XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/73

Camadas de Cobertura em Aterros Sanitários e Emissões de Biogás: Uma Revisão Sistemática e Análise Bibliométrica

Mariana Guimarães de Moraes Rocha
Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, mariana_rocha@discente.ufg.br

Laís Roberta Galdino de Oliveira
Professora Adjunta, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, laisroberta@ufg.br

RESUMO: A gestão de resíduos sólidos urbanos permanece um desafio crítico, especialmente em países em desenvolvimento, onde a elevada fração orgânica dos resíduos intensifica a geração de biogás. Em aterros sanitários, a decomposição anaeróbia produz predominantemente metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), gases cujo fluxo depende de condições físico-químicas e biológicas do ambiente. As camadas de cobertura desempenham papel essencial no controle das emissões fugitivas, especialmente do CH_4, que tem potencial de aquecimento global é 28 vezes superior ao CO_2. Este estudo realizou uma revisão sistemática e análise bibliométrica sobre camadas de cobertura em aterros sanitários e sua relação com a emissão de biogás, abrangendo publicações científicas dos últimos 20 anos (2005–2025), identificando 16 artigos relevantes. Os resultados evidenciam que sistemas alternativos, como biocoberturas e coberturas vegetadas, se destacam pela maior eficiência na oxidação microbiana do metano e redução nas emissões de biogás. As lacunas identificadas incluem a necessidade de padronização de metodologias de medição e estudos a longo prazo em coberturas de solos lateríticos. Além disso, avanços recentes oferecem subsídios para o desenvolvimento de soluções mais eficazes para mitigação de gases de efeito estufa em aterros sanitários.

PALAVRAS-CHAVE: Caracterização geotécnica, Emissões fugitivas, Barreira de argila, Camadas alternativas, Sistema de cobertura.

ABSTRACT: Municipal solid waste management remains a critical challenge, especially in developing countries, where the high organic fraction of waste intensifies biogas generation. In sanitary landfills, anaerobic decomposition predominantly produces methane (CH_4) and carbon dioxide (CO_2), gases whose flux depends on the physicochemical and biological conditions of the waste mass. Cover layers play an essential role in controlling fugitive emissions, particularly CH_4, a gas with a global warming potential 28 times higher than that of CO_2. This study conducted a systematic review and bibliometric analysis of landfill cover layers and their relationship with biogas emissions, encompassing scientific publications from the last 20 years (2005–2025) and identifying 16 relevant articles. The results demonstrate that alternative systems, such as biocovers and vegetated covers, stand out for their higher efficiency in microbial methane oxidation and reduction in biogas emissions. The identified gaps include the need for standardized measurement methodologies and long-term studies on lateritic soil covers. Furthermore, recent advances provide support for the development of more effective solutions for mitigating greenhouse gases in landfills.

KEYWORDS: Geotechnical characterization, Fugitive emissions, Clay barrier, Conventional layer, Cover system.

1 INTRODUÇÃO

A gestão dos resíduos sólidos urbanos (RSU) constitui um dos principais desafios ambientais e de saúde pública da atualidade, sobretudo em países em desenvolvimento, onde a rápida urbanização intensifica a geração de resíduos (HOORNWEG; BHADA-TATA, 2012). No cenário normativo brasileiro, essa prática passou por uma reestruturação com a promulgação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010. Sob a ótica da PNRS, o aterro sanitário deixa de ser um receptor genérico de resíduos para se tornar o destino final exclusivo de rejeitos. Nesse contexto, a implantação de aterros

sanitários tecnicamente planejados e cientificamente fundamentados, capazes de mitigar riscos ao meio ambiente e à saúde pública, torna-se uma necessidade imprescindível diante das demandas da atualidade (OSAZEE, 2021).

A biodegradação da fração orgânica dos RSU em aterros sanitários ocorre por meio de processos físicos, químicos e biológicos, que evoluem em estágios temporais distintos, resultando na geração de lixiviados e de biogás constituído majoritariamente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2) (TEIXEIRA et al., 2009).

As camadas de cobertura utilizadas em aterros sanitários desempenham papel fundamental no controle das emissões gasosas, especialmente do metano, principal componente do biogás produzido em aterros sanitários, que possui potencial de aquecimento global 28 vezes superior ao dióxido de carbono em um período de 100 anos, conforme relatórios do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2013).

Segundo Maciel (2009), a estimativa do potencial de geração de biogás em aterros de RSU no Brasil representa um desafio significativo em decorrência dos modelos utilizados no país, que se baseiam em referências internacionais, se mostrado pouco satisfatórios quando aplicados ao contexto brasileiro. Além disso, Maciel (2009) afirma que os projetos de aproveitamento energético existentes enfrentam limitações técnicas decorrentes de previsões imprecisas de produção de biogás, possivelmente devido ao uso de parâmetros desenvolvidos para aterros que operam sob condições climáticas, características de resíduos e práticas operacionais substancialmente distintas das encontradas no Brasil.

Apesar da consolidação dos sistemas de extração ativa via drenos verticais e horizontais para queima ou valorização energética, a gestão do biogás em aterros é comprometida pela eficiência de coleta reduzida (50-75%), pelos custos elevados de instalação e manutenção e pela ocorrência de emissões fugitivas substanciais através das camadas de cobertura (SPOKAS et al., 2006).

Diante deste cenário, o presente estudo tem como objetivo realizar uma revisão sistemática e análise bibliométrica da produção científica sobre a influência das camadas de cobertura de aterros sanitários nas emissões de biogás, identificando: (i) os artigos mais citados e suas contribuições principais; (ii) os autores mais influentes na área; (iii) os periódicos de maior relevância; e (iv) as tendências e lacunas do conhecimento atual. Esta análise visa fornecer subsídios técnico-científicos para o desenvolvimento de estratégias mais eficientes de controle de emissões de metano em aterros sanitários brasileiros, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O aterro sanitário é capaz de receber diferentes tipos de resíduos e funciona como um reator dinâmico, uma vez que, em seu interior, ocorrem diversas reações químicas e biológicas resultantes da decomposição da matéria orgânica, onde os principais elementos de entrada são os resíduos e a água, enquanto os elementos de saída correspondem aos gases e aos lixiviados gerados ao longo do processo de degradação (ELK, 2007).

Segundo dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Urbana e Ambiental (ABREMA, 2024), aproximadamente 45,3% dos resíduos sólidos urbanos produzidos no Brasil é composto por matéria orgânica, o que evidencia um expressivo potencial energético associado ao aproveitamento do biogás gerado durante a decomposição desses materiais.

2.1 Geração de Biogás em Aterros Sanitários

A formação de gases em aterros de resíduos sólidos urbanos é um processo complexo, influenciado tanto pela diversidade dos materiais depositados quanto pelos múltiplos processos físico-químicos e biológicos que ocorrem ao longo do tempo , sendo produzido principalmente pela degradação microbiana da matéria orgânica sob condições anaeróbias, e com composição variando de acordo com as características dos resíduos submetidos à decomposição, resultando na variação de composição do biogás em diferentes regiões do aterro sanitário (MARIANO, 2008).

De acordo com a Enviroment Agency (2004), existem algumas variáveis que podem alterar a composição dos gases em um aterro sanitário, entre elas podemos citar a idade e as propriedades físico-químicas do resíduo, as características hidráulicas do local, a temperatura, armazenamento e pré-tratamento, entre outras.

Os principais componentes do biogás gerado em aterros sanitários são o metano (CH_4) e o dióxido de carbono (CO_2), que juntos podem representar cerca de 99% do total de gases emitidos, sendo que o CH_4 varia entre 30% e 70% do total de gases gerado no aterro sanitário, e o CO_2 compõe de 20% a 50% dos gases produzidos (MACIEL, 2009). Maciel (2009) afirma ainda que existem outros compostos, como hidrogênio (H_2), nitrogênio (N_2), oxigênio (O_2), sulfeto de hidrogênio (H_2S) e monóxido de carbono (CO), que podem estar presentes no ambiente dependendo da fase de biodegradação e das condições ambientais do sistema. Nikiema et al. (2007) reforça que as concentrações desses gases variam de acordo com o tipo de resíduo disposto e a idade do aterro sanitário.

Nos primeiros anos de operação do aterro sanitário a taxa de emissão de biogás cresce rapidamente, atingindo valores elevados em um curto período, e posteriormente, observa-se um declínio gradual e contínuo dessas emissões, sendo que a maior parte da produção de CH_4 e CO_2 ocorre nos primeiros 20 anos após a disposição dos resíduos podendo persistir por 50 anos ou mais, dependendo das condições ambientais e operacionais do aterro (NIKIEMA et al., 2007).

A decomposição biológica dos resíduos em aterros sanitários ocorre tanto em condições aeróbias (aqueles que dependem do O_2 para se desenvolverem) quanto anaeróbias (aqueles que atuam na ausência de O_2), conforme descrito por Kumar et al. (2004), e podem ocorrer simultaneamente em diferentes regiões do maciço de resíduos (USACE, 2008). A oxidação microbiana do metano é um processo biológico natural realizado por bactérias metanotróficas (micro-organismos que utilizam metano como única fonte de carbono e energia), ocorrendo naturalmente em ambientes onde ele coexiste com o oxigênio, como nas coberturas de aterros sanitários, onde as bactérias metanotróficas se estabelecem e se adaptam às condições do meio (TEIXEIRA et al., 2009).

2.2 Sistemas de Cobertura de um Atero Sanitário

Um aterro sanitário configura-se como uma área destinada à disposição controlada de resíduos sólidos, organizada em células nas quais os materiais são depositados e, ao final de cada jornada de trabalho, recobertos por uma camada de solo de 300 mm de espessura , chamada cobertura diária ou cobertura operacional (ABNT, 2010). Essa prática visa reduzir a infiltração de água de chuva, evitar o arraste de materiais leves pelo vento, atenuar odores e inibir a presença de animais e a proliferação de vetores, contribuindo para melhores condições sanitárias e ambientais (DANIEL, 1993)

As coberturas intermediárias são utilizadas em setores do aterro sanitários onde não haverá disposição de resíduos por um intervalo aproximado de 60 a 90 dias, mas que voltarão a receber materiais em fases posteriores da operação (CHETRI; REDDY, 2021). O autor afirma ainda que a cobertura final é aplicada quando o aterro sanitário atinge sua capacidade projetada de disposição, promovendo o encerramento definitivo da célula ou do maciço como um todo.

Segundo Mariano (2008), as camadas de cobertura das células de um aterro sanitário atuam como uma barreira isolante entre o maciço de resíduos e o meio externo, reduzindo a infiltração de água pluvial na massa de resíduos e contendo a liberação de gases para a atmosfera. O autor supracitado ressalta que essa camada deve apresentar baixa permeabilidade e elevada durabilidade, tornando a seleção dos materiais e do sistema de cobertura adotados no fechamento do aterro sanitário, um aspecto crucial do projeto, diretamente vinculado ao desempenho operacional e ambiental da instalação.

Mariano (2008) acrescenta que existem dois tipos principais de sistemas de cobertura final, sendo eles os sistemas convencionais (que utilizam camadas de solo argiloso compactado como barreira hidráulica) e os sistemas alternativos (que utilizam diferentes tipos de solo ou uma mistura de solo com outros tipos de materiais) atuando como barreira física e promovendo a oxidação do metano. A escolha entre o uso de uma camada de cobertura convencional ou alternativa depende de variáveis como as condições climáticas locais, a disponibilidade de solos argilosos adequados e os custos de implantação, destacando as coberturas alternativas (em especial as do tipo oxidativa e evapotranspirativa) por demonstrarem maior eficiência no controle das emissões gasosas e menor custo quando comparadas às soluções tradicionais (MARIANO, 2008).

3 METODOLOGIA

A revisão sistemática e análise bibliométrica foi conduzida através de buscas estruturadas em bases de dados científicas reconhecidas internacionalmente. A estratégia metodológica seguiu as diretrizes PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) adaptadas para estudos bibliométricos.

Foram consultadas as bases de dados Scopus (Elsevier), Web of Science (Clarivate Analytics) e Science Direct (Elsevier), com o período de análise de 2005 a 2025. Para a string de busca, utilizou-se os termos: ("landfill") AND ("cover layer" OR "final cover" OR “landfill cover system”) AND ("biogas emission" OR "methane”) AND (“geotechnical" OR “geotechnics”).

Os critérios de inclusão foram baseados em artigos publicados em periódicos, sem restrição quanto ao idioma, contemplando estudos empíricos, modelagens numéricas, revisões sistemáticas e estudos de caso, todos voltados para as interações entre camadas de cobertura e emissões de biogás em aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Os critérios de exclusão adotados foram capítulos de livros, teses e dissertações, publicações duplicadas e estudos sem relação direta com o tema.

Após a aplicação dos critérios de seleção, foram identificados inicialmente 144 documentos potencialmente relevantes, sendo 11 deles em duplicata, restando 133 documentos. Realizando uma análise sistemática desses artigos, percebeu-se um extensivo número de publicações com uma abordagem fragmentada ou com o escopo limitado para o propósito desse estudo, sendo eliminados subsequentemente. Entre eles, pesquisas de simulações numéricas e análise do fluxo de gás dentro do aterro sanitário, geração de biogás a partir dos componentes de RSU, reaproveitamento e geração de energia através da emissão de biogás, projetos de poços de coleta e modelos numéricos ou estudos de emissão, oxidação ou permeabilidade ao gás da biocobertura desconsiderando o efeito da camada de cobertura. Ademais, foram detectados 2 artigos de revisão da literatura e 4 trabalhos sem acesso para a classificação, que também foram retirados da seleção, restando 16 artigos incluídos na análise bibliométrica final.

Para cada publicação incluída, foram extraídos o título do artigo, autores, ano, periódico de publicação, número de citações, resumo, tipo de estudo e país de origem. A identificação dos pesquisadores de maior relevância foi realizada com base de dados da plataforma Scopus. Os critérios de seleção basearam-se no volume de publicações indexadas, no índice de impacto (índice-h) e na frequência de citações em periódicos. Para a compilação dos dados e análise dos títulos e resumo utilizou-se o Parsifal e Microsoft Excel.

4 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A análise bibliométrica permitiu identificar os principais trabalhos, autores, periódicos e países que vêm contribuindo para o avanço do conhecimento sobre camadas de cobertura aplicadas à mitigação das emissões de biogás em aterros sanitários. Os resultados evidenciam a consolidação das biocoberturas como estratégia promissora para redução das emissões de metano, além de revelar tendências de pesquisa, centros de excelência científica e lacunas que ainda demandam investigação. A Tabela 1 apresenta os 5 artigos mais citados.

Tabela 1. Artigos mais citados.

Rank	Autores	Ano	Título	Periódico	Citações
1	Louis-B. Jugnia; Alexandre R. Cabral; Charles W. Greer	2008	Biotic methane oxidation within an instrumented experimental landfill cover.	Ecological Engineering	74
2	Erin N. Yargicoglu; Krishna R. Reddy	2017	Effects of biochar and wood pellets amendments added to landfill cover soil on microbial methane oxidation: A laboratory column study.	Journal of Environmental Management	71
3	Felipe J. Maciel; José F. T. Jucá	2011	Evaluation of landfill gas production and emissions in a MSW large-scale Experimental Cell in Brazil.	Waste Management	70

4	Charles W. W. Ng; Zhong-K. Chen; Jason L. Coo; Rui Chen and Chao Zhou	2015	Gas breakthrough and emission through unsaturated compacted clay in landfill final cover.	Waste Management	70
5	Yun-Y. Lee; Hyekyeng Jung; Hee-W. Ryu; Kyung-C. Oh; Jun-M. Jeon; Kyung-S. Cho	2018	Seasonal characteristics of odor and methane mitigation and the bacterial community dynamics in an on-site biocover at a sanitary landfill.	Waste Management	46

Os artigos mais citados concentram-se principalmente na avaliação da eficiência de camadas de cobertura para oxidação biológica do metano e no desenvolvimento de materiais capazes de aumentar a retenção e o tratamento do biogás. O estudo de Jugnia et al. (2008) destaca-se como a principal referência da área, evidenciando a relevância das biocoberturas experimentais para mitigação das emissões de metano. Da mesma forma, Yargicoglu e Reddy (2017) demonstraram o potencial do biochar como material promotor da atividade metanotrófica. Os trabalhos de Maciel e Jucá (2011) reforçam a importância de estudos realizados em regiões tropicais, enquanto Ng et al. (2015) ampliam a compreensão dos mecanismos físicos de migração gasosa em coberturas compactadas. Em conjunto, esses estudos constituem a base científica que sustenta o desenvolvimento atual das tecnologias de cobertura para aterros sanitários.

A análise dos autores de maior impacto, apresentado na Tabela 2, evidencia forte concentração da produção científica em pesquisadores ligados às áreas de engenharia geotécnica e engenharia ambiental. Charles W. W. Ng apresenta o maior impacto científico, refletindo sua contribuição para os estudos sobre transporte gasoso em meios não saturados. Krishna R. Reddy destaca-se pelos avanços relacionados à utilização de materiais alternativos para aumento da oxidação biológica do metano. No contexto latino-americano, José Fernando Thomé Jucá representa importante referência, sobretudo em pesquisas desenvolvidas sob condições climáticas tropicais, frequentemente sub-representadas na literatura internacional.

Tabela 2. Autores de maior impacto.

Rank	Autores	Instituição	Publicações	Citações	Índice-h
1	Charles W. W. Ng	HKUST	667	27.815	89
2	Krishna R. Reddy	University of Illinois Chicago	527	16.731	70
3	José F. T. Jucá	UFPE	62	865	14
4	Erin N. Yargiçoğlu	Chicago Faculty of Engineering	18	1.347	13
5	Jason L. Coo	Frann Builders Corporation	21	870	13

A identificação dos periódicos de maior impacto revela os principais veículos de disseminação do conhecimento na área e estão exibidos na Tabela 3. Os resultados demonstram clara predominância do periódico Waste Management, responsável por quase metade das publicações identificadas. Esse cenário indica que a temática está fortemente associada às pesquisas sobre gestão de resíduos sólidos urbanos e tecnologias de aterros. A dispersão dos demais estudos em diferentes periódicos sugere caráter multidisciplinar da área, envolvendo engenharia ambiental, geotecnia e ciências ambientais.

Tabela 3. Periódicos de maior impacto.

Periódico	Frequência (%)
Waste Management	43,75
Environmental Science and Pollution Research	6,25

Periódico	Frequência (%)
Ecological Engineering	6,25
Journal of Environmental Management	6,25
Science of the Total Environment	6,25
Outros	31,25

A distribuição geográfica das publicações revela maior participação de Brasil, Estados Unidos e China, cada um representando 18,75% dos estudos identificados. A presença brasileira merece destaque devido à relevância dos desafios associados à gestão de resíduos em regiões tropicais, onde as elevadas temperaturas e a umidade favorecem taxas mais intensas de degradação dos resíduos. Observa-se ainda baixa cooperação internacional entre os países líderes (somente índia e Estônia), indicando potencial para ampliação de redes colaborativas capazes de acelerar o desenvolvimento tecnológico e a transferência de conhecimento. Na Figura 1 é possível visualizar a influencia de cada país.

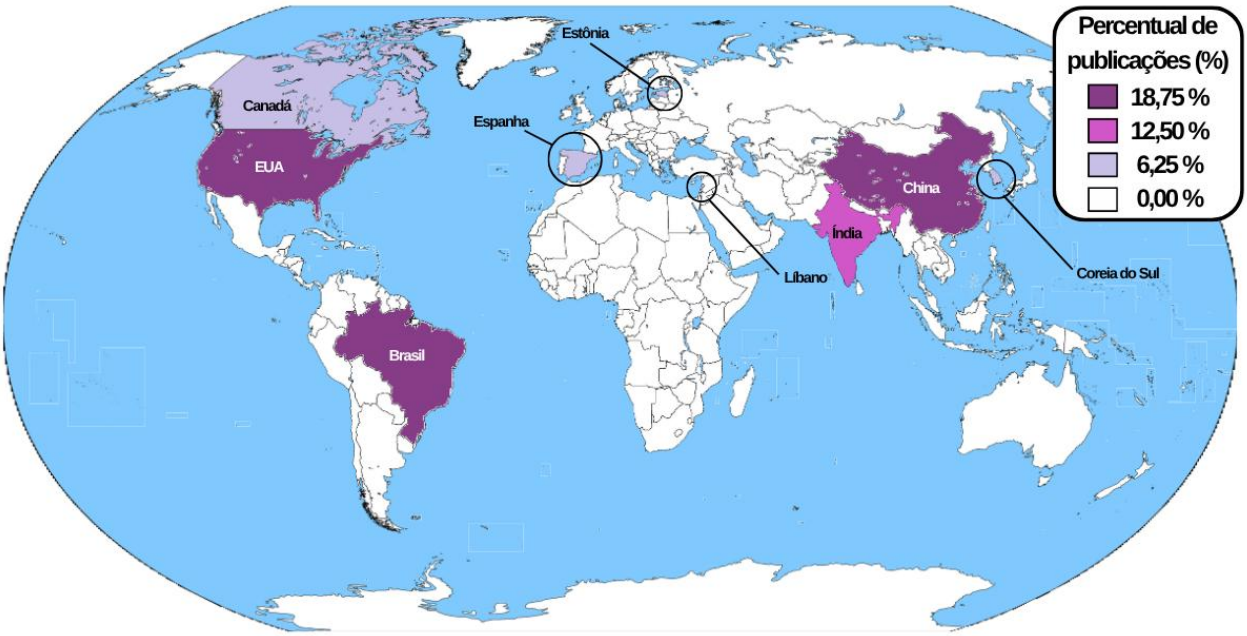


Figura 1. Distribuição geográfica das publicações sobre camadas de cobertura e emissões de biogás em aterros sanitários.

Em termos gerais, os resultados demonstram que as camadas de cobertura biológica para oxidação microbiana de metano constituem uma tecnologia consolidada e cientificamente validada para mitigação das emissões de biogás em aterros sanitários. Entretanto, permanecem desafios importantes relacionados à adaptação dessas tecnologias às condições climáticas tropicais, à escassez de monitoramentos de longo prazo e à ausência de metodologias padronizadas para comparação entre estudos.

Adicionalmente, observa-se a necessidade de avaliações econômicas mais robustas, capazes de subsidiar decisões de gestão e formulação de políticas públicas. O desenvolvimento de novos materiais de cobertura, associados à integração de tecnologias complementares de captura e tratamento de biogás, representa uma das principais tendências para pesquisas futuras. A superação dessas lacunas poderá ampliar a eficiência ambiental dos aterros sanitários e contribuir significativamente para as metas globais de redução das emissões de metano.

5 CONCLUSÕES

A presente revisão sistemática e análise bibliométrica consolidou o conhecimento científico acumulado sobre camadas de cobertura em aterros sanitários e suas relações com emissões de biogás, abrangendo 16 publicações selecionadas criteriosamente no período de 2005 a 2025. As principais conclusões incluem:

- Eficácia comprovada da oxidação microbiana: Camadas oxidativas bem projetadas alcançam eficiências de oxidação de metano entre 35% a 90%, podendo variar sazonalmente conforme a temperatura ambiente, constituindo alternativa viável e ambientalmente superior aos sistemas convencionais.
- Materiais promissores identificados: Compostos de resíduos orgânicos demonstraram desempenho superior devido a propriedades físicas adequadas (porosidade e retenção de umidade), disponibilidade de nutrientes e presença de comunidades metanotróficas ativas. Materiais emergentes como biochar e perlita com húmus de minhoca, apresentam potencial significativo.
- Periódicos de referência: Waste Management se consolida com o principal veículo de disseminação científica sobre essa temática, concentrando 7 publicações, sendo elas: "Effects of biochar-amended soils as intermediate covers on the physical, mechanical and biochemical behaviour of municipal solid wastes" (China), "Emission assessment at the Burj Hammoud inactive municipal landfill: Viability of landfill gas recovery under the clean development mechanism" (Líbano), "Evaluation of landfill gas production and emissions in a MSW large-scale Experimental Cell in Brazil" (Brasil), "Full-scale experimental study of methane emission in a loess-gravel capillary barrier cover under different seasons" (China), "Gas breakthrough and emission through unsaturated compacted clay in landfill final cover" (China), "Quantification of methane emissions in a Mediterranean landfill (Southern Spain), "A combination of flux chambers and geostatistical methods" (Espanha) e "Seasonal characteristics of odor and methane mitigation and the bacterial community dynamics in an on-site biocover at a sanitary landfill" (Coreia do Sul).
- Lacunas e direções futuras: (1) escassez de modelos específicos em climas tropicais (2) monitoramentos de longo prazo, (3) análises econômicas detalhadas, (4) padronização metodológica, (5) desenvolvimento de materiais inovadores e (6) integração otimizada de tecnologias complementares.
- Perspectiva multidisciplinar essencial: A natureza interdisciplinar do tema, integrando microbiologia, engenharia ambiental, ciência do solo, química atmosférica e políticas públicas, requer abordagens colaborativas para desenvolvimento de soluções efetivas.

A consolidação do conhecimento apresentada nesta revisão demonstra que as soluções técnicas para mitigação das emissões de metano em aterros sanitários estão disponíveis e testadas. O desafio remanescente reside na implementação em larga escala, superando barreiras econômicas, institucionais e de capacitação técnica.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal de Goiás (UFG) e ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil (PPGGECON) pelo suporte institucional que viabilizou o desenvolvimento deste trabalho. À CAPES, pelo apoio financeiro imprescindível à pesquisa. Expresso ainda minha sincera gratidão à minha orientadora, Profa. Dra. Laís Roberta Galdino de Oliveira, pela dedicação, orientação criteriosa e incentivo constante ao longo de todo o estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2010). NBR 15849: *Resíduos sólidos urbanos – Aterros sanitários de pequeno porte – Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Resíduso e Meio Ambiente (2024). *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil*. Disponível em: <https://www.abrema.org.br/panorama/>. Acesso em: 1 de setembro de 2025.

Brasil (2010). Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. *Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos*; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, 2010.

Chetri, J.K., Reddy, K.R. (2021). Advancements in Municipal Solid Waste Landfill Cover System: A Review. *Journal of the Indian Institute of Science*, 101, p. 557–588, 2021.

C.W.W. Ng; Z.K. Chen; J.L. Coo; R. Chen and C. Zhou (2015). Gas breakthrough and emission through unsaturated compacted clay in landfill final cover. *Waste Management*, 44, p. 155-163.

Daniel, D.E. (1993). *Geotechnical practice for waste disposal*. Springer–Science+Business Media, B.V, Texas, EUA, p. 686.

Elk, A. G. H. P. (2007). *Redução de emissões na disposição final. (Mecanismo de desenvolvimento limpo aplicado a resíduos sólidos - MDL)*. Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-eprogramas/saneamento/pmss/biblioteca-virtual/serie-mdl-residuos-solidos>.

Environment agency (2004). *Guidance on monitoring landfill gas surfasse emissions*. Inglaterra, p. 63, 2004.

Erin N. Yargicoglu; Krishna R. Reddy (2017). Effects of biochar and wood pellets amendments added to landfill cover soil on microbial methane oxidation: A laboratory column study. *Journal of Environmental Management,* 193, p. 19-31.

Hoornweg, D., Bhada-tata, P. (2012). *What a waste: A Global Review of Solid Waste Management*. Urban Development Series , No. 15. Washington, DC, p 116.

IPCC (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 222.

Kumar, S., Mondal, A.N., Gaikwad, S.A., Devotta S., Singh, R.N (2004). Qualitative assessment of methane emission inventory from municipal solid waste disposal sites: a case study. *Atmospheric Environment*, 38(29), p. 4921-4929.

Louis-B. Jugnia; Alexandre R. Cabral; Charles W. Greer (2008). Biotic methane oxidation within an instrumented experimental landfill cover. *Ecological Engineering*. 33(2), p. 102-109.

Maciel, F. J. (2009). *Geração de biogás e energia em aterro experiemental de resíduos sólidos urbanos*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco.. Recife, p. 355.

Maciel, F. J.; Jucá J. F. T. (2011). Evaluation of landfill gas production and emissions in a MSW large-scale Experimental Cell in Brazil. *Waste Management,* 31(5), p. 966-977.

Mariano, M. O. H. (2008). *Avaliação da retenção de gases em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, p. 243.

Nikiema, J.; Brzezisnki, R.; Heitz, M. (2007) Elimination of methane generated from landfills by biofiltration: a review. *Environmental Science Biotechnology*, 6, p. 261-284.

Osazee, I. T. G. (2021). Landfill in a Sustainable Waste Disposal. *European Journal of Environment and Earth Sciences*, 2(4), p. 67–74.

Spokas, K.; Bogner, J.; Chanton, J. P.; Morcet, M.; Aran, C.; Graff, C.; Golvan, Y. M.; Hebe, I. (2006). Methane mass balance at three landfill sites: What is the efficiency of capture by gas collection systems? *Waste Management*, 26(5), p. 516-525.

Teixeira, C.E.; Torves, J.C.; Finotti, A.R.; Fedrizzi, F.; Marinho, F.A.M. (2009). Estudos sobre a oxidação aeróbia do metano na cobertura de três aterros sanitários no Brasil. *Revista Engenharia Sanitária Ambiental*, 14(1), p. 99-108.

US Army corps of engineers. (2008). *Landfill Off-Gas Collection and Treatment Systems: Engineer manual*. Washington, DC.

Yun-Yeong Lee; Hyekyeng Jung; Hee-Wook Ryu; Kyung-Cheol Oh; Jun-Min Jeon; Kyung-Suk Cho (2018). Seasonal characteristics of odor and methane mitigation and the bacterial community dynamics in an on-site biocover at a sanitary landfill. *Waste Management,* 71, p. 277-286.