alternativos, como solos com maior percentagem orgânica, lodos de estações de tratamento de água e esgoto, cinzas de processo de incineração etc.

Em virtude dos diversos tipos de sistemas de coberturas, surgiram novas concepções para as camadas de cobertura, as chamadas camadas alternativas. Assim, forma-se uma cobertura econômica e eficiente para aterros de resíduos, levando em consideração a oxidação biológica do metano (TEIXEIRA, 2008). De acordo com o IPCC (2007), essas camadas representam uma alternativa atraente economicamente para o tratamento de emissões fugitivas de metano.

Quando a estrutura da camada de cobertura é particularmente concebida para apoiar a oxidação de metano, alguns dos parâmetros podem ser otimizados, por exemplo, diferentes tipos de materiais com composição orgânica, conforme salientado na literatura.

5 Mecanismos e fatores intervenientes no transporte de gases

Conhecer os mecanismos de transporte de gases, através dos resíduos sólidos e na camada de solo, é de fundamental importância para o estudo de camadas de cobertura de aterros de resíduos e, em particular, para coberturas de oxidação de metano (Teixeira, 2008).

Os gases apresentam mecanismos de movimentação e transformação que incluem difusão, advecção sorção e atenuação microbiológica (COOPER *et al.* 1992; POULSEN; MOLDRUP 2006; SCHUETZ *et al.* 2009).

5.1 Difusão

Difusão dos gases se refere ao movimento do gás associado a um gradiente de pressão parcial e concentração (RANNAUD, *et al.* 2009, ou seja, é a passagem do contaminante (líquido ou gasoso) de uma região de alta concentração para outra de menor concentração.

Gebert, *et al.* (2011), reportam que solos de cobertura com materiais menos compactados apresentam maiores taxas de difusão do solo, devido à menor densidade do solo, permitindo assim a passagem dos gases.

5.2 Advecção

Durante a degradação anaeróbia de resíduos, o metano tende a ocupar mais volume do que o volume dos espaços vazios naturais do solo. Isso criará um aumento de volume,

aumento da pressão dos poros nas camadas mais externas e, por conseguinte, um gradiente de pressão ascendente. Assim, este gradiente de pressão promove a migração de biogás contida no interior do solo para a superfície (ABICHOU *et al.* 2006).

No mecanismo advectivo, o movimento dos compostos com o fluxo de massa de gases (para cima e lateralmente) e/ou líquidos (para baixo e lateralmente) é realizado através dos espaços vazios entre os resíduos (COOPER *et al.* 1992).

5.3 Sorção e atenuação microbiológica

Sorção é o mecanismo que pode retardar a movimentação dos contaminantes pela forma com que o composto interage com as camadas do solo (COOPER *et al.* 1992). O fenômeno envolve a partição do contaminante em outros subcompostos (MACIEL, 2003).

A atenuação microbiológica é o processo que reduz os gases emitidos pelo aterro sanitário. Esse processo reduz a massa de um contaminante com estruturas mais complexas em substâncias de características mais simples (inofensivas), por meio do emprego de microrganismos (COOPER *et al.* 1992). Um exemplo de atenuação é a transformação do principal componente do biogás, o metano, em dióxido de carbono, pelas bactérias metanotróficas em ambientes aeróbios.

6 Fatores de influência para oxidação biológica do metano pela camada de cobertura

A oxidação do metano é um fenômeno biológico natural que ocorre em solos com presença de bactérias, onde o metano é aerobiamente oxidado para dióxido de carbono, (GEBERT; GRÖNGRÖFT, 2006).

Como todos os processos bioquímicos, a oxidação do metano depende da disponibilidade de todos os substratos envolvidos, neste caso, o metano e oxigênio (RACHOR *et al.* 2011). Assim, a oxidação biológica é considerada uma alternativa importante para a mitigação de emissões fugitivas, a partir de aterros sanitários (STREESE; STEGMANN, 2003; GEBERT & GRÖNGRÖFT, 2006; HUBER-HUMER *et al.* 2008).

Salienta-se que, na literatura, pouco é encontrado sobre os parâmetros que afetam a oxidação do metano em cobertura de aterros sanitários. Alguns parâmetros de elevada importância no processo de oxidação serão abordados a seguir.

6.1 Microrganismos metanotróficos

A oxidação ocorre quando as bactérias metanotróficas interceptam o gás à medida que migram pela camada de cobertura em direção à atmosfera e transformam o metano em dióxido de carbono (WIDORY *et al.* 2012). Ao sair pela camada de cobertura, o metano torna-se fonte de carbono para as bactérias metanotróficas. Essas bactérias oxidam o metano e o transforma em dióxido de carbono e água (HUMER; LECHNER, 2001; GEBERT; GROENGROEFT, 2006), conforme a Equação 1:



Whalen, *et al* (1990) foram os precursores em estudos de metanotróficas e estimaram que as bactérias são capazes de consumir cerca de 50% do metano que é emitido pela superfície do aterro. Maciel (2009) constatou, em aterros brasileiros, que bactérias metanotróficas podem consumir cerca de 10-20% do metano que percola pelo solo de cobertura.

6.2 Grau de saturação

O grau de saturação de água é a razão entre o volume ocupado pela água e o volume total de vazios. Assim, quanto maior o grau de saturação, menor é o espaço existente para a migração de gás (CABRAL *et al.* 2008). De acordo com Cabral *et al.* (2004), o grau de saturação de água superior a 85% resulta em uma redução do fluxo de gás limitando, assim, a oxidação de metano.

6.3 Teor de umidade

O teor de umidade se apresenta como um parâmetro fundamental. Está diretamente relacionado com o grau de saturação do solo (ABICHOU *et al.* 2008). Abichou *et al.* (2010) relataram que a atividade microbiana tende a aumentar com o maior teor de umidade do solo, podendo atingir uma oxidação relativamente alta quando o solo atinge um teor em água superior a 18-20%. Da mesma forma, se o solo é muito seco, a atividade de bactérias metanotróficas é inibida, e se o solo está muito molhado, a difusão de oxigênio pode limitar a sua atividade (CHANTON *et al.* 2011).

6.4 Porosidade do solo

A porosidade afeta diretamente a entrada de oxigênio molecular (O₂) e a migração ascendente de metano no solo (ASKRI, 2008; SALIM, 2011), o que influencia os coeficientes de difusão dos gases. Quando a água preenche os poros do solo, ocorre um “bloqueio” do fluxo ascendente do gás e, ao mesmo tempo, a redução da emissão de metano devido ao excesso de pressão acumulada no aterro (YUAN, 2006). Isso faz com que as taxas de oxidação diminuam, pois o “bloqueio” ocasiona a compactação do solo de cobertura, o que aumenta a densidade e dificulta a passagem dos gases de meio anaeróbico para aeróbico (GEBERT, *et al* 2011).

6.5 Temperatura do solo

As bactérias metanotróficas preferem temperaturas entre 10°C e 35°C; logo, no verão, a atividade biológica de oxidação aumenta com a elevação das temperaturas, tal como indicado por estudos realizados por Whalen, *et al* (1990); Venugopal, *et al* (2010); Spokas & Bogner, (2011).

6.6 pH do solo

O pH do solo não é um fator comprovado, embora na literatura exista uma indicação de que pH na faixa de 6,5 a 8,5 favoreça o crescimento de bactérias metanotróficas. Segundo Scheutz & Kjeldsen, (2004), o pH ótimo para a oxidação do metano e para o crescimento das bactérias metanotróficas é o da neutralidade (6,5 - 7,5).

6.7 Pressão atmosférica

Variações na pressão atmosférica afetam o fluxo de oxigênio no solo, especialmente se a camada for muito porosa (GEBERT; GROENGROEFT, 2006). O aumento da pressão atmosférica provoca a entrada de oxigênio e promove a oxidação do metano. O fenômeno oposto ocorre quando se diminui a pressão atmosférica (SALIM, 2011).

6.8 Teor de matéria orgânica do solo

Segundo Letourneau (2010), com o aumento da matéria orgânica do solo, aumenta-se também a atividade oxidativa. Um teor de matéria orgânica menor que 3% é insuficiente para suportar a oxidação de metano.

Em estudos realizados por Stern *et al.* (2007), em biocobertura, evidenciou-se que a colocação de camada de solo com maior teor de matéria orgânica melhora as propriedades do solo.

6.9 Mensuração

A mensuração dificulta a implantação de um SGA devido à dificuldade de encontrar uma correlação matemática entre os fatores e os ganhos associados a um determinado objetivo. Contudo, esses fatores devem ser avaliados com base nas experiências de quem está avaliando e nas informações do setor a qual a organização faz parte. É sem dúvidas, uma das partes mais complexas e muito pouco abordadas dentro das organizações. Se fosse amplamente discutida dentro da própria organização poderia diminuir erros nos resultados da implantação do sistema por um todo, o torna o sistema mais eficaz.

7 Considerações finais

De acordo com os dados reportados na literatura, a camada de cobertura em aterro sanitário atua na redução de gases (odoríferos e do efeito estufa), principalmente quando parâmetros ou fatores sejam modificados para o melhor aproveitamento das funções do solo da camada de cobertura.

Nesse sentido, boas práticas de gerenciamento dos resíduos sólidos auxiliam na redução de gases de efeito estufa, tal como preconizado em acordos e legislações. A PNRS definiu metas para a adequação da destinação final dos RSU no Brasil, eliminando os lixões, realizando a inclusão social e a autonomia de catadores de resíduos com capacidade de reutilização e recicláveis. Sendo assim, como a destinação dos RSU precisa ser adequada, modificações no solo de cobertura dos aterros sanitários corrobora para a mitigação das emissões, principalmente as fugitivas.

Referências

ABICHOU, Tarek *et al.* Characterization of methane flux and oxidation at a solid waste landfill. **Journal of Environmental Engineering**, Reston, v. 132, n. 2, p. 220-228, 2006.

ABICHOU, T.; YUAN, L.; CHANTON, J. **Estimating methane emission and oxidation from earthen landfill covers**. 2008. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/40970%28309%2910>. Acesso em: 23 jul. 2020.

ABICHOU, Tarek *et al.* Developing a design approach to reduce methane emissions from California landfills. *In: GeoFlorida 2010: Advances in Analysis, Modeling & Design*. Reston: American Society of Civil Engineers, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8419**: Apresentação de Projetos de Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004**: Resíduos Sólidos: Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ABRELPE (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil de 2014**. 2014. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2014.pdf>. Acesso em: 15 set. 2015.

ASKRI, M.A. **Suivi de l'efficacité de trois bio-recouvrements d'oxydation passive du méthane installés sur un site d'enfouissement**. 2008. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Quebec, Canadá, 2008.

BAHR, Tobias *et al*; **Clean development mechanism**: tratamento de resíduos sólidos e oxidação de gás metano para minimização de emissões. 2006. Disponível em: <http://www.resol.com.br/trabtec3.asp?id=1589>. Acesso em: 15 fev. 2015.

BARLAZ, M.A.; GREEN, R.B.; CHANTON, J.P.; GOLDSMITH, C.D.; HATER, G.R. Evaluation of a Biologically Active Cover for Mitigation of Landfill Gas Emissions, **Environmental Science & Technology**, Washington, v., 38, p. 4891-4899, 2004.

BECHARA, Erika. **Aspectos relevantes da Política Nacional de Resíduos Sólidos**: Lei no 12.305/2010. São Paulo: Atlas, 2013.

BÖRJESSON, G.; SUNDH, I.; SVENSSON, B. Microbial oxidation of CH₄ at different temperatures in landfill cover soils. **FEMS Microbiology Ecology**, Oxford, v. 48, n. 3, p. 305, 2004.

BRASIL. **Lei Federal nº 12.305, de 02 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília: Presidência da República, 2010a. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 14 out. 2014.

CABRAL, A. R., P. TREMBLAY, *et al.* Determination of the diffusion coefficient of oxygen for a cover System composed of pulp and paper residues. **Geotechnical Testing**, West Conshohocken, v. 27, p. 184-197, 2004.

CABRAL, A. R. *et al.* **Analysis of methane oxidation and dynamics of methanotrophs within a passive methane oxidation barrier**. 2007. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/230708592_Analysis_of_methane_oxidation_and_dynamics_of_methanotrophs_within_a_passive_methane_oxidation_barrier. Acesso em: 15 fev. 2015.

CABRAL, A. R.; MOREIRA, J. F.; ASKRI, M. A.; SANTOS, A. K.; JUGNIA, L. B. **Engineering landfill covers for methane oxidation: lessons learned**. 2008. Disponível em : https://www.researchgate.net/publication/230708603_Engineering_landfill_covers_for_methane_oxidation_lessons_learned. Acesso em: 15 fev. 2015.

CABRAL, A. Alexandre; MOREIRA, J.F.V.; JUGNIA, L.-B. Biocover Performance of Landfill Methane Oxidation: Experimental Results. **Journal of Environmental Engineering**, New York, v.136, 2010.

CAPANEMA, M. A. *et al.* **Methane oxidation efficiencies of a 6-year-old experimental landfill biocover**. 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/257870003_Methane_oxidation_efficiencies_of_a_6-year-old_experimental_landfill_biocover. Acesso em: 15 fev. 2015.

CHANTON, J.; ABICHO, T.; LANGFORD, C.; SPOKAS, K.; HATER, G.; GREEN, R.; GOLDSMITH, D.; BARLAZ, M.A. Observations on the methane oxidation capacity of landfill soils, **Waste Management**, Houston, v.31, p. 914-925, 2011.

COOPER, C. D.; REINHART, D. R.; RASH, F.; SELIGMAN, D.; Keely, D.; **Landfill Gas Emission: Report #92-2**. Florida: Florida Center for Solid and Hazardous Waste Management, 1992.

CZEPIEL, P.M.; MOSHER, B.; HARRISS, R.C.; SHORTER, J.H.; McMANUS, J.B.; KOLB, E.; ALLWINE, E.; LAMB, B.K. Landfill methane emissions measured by enclosure and atmospheric tracer methods, **Journal of Geophysical Research**, Washington, v.101, n.16, p.711-719, 1996.

GEBERT, J.; GROENGROEFT, A.; MIEHLICH, G. Kinetics of microbial landfill methane oxidation in biofilters. **Waste Management**, Houston, v. 23, n. 7, p. 609-619, 2003.

GEBERT, J.; GROENGROEFT, A. Passive landfill gas emission – Influence of atmospheric pressure and implications for the operation of methane-oxidising biofilters. **Waste Management**, Houston, v. 26, n. 3, p. 245-251, 2006.

GEBERT, J.; GROENGROEFT, A.; PFEIFFER, E. M. Relevance of soil physical properties for the microbial oxidation of methane in landfill covers. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v. 43, n. 9, 1759-1767, 2011.

GUEDES, V. P. **Estudo do fluxo de gases através do solo de cobertura de aterro de resíduos sólidos urbanos**. 2007. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

HUBER-HUMER, M.; GEBERT, J.; HILGER, H. Biotic systems to mitigate landfill methane emissions. **Waste management & research: the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association**, Viena, v. 26, n. 1, p. 33-46, 2008.

HUSE, K. **Estudo da influência da adição de bentonita em um solo arenosiltoso para uso como cobertura de aterros**. 2007. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pós-

graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

IMRE, E.; KOVÁCS, K. L.; BAGI, Z.; ÁCS, N.; PEREI, R. K.; BARTHA, I.; TRANG P. Q.; TELEKES, G. Biotechnological methods to increase landfill gas production. *In*: TWELFTH INTERNATIONAL WASTE MANAGEMENT AND LANDFILL SYMPOSIUM, 2009, S. Margherita di Pula, **Anais [...]**. S. Margherita di Pula: Forte Village Resort, 2009.

IPCC. **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. 2007. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar4/wg1/>. Acesso em: 27 jun. 2019.

LETOURNEAU, Michelle. **Réduction des émissions de gaz à effet de serre par des biorecouvrements d'oxydation passive du méthane**: caractérisation des matériaux candidats, essais du potentiel d'oxydation en laboratoire et construction de deux parcelles expérimentales sur le site d'enfouissement de Saint-Nicéphore, Québec. l'Université de Sherbrooke, 2010.

LOPES, Régia Lúcia; JUCÁ, José Fernando Thomé; MARIANO, Maria Odete Holanda; MACIEL, Felipe Jucá. Camadas de cobertura metanotróficas como alternativas para gerenciamento de gases de efeito estufa em aterros sanitários. **Holos**, Natal, v.4, p.1-16, 2010.

MACHADO, S.L.; CARVALHO, M.F.; GOURC, J.P.; VILAR, O.M.; NASCIMENTO, J.C.F.do. Methane generation in tropical landfills: simplified methods and field results. **Waste Management**, Houston, v.2, p. 153-161, 2009.

MACIEL, F. J. **Estudo da geração, percolação e emissão de gases no aterro de resíduos sólidos da Muribeca/PE**. 2003. 173 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, 2003.

MACIEL, F. J. **Geração de biogás e energia em aterro experimental de resíduos sólidos urbanos**. 2009. 335f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, 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**, Houston, v. 31, p. 966-977 2011.

MARINHO, F.A.M.; SOUSA, L.de. Projeto de pesquisa sobre sistema de cobertura de aterro de RSU para oxidação biológica do metano. **Revista Limpeza Pública**, São Paulo, v.73, p. 6-13, 2010.

NG, C. W. W.; FENG, S.; LIU, H. W. A fully coupled model for water-gas-heat reactive transport with methane oxidation in landfill covers. **The Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 508, p. 307–319, 2014.

PARO, A.de.C.; COSTA, F.C.da.; COELHO, S.T. Estudo comparativo para o tratamento de resíduos sólidos urbanos: aterros sanitários x incineração. **Revista Brasileira de Energia**, Curitiba, v.14, n. 2, p. 113-125, 2008.

- PLAZA, C.; XU, Q.; TOWNSEND, T.; BITTON, G.; BOOTH, M. Evaluation of alternative landfill cover soils for attenuating hydrogen sulfide from construction and demolition (C&D) debris landfills. **Journal of Environmental Management**, Washington, v. 84, p. 314-322, 2007.
- POULSEN, T.G.; MØLDRUP, P. Evaluating effects of wind-induced pressure fluctuations on soil-atmosphere gas exchange at a landfill using stochastic modeling. **Waste Management and Research**, Houston, v. 24, p. 473-481, 2006.
- PORTAL RESÍDUOS SÓLIDOS. **Gestão e Gerenciamento de Resíduos**. Disponível em: <http://www.portalresiduossolidos.com/gestao-e-gerenciamento/>. Acesso em: 15 ago. 2017.
- RACHOR, I. *et al.* Assessment of the methane oxidation capacity of compacted soils intended for use as landfill cover materials. **Waste Management**, Houston, v. 31, n. 5, p. 833-842, 2011.
- RANNAUD, D.; CABRAL, A., ALLAIRE. S.E. Modeling methane migration and oxidation in landfill cover materials with TOUGH2-LGM. **Water Air Soil Pollut**, New York, v.198, p. 253-267, 2009.
- RONCATO, Camila D.L.; CABRAL, A.R. Evaluation of methane oxidation efficiency of two biocovers: field and laboratory results. **Journal of Environmental Engineering**, Washington, v. 138, 2012.
- RONCATO, Camila D. L.; CABRAL, Alexandre R. Evaluation of Methane Oxidation Efficiency of Two Biocovers: field and laboratory results. **Journal of Environmental Engineering**, Washington, v. 138, n. 2, p. 164-173, 2012. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)ee.1943-7870.0000475](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)ee.1943-7870.0000475).
- SALIM, K.G. **Oxidação passiva do metano em ensaios de coluna simulando camadas de cobertura de aterros sanitários**. 2011. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.
- SCHEUTZ, C.; KJELDSSEN, P. Environmental factors influencing attenuation of methane and hydrochlorofluorocarbons in landfill cover soils. **Journal of Environmental Quality**, Washington, v. 33, p. 72-79, 2004.
- SPOKAS, K. A.; BOGNER, J. E. Limits and dynamics of methane oxidation in landfill cover soils. **Waste management**, Houston, v. 31, n. 5, p. 823-32, 2011.
- STAUB, M. J. *et al.* An incremental model to assess the environmental impact of cap cover systems on MSW landfill emissions. **Geotextiles and Geomembranes**, Amsterdam, v. 29, n. 3, p. 298-312, 2011.
- STERN, J. C. *et al.* Use of a biologically active cover to reduce landfill methane emissions and enhance methane oxidation. **Waste management**, Houston, v. 27, n. 9, p. 1248-58, 2007.
- STREESE, J.; STEGMANN, R. Microbial oxidation of methane from old landfills in biofilters. **Waste Management**, Houston, v. 23, n. 7, p. 573-580, 2003.

TEIXEIRA, P. F. **Oxidação Biológica do Metano em Coberturas de Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos**: dinâmica do processo e aspectos geotécnicos. 2008. 167 f. Tese (Doutorado em Engenharia Geotécnica) – Pós-graduação, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

USEPA. **Municipal Solid Waste Generation, Recycling, and Disposal in the United States**: facts and figures for 2010. United States Environmental Protection Agency: 2010. Disponível em: https://archive.epa.gov/epawaste/nonhaz/municipal/web/pdf/msw_2010_factsheet.pdf. Acesso em: 23 jun. 2020.

VAN ELK, A. G. H. P. Redução de emissões na disposição final. *In*: SEGALA, K. **Mecanismo de desenvolvimento limpo aplicado a resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: IBAM, 2007. 40 p.

VENUGOPAL, S.; CHANDRAKANTHI, M.; HETTIARATCHI, P. **Treating Methane (CH₄) Emissions from Oil and Gas Industry**, 2010. Disponível em: http://www.coalinfo.net.cn/coalbed/meeting/2203/papers/naturalgas/N_G023.pdf. Acesso em: fev. 2015.

WHALEN, S. C.; REEBURGH, W. S.; SANDBECK, K. A. Rapid methane oxidation in a landfill cover soil. **Applied and Environmental Microbiology**, Washington, v. 56, n. 11, p. 3405-3411, 1990.

WIDORY, D. *et al.* Assessing methane oxidation under landfill covers and its contribution to the above atmospheric CO₂ levels: the added value of the isotope ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ CO₂; $\delta^{13}\text{C}$ and δD CH₄) approach. **Waste management**, Houston, v. 32, n. 9, p. 1685-92, 2012.

YUAN, Lei. **Methane Emission and Oxidation Through Landfill Covers**. 2006. 122 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) – Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Florida State University, Florida, 2006.