Potencial de mitigação de aterros superemissores no Brasil

Estimativa do potencial de mitigação de metano e dos custos de redução por meio de observações satélite e modelagem de custos do sistema de gás do aterro

1 Resumo executivo

Este estudo avaliou as emissões de metano e as oportunidades de mitigação em 66 aterros no Brasil identificados como superemissores de metano por meio de observações de metano por satélite da Carbon Mapper, coletadas de 19 de setembro de 2024 a 7 de julho de 2026. Com base em observações anualizadas da Carbon Mapper, processadas por meio de propagação de incertezas via método de Monte Carlo, os locais avaliados emitem cerca de 642 quilotoneladas de metano por ano ($ktCH_4$/ano), o que equivale a aproximadamente 29% das emissões de metano do setor de disposição de resíduos sólidos do Brasil, conforme relatado pelo Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG) do Brasil.

A análise estima que aproximadamente 456 $ktCH_4$/ano das emissões observadas (71%) poderiam ser mitigadas por meio da melhoria da captação e utilização do gás de aterro. A maior parte desse potencial (266 $ktCH_4$/ano) está associada a locais que já possuem sistemas de captação de gás instalados, indicando que a otimização e a expansão da infraestrutura existente podem ser tão importantes quanto a instalação de novos sistemas de captação de gás.

Os resultados mostram que um pequeno número de locais é responsável por uma parcela maior do potencial total de mitigação. Os 10 locais com maior emissão representam 37% do potencial total de mitigação dos 66 superemissores, enquanto os 20 locais com maior emissão representam 57%. Os 20 locais com maior emissão também apresentam os menores custos de redução, tornando-os candidatos atraentes para ações de curto prazo.

Em todos os aterros, a mitigação das emissões de metano por meio de intervenções no próprio aterro parece possível a um custo relativamente baixo. Dos 66 locais avaliados, 57 apresentam custos de redução inferiores a 10 dólares por tonelada de dióxido de carbono equivalente (USD/tCO_2e). O custo médio ponderado de redução é de aproximadamente 5 USD/tCO_2e para os 10 principais locais, aumentando para 7 USD/tCO_2e para os 20 principais locais. Para todos os aterros avaliados, os mercados de carbono, o financiamento climático e as receitas provenientes da utilização do gás do aterro poderiam ajudar a melhorar a viabilidade econômica dos projetos e possibilitar reduções adicionais de emissões.

De modo geral, os resultados indicam que é possível alcançar reduções substanciais de metano por meio de intervenções direcionadas a um número limitado de grandes aterros superemissores. Priorizar investimentos e esforços de mitigação nesses aterros superemissores, por meio da instalação de novos sistemas de captação de gás e da melhoria dos já existentes, poderia proporcionar um caminho rápido e econômico para a redução das emissões de metano do setor de resíduos do Brasil.

2 Contexto

De acordo com estimativas do Ministério das Cidades do Brasil, o país gerou e coletou aproximadamente 78 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos em 2023, das quais quase três quartos foram descartados em aterros sanitários, enquanto mais de 17 milhões de toneladas de resíduos ainda foram descartadas em aterros não sanitários controlados e lixões. O setor de resíduos emitiu aproximadamente 91 $MtCO_2e$ em 2022, sendo que o metano foi

Este relatório pode incluir conteúdo gerado por ferramentas de inteligência artificial generativa. A Carbon Limits sempre aplica critério profissional e processos de garantia de qualidade para verificar a precisão e a confiabilidade de todo o conteúdo

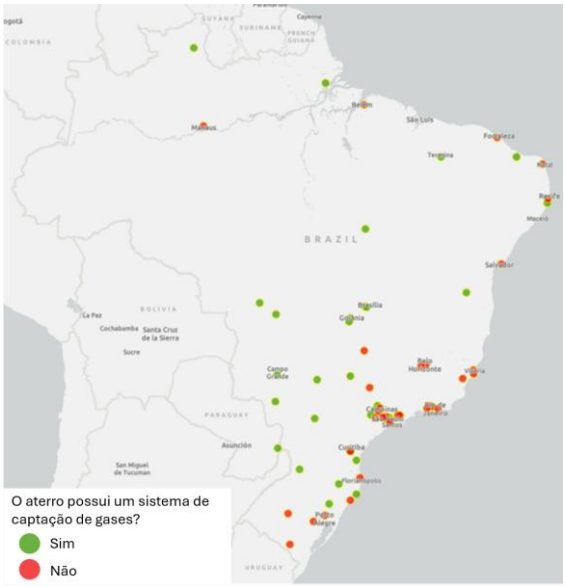
responsável por quase todas as emissões do setor. Os locais de disposição de resíduos sólidos contribuem com pouco mais da metade desse total (53 $MtCO_2e$), dos quais 82,5% se originaram de locais gerenciados.

Os sistemas existentes de captação de gás de aterros já contribuem significativamente para a mitigação do metano no Brasil. De acordo com o Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), aproximadamente 581 $ktCH_4$ foram recuperados de 54 aterros sanitários em 2024. O SEEG estima que essa recuperação tenha evitado, aproximadamente 25% das emissões de metano que, de outra forma, teriam sido liberadas pelos locais de descarte de resíduos. No entanto, permanecem incertezas significativas quanto às emissões reais e ao desempenho dos sistemas de gestão de metano existentes em todo o país.

Os avanços no monitoramento de metano por satélite criaram oportunidades para identificar e quantificar as emissões de aterros individuais, fornecendo um conjunto de dados complementar aos modelos existentes de emissões de aterros. As observações por satélite da Carbon Mapper revelaram uma série de superemissores de metano em aterros em todo o Brasil, proporcionando um meio de ir além das estimativas do inventário nacional e identificar instalações específicas responsáveis por uma grande parcela das emissões e que são alvo prioritário para ações de mitigação. Compreender a escala das emissões, o recurso de metano tecnicamente recuperável e os custos de redução associados ajudará a priorizar ações no âmbito da emergente Iniciativa Brasileira de Superemissores por Satélite e a direcionar recursos para instalações onde os maiores benefícios climáticos possam ser alcançados.

Este artigo técnico apresenta uma avaliação preliminar das emissões de metano, do potencial de mitigação e dos custos de redução para 66 locais de disposição de resíduos sólidos identificados por meio das observações da Carbon Mapper (ver Figura 1). O foco deste relatório são as ações de mitigação a jusante no local de disposição final, incluindo intervenções de projeto e gestão que podem ser realizadas em aterros sanitários e lixões no Brasil.

Figura 1 - Mapa dos aterros avaliados com (verde) e sem (vermelho) sistema de captação de gás existente



3 Abordagem analítica

A avaliação integra observações de metano derivadas de satélites da Carbon Mapper, informações operacionais específicas dos aterros, modelagem de decomposição de primeira ordem (FOD) e análise econômica para estimar as oportunidades de mitigação de metano em todo o portfólio de aterros identificados. Especificamente, a avaliação analisa:

- Emissões anuais de metano
- Potencial de mitigação de metano tecnicamente recuperável
- Custos de redução associados aos sistemas de captação e aproveitamento de gás de aterro

As emissões anuais de metano foram estimadas utilizando as taxas de emissão da fonte da Carbon Mapper em kg/hora, que foram convertidas para kt/ano, partindo do pressuposto de que as emissões observadas refletem condições médias anuais, e utilizadas como base principal para a análise de mitigação. Para levar em conta a incerteza de medição, as taxas de

Este relatório pode incluir conteúdo gerado por ferramentas de inteligência artificial generativa. A Carbon Limits sempre aplica critério profissional e processos de garantia de qualidade para verificar a precisão e a confiabilidade de todo o conteúdo

emissão da Carbon Mapper foram processadas utilizando a propagação de incerteza por Monte Carlo antes da conversão para emissões anuais.

Paralelamente, foi realizada uma modelagem FOD específica para aterros utilizando as informações disponíveis sobre quantidades de resíduos, composição dos resíduos, idade do aterro, condições climáticas e recuperação de gás de aterro. Embora as observações de satélite forneçam estimativas das emissões reais de metano no momento da detecção, o modelo FOD estima as emissões com base no histórico de descarte de resíduos e nos padrões esperados de decomposição. Considerando essas diferenças fundamentais nas abordagens de estimativa, os cálculos do FOD não foram utilizados diretamente para estimar o potencial de mitigação. Em vez disso, serviram como uma referência independente com a qual as estimativas de emissões totais baseadas em observações nos locais avaliados puderam ser comparadas, ajudando a identificar discrepâncias, avaliar a plausibilidade dos resultados e apoiar a interpretação das conclusões.

A avaliação de mitigação baseou-se nas emissões de metano observadas, derivadas da Carbon Mapper. Para todos os locais, presumiu-se que uma gestão aprimorada do gás de aterro poderia alcançar uma eficiência efetiva de captura de metano de 85%, consistente com sistemas de coleta de gás de aterro bem projetados e bem operados e representativa das boas práticas do setor. A eficiência real de coleta pode variar substancialmente entre os locais, e a suposição de 85% deve ser interpretada como uma meta ambiciosa de boas práticas, e não como o desempenho típico atual. Sob essa suposição, a análise estima a parcela das emissões de metano atualmente observadas que poderia ser evitada por meio da instalação de novos sistemas de coleta de gás de aterro ou da otimização e expansão da infraestrutura existente.

Os custos de redução foram estimados utilizando uma versão adaptada do modelo Landfill Gas Energy Cost (LFGcost) da EPA dos EUA. O modelo foi personalizado com base em premissas específicas do Brasil relacionadas a condições de financiamento, inflação, tributação, preços de eletricidade e custos operacionais, e foi utilizado para estimar as necessidades de capital dos projetos, despesas operacionais, receitas de recuperação de energia e custos de redução de gases de efeito estufa. As opções tecnológicas foram selecionadas de acordo com a vazão de metano e a presença de infraestrutura existente de captação de gás, permitindo que as oportunidades de mitigação fossem comparadas de forma consistente em todo o portfólio.

As estimativas resultantes de emissões, mitigação e custos devem ser interpretadas como indicadores de triagem, concebidos para apoiar a priorização de aterros e a tomada de decisões estratégicas. Elas não se destinam a substituir avaliações de engenharia detalhadas específicas para cada local, estudos de viabilidade ou avaliações de investimento.

4 Resultados

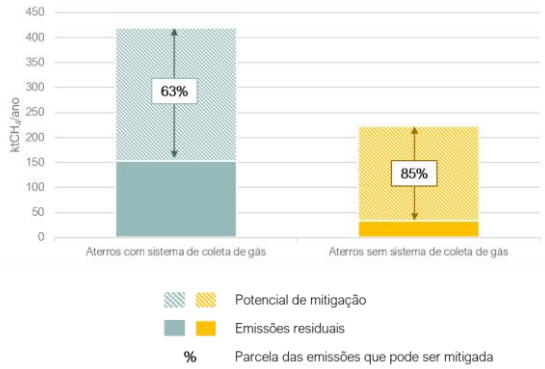
Estima-se que os aterros analisados emitam aproximadamente 642 $ktCH_4$/ano, o que representa cerca de 29% das emissões de metano relatadas para o setor de disposição final de resíduos do Brasil, segundo dados do SEEG. As emissões concentraram-se em um número reduzido de grandes aterros, e 65% das emissões observadas tiveram origem em locais onde já existiam sistemas de captação de gás do aterro.

A análise estimou que aproximadamente 456 $ktCH_4$/ano das emissões observadas poderiam ser mitigadas por meio de sistemas novos ou aprimorados de captação e aproveitamento de gás de aterro, o que equivale a cerca de 71% das emissões observadas e a cerca de 20% das emissões de resíduos sólidos relatadas para o Brasil em 2024. Conforme demonstrado na Figura 2, o potencial de mitigação para aterros sem infraestrutura de captação de gás existente é de 85% do total das emissões de metano, correspondendo à eficiência máxima de captação de metano simulada. Locais que já possuem infraestrutura de captação de gás apresentam um potencial de mitigação de cerca

Este relatório pode incluir conteúdo gerado por ferramentas de inteligência artificial generativa. A Carbon Limits sempre aplica critério profissional e processos de garantia de qualidade para verificar a precisão e a confiabilidade de todo o conteúdo

de 63%, indicando oportunidades significativas para otimização e expansão dos sistemas existentes. Essa expansão ou melhoria da eficiência de captação é, na prática, altamente específica para cada local e pode ser influenciada por uma variedade de fatores, incluindo a cobertura do sistema de captação de gás, a densidade, a profundidade e a manutenção dos poços, o tipo e as condições da cobertura do aterro, o manejo do lixiviado, bem como a idade e a quantidade de resíduos no local.

Figura 2 - Potencial de mitigação e emissões residuais[1] para aterros com e sem sistemas de coleta de gás existentes



Ao comparar aterros de propriedade privada e pública, uma parcela maior dos aterros de propriedade privada implementou sistemas de coleta de gás (69% dos aterros privados) do que os aterros de propriedade pública (22% dos aterros públicos).

Potencial total de redução

456 ktCH$_4$/ano

A análise econômica indica que a mitigação do metano em aterros pode, em geral, ser alcançada a um custo relativamente baixo. Um total de 57 dos 66 aterros apresentam custos de redução inferiores a 10 USD/tCO$_2$e, representando aproximadamente 95% do potencial total de mitigação.

O potencial de mitigação foi estimado partindo do pressuposto de que até 85% do gás gerado nos aterros poderia ser coletado, levando em consideração as emissões de metano observadas e os volumes de gás já recuperados. Os resultados mostram que um número relativamente pequeno de aterros é responsável por uma parcela substancial do potencial total de mitigação. Os 10 locais com maior emissão representam 37% do potencial total de mitigação, enquanto os 20 locais com maior emissão representam 57%. Esses locais também tendem a apresentar custos de redução mais baixos, em parte porque volumes maiores de metano podem ser capturados a um custo menor por tonelada de CO$_2$e. Os custos médios ponderados de redução são de aproximadamente 5 USD/tCO$_2$e para os 10 locais com maior emissão e de 7 USD/tCO$_2$e para os 20 locais com maior emissão. Isso sugere que priorizar intervenções nesses locais poderia proporcionar reduções substanciais de emissões a um custo relativamente baixo.

5 Implicações para a mitigação do metano no Brasil

Os resultados sugerem que os esforços de mitigação poderiam, inicialmente, concentrar-se em um número limitado de aterros superemissores, nos quais é possível alcançar reduções substanciais a custos de mitigação comparativamente baixos. Priorizar esses locais oferece um ponto de partida prático e pode apoiar esforços subsequentes em uma gama mais ampla de instalações.

É importante ressaltar que muitas das maiores oportunidades de mitigação estão associadas a aterros onde já existem sistemas de captação de gás de aterro. A presença de infraestrutura de captação não significa, portanto, que o potencial disponível de redução de metano tenha sido realizado. Melhorias nos sistemas existentes, incluindo a ampliação da cobertura de captação, detecção e reparo de vazamentos, melhor gestão

[1] As emissões residuais representam a parcela das emissões que permanece após a implementação das oportunidades de mitigação identificadas.

Este relatório pode incluir conteúdo gerado por ferramentas de inteligência artificial generativa. A Carbon Limits sempre aplica critério profissional e processos de garantia de qualidade para verificar a precisão e a confiabilidade de todo o conteúdo

da cobertura e otimização operacional, devem, portanto, ser consideradas juntamente com a instalação de novos sistemas.

Embora priorizar as oportunidades de menor custo ofereça um ponto de partida prático, pode ser necessário apoio financeiro adicional para estender os esforços de mitigação a outros aterros. Receitas do mercado de carbono, financiamento climático, apoio público e receitas provenientes da utilização do gás de aterro podem ser consideradas para melhorar a viabilidade econômica dos projetos e apoiar uma implementação mais ampla.

Observações de satélite, combinadas com dados no nível das instalações, modelos de emissões e monitoramento contínuo dos sistemas de coleta de gás, podem ajudar a identificar locais prioritários, acompanhar o progresso da mitigação e verificar as reduções de emissões ao longo do tempo. Juntas, essas abordagens podem apoiar o cumprimento das metas estabelecidas no âmbito da Iniciativa de Superemissores por Satélite do Brasil.

Por fim, embora as medidas avaliadas neste estudo ofereçam oportunidades para reduções de emissões no curto prazo, a mitigação do metano em aterros deve fazer parte de uma estratégia mais ampla de gestão de resíduos que também aborde a geração de resíduos e o desvio da disposição.

Principais resultados

- 642 $ktCH_4$/ano de emissões observadas
- 456 $ktCH_4$/ano de potencial de mitigação
- Os 20 locais com maior emissão representam 57% do potencial
- 57 locais com custo inferior a 10 USD/tCO_2e

6 Conclusões

- **A ação direcionada aos aterros superemissores pode proporcionar reduções substanciais**. 71% das emissões observadas poderiam ser potencialmente mitigadas por meio de uma melhor gestão dos gases do aterro, o que corresponde a 20% das emissões de resíduos sólidos relatadas pelo Brasil para 2024.
- **A melhoria da eficiência da coleta de gás existente oferece oportunidades significativas de mitigação**. A otimização e a expansão dos sistemas existentes podem proporcionar reduções adicionais substanciais nas emissões.
- **Uma abordagem direcionada pode ser altamente econômica**. Os 20 principais locais representam 57% do potencial de mitigação, enquanto 95% do potencial total está abaixo de 10 USD/tCO_2e.
- **As observações por satélite podem apoiar as ações e a definição de prioridades**. Combinadas com dados das instalações e monitoramento contínuo, elas podem ajudar a identificar as principais fontes de emissão e acompanhar os resultados das medidas de mitigação.

De modo geral, as conclusões sugerem que investimentos direcionados em aterros superemissores, particularmente por meio da melhoria do desempenho na coleta de gás, poderiam proporcionar reduções substanciais nas emissões de metano no curto prazo a um custo relativamente baixo, ao mesmo tempo em que proporcionariam benefícios colaterais para o meio ambiente, a saúde pública e a recuperação de energia. Esses esforços devem ser realizados em paralelo a medidas para reduzir a geração de resíduos e desviar resíduos orgânicos do descarte, combinando reduções imediatas nos aterros existentes com esforços de longo prazo para prevenir a geração de metano.

7 Referências

ABREMA. (2024). Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2024. Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente.

Barlaz, M. A., Chanton, J. P., & Green, R. B. (2009). Controls on landfill gas collection efficiency: Instantaneous and lifetime performance. Journal of the Air & Waste Management Association, 59(12), 1399-1404.

Carbon Limits. (2024). Methane super emitters: Low cost, high impact. Satellite insights on global methane super-emitters. Carbon Limits AS.

Este relatório pode incluir conteúdo gerado por ferramentas de inteligência artificial generativa. A Carbon Limits sempre aplica critério profissional e processos de garantia de qualidade para verificar a precisão e a confiabilidade de todo o conteúdo

Carbon Mapper. (2025). Global methane waste insight brief. Carbon Mapper.

Chen, Y., et al. (2022). Quantifying regional methane emissions in the New Mexico Permian Basin with a comprehensive aerial survey. Environmental Science & Technology, 56(7), 4317-4328.

Environmental Research & Education Foundation (EREF) (2025). Critical Analysis of Literature on Landfill Gas Collection Efficiency. Environmental Research & Education Foundation. Available at: www.erefdn.org.

Government of Brazil. (2024). Brazil national inventory report 2024. Ministry of Science, Technology and Innovation.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Volume 5: Waste. Chapter 3: Solid waste disposal. IPCC Task Force on National Greenhouse Gas Inventories.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2019). 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Volume 5: Waste. Chapter 3: Solid waste disposal. IPCC Task Force on National Greenhouse Gas Inventories.

Lair, A., Mansuy, M., Romand, C., Oberti, O., Pradels, C., Barina, G., Denoun, T., Venturini, M., & Trommsdorff, C. (2024). Enhancing landfill efficiency to drive greenhouse gas reduction: A comprehensive study on best practices and policy recommendations. Waste Management & Research.

Ministério das Cidades. (2025). Relatório dos serviços de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos: SINISA 2024 (ano de referência 2023). Governo Federal do Brasil.

Nazzari, E. C., et al. (2026). From waste to health: Landfill biogas recovery as a strategy for greenhouse gas mitigation and public health co-benefits in Brazil. International Journal of Environmental Research and Public Health, 23(5), 648.

Observatório do Clima. (2025). Análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil (1970-2024). Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG).

Scarpelli, T. R., et al. (2024). Investigating major sources of methane emissions at U.S. landfills. Environmental Science & Technology, 58, 21545-21556.

Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG). (2024). Waste sector: Final disposal methane emissions. Observatório do Clima.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2023). LFGcost-Web user's manual (Version 3.6). Landfill Methane Outreach Program.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2024). Landfill gas energy project development handbook. Landfill Methane Outreach Program.

Este relatório pode incluir conteúdo gerado por ferramentas de inteligência artificial generativa. A Carbon Limits sempre aplica critério profissional e processos de garantia de qualidade para verificar a precisão e a confiabilidade de todo o conteúdo