Potencial de mitigação de aterros superemissores no Brasil

Estimativa do potencial de mitigação de metano e dos custos de redução

Outubro de 2026



CARBON LIMITS

Resumo executivo

Este estudo avaliou as emissões de metano e as oportunidades de mitigação em 66 aterros no Brasil identificados como superemissores por meio de observações de satélite do Carbon Mapper, realizadas entre 19 de setembro de 2024 e 7 de julho de 2026. Com base em observações anualizadas da Carbon Mapper processadas por meio da propagação de incertezas do 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 Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa do Brasil (SEEG).

A análise estima que aproximadamente 456 $ktCH_4$/ano dessas emissões poderiam ser mitigadas por meio da melhoria na captação e utilização de gás de aterro, representando cerca de 71% das emissões observadas. 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.

Os resultados mostram que um número relativamente pequeno de locais é responsável por uma grande parcela 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%. Esses locais também apresentam os menores custos de redução, tornando-os candidatos atraentes para ações de curto prazo.

A redução das emissões de metano por meio de intervenções nos aterros parece ser uma oportunidade de mitigação de custo relativamente baixo no Brasil. Dos 66 locais avaliados, 57 apresentam custos de redução inferiores a 10 dólares por tonelada de dióxido de carbono equivalente (USD/tCO_2e) e representam 95% do potencial total de mitigação. O custo médio ponderado de redução é de aproximadamente 5 USD/tCO_2e para os 10 locais com maior emissão e de 7 USD/tCO_2e para os 20 locais com maior emissão. Os aterros com maior emissão oferecem, portanto, as oportunidades mais econômicas e poderiam ser priorizados para ações de curto prazo. Para locais com custos de redução mais elevados, os mercados de carbono, o financiamento climático e as receitas provenientes da utilização do gás de aterro poderiam ajudar a melhorar a viabilidade econômica dos projetos e possibilitar reduções adicionais de emissões.

De modo geral, os resultados indicam que reduções substanciais de metano podem ser alcançadas por meio de intervenções direcionadas em um número limitado de grandes aterros superemissores. Priorizar o investimento nesses locais por meio da instalação de novos sistemas de coleta de gás e da otimização e expansão dos sistemas existentes, com o apoio de monitoramento baseado em medições, poderia proporcionar um caminho rápido e econômico para a redução das emissões de metano do setor de resíduos do Brasil.

Índice

Resumo executivo 2
Índice 3
Abreviaturas 4
1 Introdução 6
1.1 Contexto do estudo 6
1.2 Emissões de metano de aterros no Brasil 6
1.3 Escopo e objetivos do estudo 7
2 Coleta de dados e caracterização dos locais avaliados 8
2.1 Características dos aterros 8
2.2 Conjunto de dados da Carbon Mapper 11
2.3 Parâmetros e pressupostos padrão 12
3 Abordagem analítica 14
3.1 Estimativa das emissões de metano 14
3.1.1 Propagação da incerteza do conjunto de dados da Carbon Mapper 14
3.1.2 Cálculos do modelo FOD 15
3.2 Estimativa do potencial de mitigação 15
3.2.1 Eficiência de captação de metano 15
3.2.2 Potencial de mitigação 17
3.3 Estimativa dos custos de redução 17
3.3.1 Seleção da estratégia de mitigação mais adequada 17
3.3.2 Parâmetros estimados de custo do projeto 18
3.3.3 Custos associados ao sistema de captação de gás 19
4 Resultados 20
4.1 Emissões de metano observadas por satélite 20
4.2 Emissões modeladas pelo FOD 23
4.3 Potencial de mitigação 25
4.4 Custos de redução 27
5 Discussão 30
5.1 Implicações para a mitigação do metano no Brasil 30
5.2 Comparação entre as emissões de FOD modeladas e as emissões observadas pela Carbon Mapper 31
5.3 Impacto de práticas alternativas de gestão de aterros 32
5.4 Benefícios colaterais da captação de gás de aterro 33
6 Conclusões 33
7 Referências 35

Abreviaturas

Abreviação	Definição
CAPEX	Despesas de capital
CATF	Clean Air Task Force
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CH_4	Metano
CO_2	Dióxido de carbono
CO_2e	Equivalente de dióxido de carbono
CORSIA	Esquema de Compensação e Redução de Carbono para a Aviação Internacional
CR	Taxa de captura
CSLL	Contribuição Social sobre o Lucro Líquido
EPA	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos
FOD	Decaimento de Primeira Ordem
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
IRPJ	Imposto de Renda da Pessoa Jurídica
IRR	Taxa interna de retorno
ITMO	Resultado de Mitigação Transferido Internacionalmente
kt	Kilotonelada
kg	Quilograma
Km^2	Quilômetro quadrado
LFG	Gás de aterro
LFGcost	Modelo de custo energético do gás de aterro
L0	Potencial de geração de metano
MCF	Fator de correção do metano
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
Mt	Megatonelada
MWh	Megawatt-hora
NIR	Relatório do Inventário Nacional
NPV	Valor Presente Líquido
O&M	Operação e manutenção
OPEX	Despesas operacionais
OX	Fator de oxidação
R$	Real Brasileiro
SEEG	Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa

SINISA	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
tCH_4	Tonelada de metano
tCO_2e	Tonelada de dióxido de carbono equivalente
USD	Dólar dos Estados Unidos

1 Introdução

1.1 Contexto do estudo

As emissões de metano provenientes de locais de descarte de resíduos sólidos contribuem significativamente para as emissões globais de gases de efeito estufa e representam uma importante oportunidade para a mitigação climática no curto prazo. Avanços recentes nas tecnologias de satélite e sensoriamento remoto aprimoraram a capacidade de detectar e quantificar as emissões de metano de aterros e lixões individuais, permitindo a identificação de instalações com emissões particularmente elevadas e complementando os modelos existentes de emissões de aterros.

No Brasil, observações por satélite identificaram inúmeros locais de descarte de resíduos superemissores, proporcionando novos insights sobre as emissões de metano em todo o setor. Este relatório baseia-se nas observações de metano fornecidas pela Carbon Mapper e aplica metodologias estabelecidas para avaliar as emissões, as oportunidades de mitigação e os custos da implementação de medidas de mitigação de metano em aterros nessas instalações. A análise fornece uma indicação das potenciais reduções de emissões e dos benefícios climáticos que poderiam ser alcançados por meio de ações direcionadas em locais com altas emissões.

1.2 Emissões de metano de aterros no Brasil

O Brasil gerou e coletou aproximadamente 78 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU) em 2023[1], com serviços de coleta cobrindo 91% da população. Os resíduos orgânicos representaram aproximadamente 43% do fluxo de resíduos, apresentando um potencial substancial para a geração de metano quando descartados em aterros e lixões.[2]

Aterros continuam sendo a principal forma de gestão de resíduos no Brasil. Em 2023, 74,4% dos resíduos coletados foram descartados em aterros sanitários, enquanto 15,3% foram descartados em lixões a céu aberto e 10,3% em aterros controlados. O Brasil registrou 688 aterros sanitários, 317 aterros controlados e 1.606 lixões a céu aberto em operação em 2023. Enquanto os aterros sanitários receberam aproximadamente 50,8 milhões de toneladas de resíduos, os lixões a céu aberto e os aterros controlados, juntos, receberam mais de 17 milhões de toneladas, demonstrando que essas práticas de descarte continuam a representar uma parcela substancial dos resíduos coletados, apesar dos esforços contínuos para modernizar o setor.[3]

O setor de resíduos emitiu aproximadamente 91 $MtCO_2e$ (milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente) em 2022 , sendo que o metano foi responsável por quase todas as emissões de gases de efeito estufa do setor de resíduos. Os locais de disposição de resíduos sólidos, incluindo aterros e lixões, contribuem com pouco mais da metade das emissões de metano do setor de resíduos (53 $MtCO_2e$). Dessas emissões, 82,5% (44,1 $MtCO_2e$) tiveram origem em locais de descarte de resíduos gerenciados, enquanto os 17,5% restantes (9,4 $MtCO_2e$) provieram de locais de descarte não categorizados (ver Figura 1).[4]

---

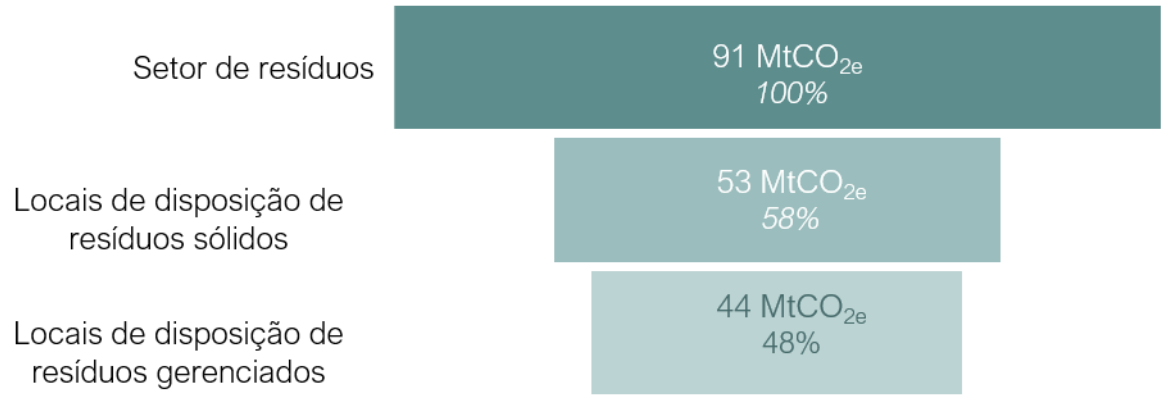
[1] Ministério das Cidades (2025). *Relatório dos Serviços de Limpeza Urbana e Manejo de Resíduos Sólidos – SINISA 2024 (ano de referência 2023)*. Disponível em: https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/sinisa/resultados-sinisa (Acessado em setembro de 2026)

[2] ABREMA (2024). *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2024*. Disponível em: https://www.abrema.org.br/panorama/ (Acessado em setembro de 2026)

[3] Ministério das Cidades (2025). *Relatório dos Serviços de Limpeza Urbana e Manejo de Resíduos Sólidos – SINISA 2024 (ano de referência 2023)*. Disponível em: https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/sinisa/resultados-sinisa (Acessado em setembro de 2026)

[4] Governo do Brasil (2024). *Relatório do Inventário Nacional do Brasil 2024*. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-bienais-de-transparencia-btrs/relatorios_slogo/bra_nir_2024_eng_slogo.pdf (Acessado a 8 de setembro de 2026)

Figura 1 . Distribuição das emissões de gases de efeito estufa do setor de resíduos, desde as emissões totais até os locais de disposição de resíduos gerenciados.



Fonte: Relatório do Inventário Nacional do Brasil (2024)[5]

A recuperação de metano a partir de sistemas de gás de aterro desempenha um papel importante na mitigação dessas emissões. Em 2024, aproximadamente 581,2 $ktCH_4$ (quilotoneladas de metano) foram recuperadas de 54 aterros sanitários.[6]**Error! Bookmark not defined.** De acordo com o Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), a recuperação de gás de aterro evitou emissões equivalentes a aproximadamente 25% do metano que, de outra forma, teria sido liberado dos locais de disposição de resíduos sólidos.

A disponibilidade de dados melhorou significativamente por meio do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SINISA). No entanto, persistem desafios relacionados à qualidade dos dados, uma vez que os relatórios municipais são, em grande parte, autodeclarados, muitos municípios carecem de sistemas robustos de informação sobre resíduos e apenas uma parcela limitada de municípios realizou estudos recentes sobre a composição dos resíduos.[6]

1.3 Escopo e objetivos do estudo

Este estudo avalia o potencial de mitigação de metano de locais de descarte de resíduos no Brasil identificados como superemissores de metano por meio de observações de satélite fornecidas pela Carbon Mapper. A avaliação abrange 66 aterros e lixões e apoia a Iniciativa Brasileira de Superemissores por Satélite, quantificando as emissões, as oportunidades de mitigação e os custos associados às medidas de redução de metano nesses locais.

Os objetivos do estudo são:

- Estimar as emissões anuais de metano para cada local identificado como superemissor e avaliar sua contribuição para as emissões de metano do setor de resíduos do Brasil.
- Identificar medidas de mitigação e estratégias de gestão de gás de aterro aplicáveis aos locais avaliados e estimar as reduções de emissões que podem ser alcançadas por meio de sua implementação.
- Estimativa dos custos associados à implementação de medidas de mitigação, incluindo necessidades de investimento de capital e custos operacionais.

[5] Governo do Brasil (2024). *Relatório do Inventário Nacional do Brasil de 2024*. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-bienais-de-transparencia-btrs/relatorios_slogo/bra_nir_2024_eng_slogo.pdf (Acessado a 8 de setembro de 2026)

[6] Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), Observatório do Clima (2025). *Análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil (1970–2024)*. Disponível em: https://seeg.eco.br (Acessado a 6 de outubro de 2026).

- Avaliar os benefícios mais amplos da mitigação do metano, incluindo receitas potenciais decorrentes da recuperação de gás de aterro e co-benefícios qualitativos para o meio ambiente e a saúde pública.
- Fornecer uma avaliação qualitativa de práticas alternativas de gestão de aterros, além dos sistemas de captação de gás de aterro, e sua influência potencial nas emissões de metano, nas condições dos aterros e no desempenho da recuperação de gás.

Para atingir esses objetivos, o estudo combina observações de metano derivadas de satélites, informações específicas sobre aterros coletadas por meio do projeto, modelagem de decaimento de primeira ordem e avaliações de custo baseadas no modelo Landfill Gas Energy Cost (LFGcost) da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA dos EUA), adaptado com base em premissas e parâmetros financeiros específicos do Brasil.

O estudo fornece estimativas preliminares do potencial de mitigação de metano e dos custos nos locais avaliados, com o objetivo de apoiar a priorização das oportunidades de mitigação de metano e orientar futuros esforços de implementação. Os resultados não devem ser considerados um substituto para estudos detalhados de engenharia, viabilidade ou investimento específicos para cada local.

2 Coleta de dados e caracterização dos locais avaliados

A Carbon Mapper forneceu observações de metano para os locais de disposição de resíduos identificados como superemissores no Brasil. Esse conjunto de dados constituiu o escopo do trabalho para este estudo. Os dados da Carbon Mapper foram complementados com dados coletados pelo Instituto PNRS (Instituto Brasileiro de Resíduos Sólidos).

Os dados foram obtidos a partir de três fontes principais: (i) informações específicas sobre aterros coletadas por meio de formulários de coleta de dados e fontes publicamente disponíveis, (ii) observações de emissões de metano fornecidas pela Carbon Mapper e (iii) parâmetros padrão derivados de metodologias internacionais estabelecidas e da literatura relevante.

2.1 Características dos aterros

As informações específicas sobre os aterros coletadas incluíram localização, propriedade, quantidades de resíduos, população atendida, idade do aterro, características operacionais, classificação do aterro e a presença e desempenho de sistemas de captação de gás de aterro, quando disponíveis. Informações adicionais relativas à utilização do gás de aterro, volumes de recuperação de metano e práticas operacionais também foram compiladas, sempre que possível.

Os aterros avaliados representam uma gama diversificada de tamanhos de instalações, estruturas de propriedade e condições operacionais. Os locais estão distribuídos por todas as principais regiões do país e incluem aterros operados tanto pelo setor público quanto pelo privado. Embora o portfólio inclua várias instalações municipais de pequeno e médio porte, ele é dominado por aterros regionais e metropolitanos de maior porte, com um terço dos locais atendendo populações superiores a um milhão de pessoas e metade atendendo entre 250 mil e um milhão de pessoas.

A maioria dos locais é classificada como aterros anaeróbicos gerenciados (91%), embora também tenha sido identificado um pequeno número de locais de descarte não gerenciados. As práticas de gestão de gás de aterro variam significativamente em todo o portfólio. Aproximadamente 50% dos locais possuem sistemas de captação de gás de aterro, enquanto os 50% restantes não possuem. Uma parcela maior de aterros de propriedade privada implementou sistemas de captação de gás (69% dos aterros privados) do que os aterros de propriedade pública (22% dos aterros públicos). Várias das maiores instalações, incluindo o CTR Seropédica, o Aterro Sanitário de Caieiras, o Aterro Sanitário Sítio São João e o Novo Aterro Sanitário

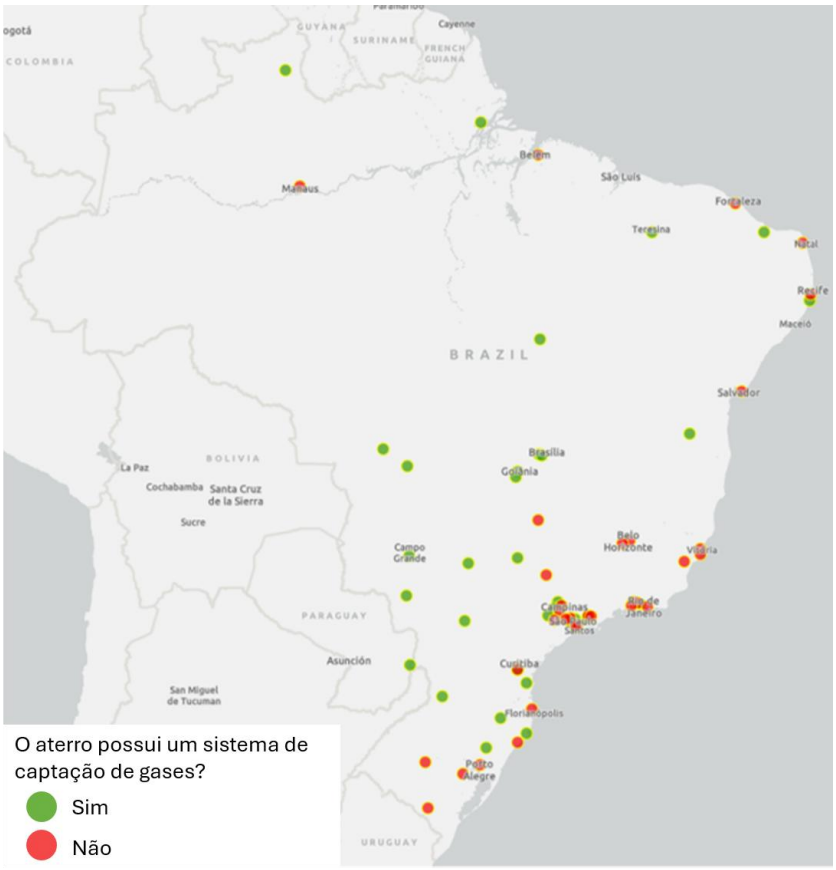
– ASMOC II, implementaram projetos de recuperação de gás de aterro para geração de energia, queima ou produção de biometano.

As principais características dos locais estão resumidas na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1 – Características dos aterros avaliados

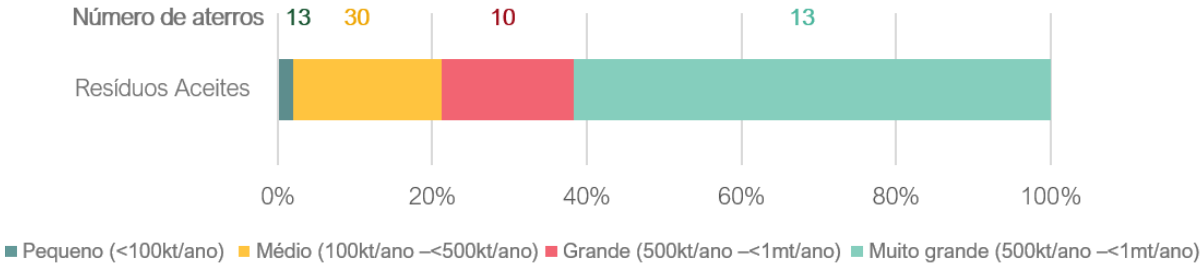
Categoria	Característica		Número de locais	Proporção de locais
Total	Total de locais avaliados		66	100%
Sistema de coleta de gás	Com sistema de coleta de gás		33	50%
	Sem sistema de captação de gás		33	50%
Tamanho por população atendida	Pequeno, menos de 250.000 pessoas		10	15%
	Médio, de 250.000 a 1 milhão de pessoas		33	50%
	Grande, mais de 1 milhão de pessoas		23	35%
Tamanho por volume anual de resíduos eliminados	Pequena, menos de 250.000 toneladas/ano		31	47%
	Médio, de 250.000 a 1 milhão de toneladas/ano		22	33%
	Grande, mais de 1 milhão de toneladas/ano		13	20%
Classificação por tipo de propriedade	Privada		39	59%
	Público		27	41%
Classificação da gestão de aterros	Aterro anaeróbico controlado		60	91%
	Aterro não gerenciado ou depósito de resíduos		5	8%
	Outros ou desconhecidos		1	2%
Classificação de propriedade e sistema de coleta de gás	**Privada**	Com sistema de coleta de gás	27	41%
		Sem sistema de captação de gás	12	18%
	Público	Com sistema de coleta de gás	6	9%
		Sem sistema de captação de gás	21	32%

Figura 2 - Mapa dos aterros avaliados



Coletivamente, as instalações avaliadas recebem aproximadamente 40 milhões de toneladas de resíduos anualmente, o que equivale a uma parcela substancial do total de resíduos descartados em aterros sanitários no Brasil. As 13 maiores instalações, cada uma recebendo mais de 1 milhão de toneladas de resíduos por ano, respondem, em conjunto, por aproximadamente 24,5 milhões de toneladas de descarte anual de resíduos, representando cerca de 61,5% do total de resíduos aceitos em todo o portfólio avaliado. Em contrapartida, os 13 aterros de pequeno porte (<100 mil toneladas/ano) e os 30 de médio porte (100 mil a 500 mil toneladas/ano) respondem por pouco mais de um quinto do total de resíduos descartados.

Figura 3 - Porcentagem do total de resíduos recebidos nos locais avaliados



Os locais analisados também apresentam variação substancial nas características físicas. A área total dos aterros é de aproximadamente 30 km^2, com áreas individuais variando de menos de 0,3 quilômetro quadrado (km^2) a aproximadamente 9 km^2. Verificou-se, no entanto, que a área dos aterros apresenta apenas uma correlação moderada com o volume anual de resíduos recebidos.

O portfólio é caracterizado pela forte presença de várias grandes empresas privadas de gestão de resíduos. Após a consolidação dos nomes das operadoras, a Orizon e a SOLVI operam dez e nove dos locais avaliados, respectivamente, representando os maiores grupos de gestão no conjunto de dados.

2.2 Conjunto de dados da Carbon Mapper

Para cada aterro, o conjunto de dados incluiu informações sobre o número de detecções de plumas de metano, o número de dias de observação, a persistência da fonte, as coordenadas, as taxas estimadas de emissão de metano e os valores de incerteza associados, de 19 de setembro de 2024 a 7 de julho de 2026.

Um aterro pode ter uma ou mais plumas de metano atribuídas a ele no conjunto de dados da Carbon Mapper. Várias plumas podem ser detectadas durante um único dia de observação e, portanto, não representam necessariamente eventos de emissão independentes. Para caracterizar a frequência das emissões, a Carbon Mapper utiliza o número de dias de detecção (dias em que pelo menos uma pluma foi detectada) e o número de dias de observação (dias em que o aterro foi observado em condições adequadas). Essas métricas são utilizadas para calcular a persistência da fonte, que reflete a frequência com que as emissões são detectadas ao longo do tempo.

Para cada aterro, a Carbon Mapper forneceu as informações resumidas na Tabela 2 abaixo.

Tabela 2 . Informações fornecidas no conjunto de dados da Carbon Mapper.

Campo[7]	Descrição
ID da fonte	Identificador exclusivo atribuído a cada aterro.
Coordenadas	Latitude e longitude da localização do aterro.
Contagem de plumas	Número total de plumas detectadas e atribuídas ao aterro.
Contagem de datas de detecção	Número de dias em que uma ou mais plumas foram detectadas no aterro.
Contagem de datas de observação	Número de dias em que o aterro foi observado em condições adequadas, independentemente de terem sido detectadas emissões de metano.
Persistência	Relação entre os dias de detecção (*contagem de datas de detecção*) e os dias (*contagem de datas de observação*) para a fonte, representando a intermitência (frequência com que as emissões são detectadas). *Por exemplo, se um aterro for observado em 10 dias diferentes e forem detectadas plumas em 2 desses dias, a persistência é de 20%.*[8] Para o presente conjunto de dados, os valores de persistência são fornecidos diretamente pela Carbon Mapper.
Taxa de emissão (kg/h)	Média das emissões de metano de uma fonte ao longo do tempo. As taxas médias diárias de emissão são calculadas inicialmente a partir de

[7] Carbon Mapper (2025). Guia do produto: Definição e especificação dos dados. Disponível em: https://carbonmapper.org/articles/product-guide (Acessado em setembro de 2026)

[8] Carbon Mapper (2026). *Perguntas frequentes (FAQs).* Disponível em: https://carbonmapper.org/about/faq (Acessado em setembro de 2026)

Campo[7]	Descrição
	todas as observações de plumas, e a média desses valores diários é então multiplicada pela persistência da fonte. Isso leva em conta tanto a variabilidade nas taxas de emissão quando a fonte está ativa quanto os períodos de inatividade. *Por exemplo, se a taxa média diária de emissão for de 225 kg/h e a persistência da fonte for de 20%, a taxa de emissão resultante da fonte seria de 45 kg/h. A taxa de emissão da fonte relatada reflete, portanto, as emissões médias de longo prazo da fonte, e não a taxa de emissão de uma pluma individual.*[9]
Incerteza das emissões	Incerteza associada à taxa de emissão da fonte relatada.

2.3 Parâmetros e pressupostos padrão

Vários parâmetros necessários para a análise não puderam ser derivados diretamente de informações específicas do local e, portanto, foram obtidos a partir de abordagens de modelagem estabelecidas, conjuntos de dados nacionais e fontes da literatura. Entre eles estão pressupostos relacionados à composição dos resíduos, taxas de geração de metano, categorias de gestão de aterros, eficiências de captação de gás de aterro, limites de aplicabilidade de tecnologias e pressupostos de custo.

Os cálculos de geração de metano basearam-se na metodologia de Decaimento de Primeira Ordem (FOD) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). Os dados de composição de resíduos em nível estadual foram extraídos da Tabela 8.7 do Relatório do Inventário Nacional do Brasil[10] , enquanto os parâmetros de geração de metano específicos para cada clima foram selecionados com base nas condições climáticas regionais. Foram utilizados valores padrão para as duas zonas climáticas no que diz respeito ao teor de carbono orgânico degradável (DOC) e à fração decomposta (DOCf) para cada tipo de resíduo, bem como às constantes de taxa de geração de metano específicas para cada resíduo (k). O modelo também assumiu uma fração de metano (F) de 0,5, um atraso de seis meses antes da geração de metano e fatores de correção de metano (MCFs) padrão de acordo com o tipo de gestão do aterro sanitário.[11] Não foi considerada oxidação de metano nos cálculos de FOD.

Para a avaliação dos custos de redução, o modelo LFGcost da EPA dos EUA foi adaptado utilizando premissas financeiras específicas para o Brasil, incluindo taxas de juros locais, taxas de inflação, alíquotas tributárias e preços da eletricidade. Esses dados foram utilizados para estimar as necessidades de investimento de capital, os custos operacionais, as receitas de energia e o desempenho financeiro dos projetos de mitigação de gás de aterro.

Para os parâmetros financeiros específicos do país, foram utilizados os valores apresentados na Tabela 3.

[9] Carbon Mapper (2026). *Perguntas frequentes (FAQs).* Disponível em: https://carbonmapper.org/about/faq (Acessado em setembro de 2026)

[10] Governo do Brasil (2024). *Relatório do Inventário Nacional do Brasil de 2024*. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-bienais-de-transparencia-btrs/relatorios_slogo/bra_nir_2024_eng_slogo.pdf (Acessado em 8 de setembro de 2026)

[11] Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). (2006). *Diretrizes do IPCC de 2006 para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa, Volume 5: Resíduos, Capítulo 3: Descarte de Resíduos Sólidos*. Disponível em: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/5_Volume5/V5_3_Ch3_SWDS.pdf (Acessado em setembro de 2026)

Tabela 3 – Parâmetros financeiros específicos do Brasil

Parâmetro	Valor	Comentário/Fonte
Taxa de juros	14%	Taxa Selic em agosto de 2026[12]
Taxa de inflação geral	4,44%	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) – 12 meses até julho de 2026[13]
Taxa de inflação de equipamentos	4,44%	Presume-se que siga a taxa de inflação
Alíquota marginal de imposto	34%	Combinação das alíquotas do Imposto de Renda das Pessoas Jurídicas (IRPJ) e da Contribuição Social sobre o Lucro Líquido (CSLL)[14]
Preço da eletricidade	240,43 reais (R$)/megawatt-hora (MWh)	Média para julho de 2025 a julho de 2026[15]
Preço da eletricidade	46,67 USD/MWh	Conversão realizada com o conversor de moedas da DNB em 13/08/2026, à taxa de 0,19 real brasileiro/USD[16]
Taxa anual de reajuste do preço do produto	4,44%	Presume-se que siga a taxa de inflação
Operação e manutenção (O&M) dos sistemas de coleta e queima	50% do valor padrão do modelo da EPA	Ajuste para refletir os custos de mão de obra mais baixos no Brasil em comparação com os Estados Unidos.

[12] Banco Central do Brasil (2026). *Taxa de juros Selic*. Disponível em: https://www.bcb.gov.br/en/monetarypolicy/selicrate (Acessado em setembro de 2026)

[13] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). *Painel de indicadores.* Disponível em: https://www.ibge.gov.br/en/indicators.html (Acessado em setembro de 2026)

[14] Resumo tributário do Brasil (2026). Imposto sobre as Pessoas Jurídicas no Brasil: O Guia Completo para Empresas Estrangeiras (2026). Disponível em: https://braziltaxbrief.com/posts/corporate-tax-brazil-complete-guide/ (Acessado em setembro de 2026)

[15] Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE). *Painel de preços.* Disponível em: https://www.ccee.org.br/en/precos/painel-precos (Acessado em setembro de 2026)

[16] DNB (2026). *Conversor de moedas.* Disponível em: https://www.dnb.no/en/markets/fx-and-ir/currency-converter (Acessado em setembro de 2026)

3 Abordagem analítica

3.1 Estimativa das emissões de metano

3.1.1 Propagação da incerteza do conjunto de dados da Carbon Mapper

Para levar em conta a incerteza nas taxas de emissão das fontes da Carbon Mapper, foi aplicada uma abordagem de propagação de incerteza por Monte Carlo às taxas de emissão das fontes da Carbon Mapper utilizando o RStudio. Essa abordagem baseia-se em Carbon Limits (2024)[17] e Chen et al (2022).[18]

Para cada fonte/aterro, foram realizadas 50.000 iterações. Durante cada iteração, uma taxa de emissão foi amostrada aleatoriamente a partir de uma distribuição normal com média igual à taxa de emissão da fonte da Carbon Mapper e desvio padrão derivado da incerteza relatada, assumindo um intervalo de confiança de 95%. Essa abordagem gera uma distribuição sintética de possíveis taxas de emissão consistente com a incerteza de medição relatada.

A distribuição resultante foi utilizada para estimar as taxas de emissão horárias mínimas, médias e máximas para cada aterro. A média dos 50.000 valores simulados foi mantida como a taxa de emissão da fonte representativa utilizada na análise, enquanto os valores mínimo e máximo forneceram uma indicação da faixa de incerteza. Esse processo foi repetido para cada aterro no conjunto de dados.

Ao contrário de Carbon Limits (2024), a etapa de amostragem de Bernoulli não foi replicada, pois a taxa de emissão da fonte da Carbon Mapper já incorpora a persistência da fonte por meio da razão entre os dias de detecção e os dias de observação. A análise de Monte Carlo, portanto, propagou apenas a incerteza associada à taxa de emissão da fonte relatada.

As taxas de emissão por hora foram, por fim, convertidas em emissões anuais de metano multiplicando-se a taxa de emissão da fonte da Carbon Mapper pelo número de horas em um ano:

$$\text{Emissões anuais } (tCH_4/\text{ano}) = \frac{\text{Taxa de emissão da fonte (kg/h)} \times 8{,}760}{1{,}000}$$

Esse cálculo partiu do pressuposto de que a taxa de emissão da fonte da Carbon Mapper, que já incorpora a persistência da fonte, é representativa das emissões médias ao longo do ano.

Limitações e incertezas

As estimativas do potencial de mitigação baseiam-se nas emissões de metano observadas pela Carbon Mapper, e não no potencial total de geração de metano de cada aterro. Consequentemente, a análise estima a parcela das emissões observadas que poderia ser potencialmente mitigada por meio de uma melhor gestão do gás de aterro, e não o metano máximo tecnicamente recuperável.

Vários fatores contribuem para a incerteza nas emissões observadas, incluindo:

- O limiar de detecção da Carbon Mapper, que limita a detecção de fontes de emissão menores, difusas ou intermitentes
- A variabilidade na cobertura de satélite, na frequência de observação e nas condições meteorológicas
- A possibilidade de que grandes emissões tenham ocorrido fora dos períodos de observação

[17] Carbon Limits (2024). *Superemissores de metano – Baixo custo, alto impacto: análises de satélite sobre os superemissores globais de metano.* Disponível em: https://www.carbonlimits.no/projects/methane-super-emitters-kizd1 (Acessado em julho de 2026)

[18] Chen et al. (2022). *Quantificação das emissões regionais de metano na Bacia do Permiano, no Novo México, por meio de um levantamento aéreo abrangente.* Disponível em: https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.1c06458 (Acessado em julho de 2026)

- Incertezas na anualização das plumas de metano observadas

Como resultado, o potencial de mitigação estimado pode subestimar as reduções totais de emissões tecnicamente alcançáveis em locais onde a geração real de metano excede as emissões observadas.

3.1.2 Cálculos do modelo FOD

Além dos dados da Carbon Mapper, utilizou-se o método de Decaimento de Primeira Ordem (FOD)[19] para estimar o potencial de geração de metano nos aterros avaliados. Os cálculos basearam-se nas melhores informações disponíveis sobre quantidades de resíduos, composição dos resíduos, idade do aterro e características operacionais, coletadas ao longo do projeto. Nos casos em que não havia informações específicas do local, foram aplicados parâmetros padrão apropriados.

Os dados sobre a composição dos resíduos por estado foram extraídos da Tabela 8.7 do Relatório do Inventário Nacional (RIN) de 2024 do Brasil.[20] A constante de geração de metano "k" foi atribuída com base nas zonas climáticas apresentadas no Bluegreenatlas.[21] As regiões temperadas foram classificadas como "Temperadas Úmidas" e as regiões tropicais como "Tropicais Úmidas e Chuvosas" no modelo FOD, refletindo os níveis médios anuais de precipitação que, em geral, excedem o limite de 1.000 mm do modelo para condições úmidas.

Para aterros com sistemas de captação de gás de aterro existentes, capazes de fornecer dados operacionais, é calculado um cenário adicional baseado no FOD que incorpora os volumes de captura de gás de aterro. Para locais para os quais não foi possível fornecer informações sobre o desempenho de seu sistema de gás de aterro (LFG), serão aplicados valores padrão baseados na literatura. Esses cálculos, por fim, resultam em valores de emissão para:

- Geração de metano estimada pelo FOD sem coleta de gás
- Emissões de metano estimadas pelo FOD com coleta de gás

3.2 Estimativa do potencial de mitigação

3.2.1 Eficiência de captação de metano

Assumiu-se uma eficiência de captação de metano de 85% para representar o desempenho de um sistema de coleta de gás de aterro bem projetado e bem operado, o que é consistente com os valores padrão fornecidos pelo Programa de Relatórios de Gases de Efeito Estufa da EPA dos EUA[22] e pelo modelo LFGcost.[23]

O valor selecionado não deve ser interpretado como o desempenho típico alcançado por todos os aterros. A eficiência de captação depende de inúmeros fatores específicos de cada local, incluindo o projeto do aterro, a qualidade da cobertura, o espaçamento entre os poços, as práticas operacionais, a idade dos resíduos e a manutenção da rede de captação de gás. Uma revisão recente da literatura sobre a eficiência

---

[19] Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). (2006). *Diretrizes do IPCC de 2006 para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa, Volume 5: Resíduos, Capítulo 3: Descarte de Resíduos Sólidos*. Disponível em: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/5_Volume5/V5_3_Ch3_SWDS.pdf (Acessado em setembro de 2026)

[20] Governo do Brasil (2024). *Relatório do Inventário Nacional do Brasil de 2024*. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-bienais-de-transparencia-btrs/relatorios_slogo/bra_nir_2024_eng_slogo.pdf (Acessado em setembro de 2026)

[21] Blue Green Atlas. (s.d.). *O clima do Brasil*. Disponível em: https://bluegreenatlas.com/climate/brazil_climate.html (Acessado em setembro de 2026)

[22] Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) (2025). *Tabela HH-3 da Subparte HH da Parte 98 – Eficiências na captação de gás de aterro*. Disponível em: https://www.ecfr.gov/current/title-40/chapter-I/subchapter-C/part-98/subpart-HH/appendix-Table%20HH-3%20to%20Subpart%20HH%20of%20Part%2098 (Acessado em setembro de 2026)

[23] Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) (2023). *Manual do Usuário do Modelo de Custo Energético do Gás de Aterro (LFGcost-Web), Versão 3.6.* Disponível em: https://www.epa.gov/system/files/documents/2023-09/lfgcost_web_v3.6_usersmanual_sep2023.pdf (Acessado em setembro de 2026)

de coleta de gás de aterro constatou uma variabilidade substancial entre os locais e concluiu que nenhum valor único de eficiência de coleta é universalmente aplicável. Para aterros com sistemas de cobertura final, a faixa de eficiências de coleta relatadas foi de aproximadamente **72% a 93%**[24] , enquanto eficiências mais baixas foram geralmente observadas em locais com cobertura intermediária ou sistemas de coleta menos desenvolvidos.

Da mesma forma, Barlaz et al. (2009)[25] relataram eficiências de coleta médias temporais variando de aproximadamente **55% a 91%**, dependendo das características do aterro, das condições climáticas, do tipo de cobertura e da extensão da cobertura de coleta de gás.

Diante desses resultados, 85% é considerado uma meta ambiciosa, mas alcançável, representativa das boas práticas do setor, e não do desempenho médio dos aterros. Por conseguinte, essa meta é utilizada neste estudo como premissa para estimar o potencial de redução de metano associado à melhoria da gestão de gases de aterro.

Fatores que influenciam a eficiência de captura de metano

Alcançar altas taxas de captura de metano requer mais do que simplesmente instalar um sistema de coleta de gás de aterro sanitário. A literatura destaca várias práticas operacionais e de projeto que melhoram significativamente o desempenho da coleta:

- Instalação precoce e expansão da infraestrutura de captação de gás durante a operação do aterro
- Minimização das frentes de trabalho ativas e das áreas de resíduos expostas
- Instalação rápida de sistemas de cobertura intermediária e final
- Utilização de materiais de cobertura de baixa permeabilidade
- Manutenção e equilíbrio adequados dos poços de extração
- Monitoramento contínuo e otimização do desempenho do sistema de captação[26,27]

Limitações e incertezas

A análise pressupõe uma eficiência-alvo de coleta de gás de aterro de 85% para todos os locais e caminhos de mitigação. Essa suposição tem como objetivo fornecer uma base consistente para estimar o potencial de mitigação a partir das emissões observadas atualmente. 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.

As eficiências de captação podem variar dependendo de fatores como o projeto do aterro, as características dos resíduos, as condições da cobertura, a configuração da rede de captação de gás, as práticas operacionais e a idade do local. Consequentemente, o potencial de mitigação estimado deve ser considerado indicativo e sujeito à incerteza associada à eficiência de captação alvo assumida.

---

[24] Fundação de Pesquisa e Educação Ambiental (EREF) (2025). *Análise crítica da literatura sobre a eficiência da captação de gás de aterro – Resumo executivo*. Disponível em: https://erefdn.org/wp-content/uploads/2025/03/Landfill-Gas-Collection-Efficiency-Executive-Summary.pdf (Acessado em setembro de 2026)

[25] Barlaz, M.A., Chanton, J.P. e Green, R.B. (2009). *Fatores que influenciam a eficiência da captação de gás de aterro: desempenho instantâneo e ao longo da vida útil*. Disponível em: https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.3155/1047-3289.59.12.1399 (Acessado em setembro de 2026)

[26] Lair, A., Mansuy, M., Romand, C., Oberti, O., Pradels, C., Barina, G., Denoun, T., Venturini, M. e Trommsdorff, C. (2024). *Aumentando a eficiência dos aterros sanitários para promover a redução de gases de efeito estufa: um estudo abrangente sobre melhores práticas e recomendações de políticas*. Disponível em: https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/0734242X241270951 (Acessado em setembro de 2026)

[27] Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) (2020). *Manual de Desenvolvimento de Projetos de Energia a partir de Gás de Aterro (LFG): Capítulo 7 – Melhores práticas para o projeto e a instalação de sistemas de captação de gás de aterro*. Disponível em: https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-03/documents/pdh_chapter7.pdf (Acessado em setembro de 2026)

3.2.2 Potencial de mitigação

O potencial de mitigação foi estimado com base nas emissões de metano observadas, derivadas dos dados da Carbon Mapper, independentemente de já existir um sistema de captação de gás de aterro.

Para todos os aterros, assumiu-se que um sistema de captação de gás aprimorado ou recém-implementado poderia capturar 85%[28] das emissões de metano observadas. O potencial de mitigação foi, portanto, calculado da seguinte forma:

$$\textit{Potencial de mitigação} = MAX(0;\ 0{,}85 \times (CH_4_coletado + CH_4_observado) - CH_4_coletado)$$

As emissões de metano CH_4 _observadas basearam-se nas observações da Carbon Mapper, e as emissões de metano CH_4 _coletadas basearam-se nos dados fornecidos por meio do processo de coleta de dados pelo Instituto PNRS.

Nota: Como as estimativas do FOD foram superiores às emissões observadas em alguns locais e inferiores em outros, elas não foram utilizadas diretamente para calcular o potencial de mitigação. Em vez disso, serviram como referência independente para avaliar a plausibilidade das emissões observadas e apoiar a interpretação dos resultados.

Limitações e incertezas

Presume-se que o potencial de mitigação dependa exclusivamente de melhorias na captação de gás de aterro. A análise, portanto, pressupõe implicitamente que todo o metano capturado seja destruído ou utilizado com sucesso e não leva em conta diferenças nas eficiências de destruição ou utilização do metano entre queimadores, motores, turbinas, sistemas de upgrading ou outras tecnologias de uso final.

Na prática, as eficiências de destruição do metano variam de acordo com as tecnologias e as condições operacionais. O potencial de mitigação estimado deve, portanto, ser interpretado como uma estimativa do potencial de captura de metano, e não como uma avaliação detalhada das reduções líquidas de gases de efeito estufa para uma via específica de utilização.

Além disso, a análise quantifica apenas as reduções diretas nas emissões de metano resultantes da melhoria na gestão do gás de aterro. Benefícios climáticos adicionais associados ao uso do gás de aterro recuperado, tais como a substituição de eletricidade gerada a partir de combustíveis fósseis, gás natural ou outros combustíveis, não estão incluídos.

A análise também pressupõe que a composição atual dos resíduos e o volume de resíduos orgânicos recebidos permaneçam inalterados. Consequentemente, abordagens alternativas de mitigação que reduzam a geração de metano direta ou indiretamente, tais como o desvio de resíduos orgânicos, práticas aprimoradas de cobertura, coberturas biológicas, operação semi-aeróbica ou aeração ativa, não são quantificadas. O potencial de mitigação estimado reflete, portanto, melhorias na coleta de gás de aterro sob as condições existentes de gestão de resíduos, e não toda a gama de medidas potenciais de mitigação do metano em aterros. O potencial de mitigação relatado deve, portanto, ser considerado conservador.

3.3 Estimativa dos custos de redução

3.3.1 Seleção da estratégia de mitigação mais adequada

Embora o modelo da EPA possa avaliar uma ampla gama de tecnologias, nem todas as opções são adequadas para todos os aterros. Portanto, a Carbon Limits (em conjunto com a Clean Air Task Force (CATF) e a Carbon Mapper) identificou uma via de mitigação preferencial para cada local com base em suas características técnicas, incluindo:

[28] Valores padrão do modelo da EPA.

- Sistemas existentes de gás de aterro
- Tamanho do aterro e potencial estimado de geração de gás de aterro associado

A estrutura de seleção da tecnologia a ser implementada é apresentada emTabela 4:

Tabela 4 – Matriz de seleção de tecnologias de LFG

Perfil do aterro	Tecnologia recomendada	Principais fundamentos
Aterro de pequena dimensão (<175 kg de CH_4/h)	Geração de eletricidade em pequena escala (pequenos motores alternativos)	• A menor vazão de gás é mais adequada para motores menores
Aterro de médio porte (175–750 kg de CH_4/h)	Geração de eletricidade (motor alternativo padrão)	• Valor muito baixo para uma turbina a gás, mas suficientemente alto para um motor padrão
Aterro de grande porte (>750 kg de CH_4/h)	Geração de eletricidade (turbina a gás)	• Vazão de gás de aterro (LFG) suficiente para alimentar uma turbina a gás

Os requisitos de vazão de gás basearam-se nas características de fluxo de aterro recomendadas para tecnologias de captação e aproveitamento de gás de aterro, conforme descrito no manual de desenvolvimento de projetos de energia a partir de gás de aterro (LFG)[29] e no manual do usuário sobre custos de gás de aterro da EPA.[30] Os valores originais em pés cúbicos de gás de aterro foram convertidos e arredondados para metros cúbicos e, por fim, para kg de metano, utilizando um teor médio de metano de 50% no gás de aterro. A vazão de metano para cada aterro foi baseada nos dados de emissões da Carbon Mapper.

Para locais com sistemas de captação de gás existentes e dados sobre os volumes de gás captado, esses números foram somados às observações de emissões da Carbon Mapper para obter a vazão total de gás utilizada na seleção da tecnologia apropriada.

3.3.2 Parâmetros estimados de custo do projeto

Para cada aterro sanitário, a via de mitigação preferencial (selecionada na etapa anterior) foi avaliada utilizando o modelo da EPA dos EUA que estima:

- Necessidades de investimento de capital
  - Custos de capital do projeto de energia a partir de gás de aterro (LFG), com variáveis específicas para o Brasil, quando disponíveis (e aplicáveis)
  - Custos totais de capital instalados
- Custos anuais de operação e manutenção (O&M) associados à gestão do sistema de captação de gás de aterro
- Produção e recuperação de energia

[29] Agência de Proteção Ambiental dos EUA. (2024). *Manual de desenvolvimento de projetos de energia a partir de gás de aterro*. Programa de Divulgação do Metano de Aterros. Disponível em: https://www.epa.gov/lmop/landfill-gas-energy-project-development-handbook (Acessado em setembro de 2026)

[30] Agência de Proteção Ambiental dos EUA. (2023). *Manual do usuário do LFGcost-Web (Versão 3.6)*. Programa de Divulgação do Metano de Aterros Sanitários. Disponível em: https://www.epa.gov/lmop/lfgcost-web-landfill-gas-energy-cost-model (Acessado em setembro de 2026)

    - Potencial de geração de eletricidade ou produção de energia
    - Receitas provenientes da recuperação de energia
- Relação custo-benefício da redução das emissões de metano
    - Custo da redução de metano (USD/t CH_4 evitada)
    - Custo da redução de gases de efeito estufa (USD/tCO_2e evitada)
- Indicadores de desempenho financeiro
    - Valor Presente Líquido (VPL)
    - Taxa Interna de Retorno (TIR)
    - Tempo até o ponto de equilíbrio/retorno do investimento

Despesas de capital (CAPEX), custos operacionais anuais (OPEX), valor presente líquido (VPL) e custo de redução (USD/tCO_2e) foram utilizados como os principais indicadores financeiros. Os custos de redução foram calculados dividindo-se o VPL da medida de mitigação pelas reduções cumulativas de emissões alcançadas ao longo da vida útil do sistema de gás de aterro. Foi considerada uma vida útil do sistema de 15 anos, em consonância com a premissa padrão do modelo da EPA dos EUA.

3.3.3 Custos associados ao sistema de captação de gás

Cenário 1: Ausência de sistema de captação de gás

Para aterros sem um sistema de coleta de gás existente, os CAPEX e OPEX associados à coleta de gás de aterro foram estimados diretamente utilizando o modelo LFGcost da EPA.

O modelo pressupõe que um novo sistema de captação, incluindo poços, tubulação e infraestrutura associada, deve ser instalado.

Cenário 2: Sistema de captação de gás existente

Para aterros com um sistema de captação de gás já existente, o cenário de mitigação pressupôs a melhoria e a expansão do sistema atual, em vez da instalação de um novo sistema de captação em todo o aterro.

São utilizados os seguintes parâmetros:

- $Q_{capturado}$ = metano atualmente capturado pelo sistema de captação de gás de aterro;
- $Q_{observado}$ = emissões de metano observadas pela Carbon Mapper;
- $CR_{observada}$ = taxa de captura (CR) estimada atualmente observada = $\frac{Q_{capturado}}{Q_{capturado} + Q_{observado}}$
- CR_{meta} = taxa de captura alvo (85%)

A melhoria adicional necessária para atingir a taxa de captura alvo foi representada pelo fator de escala calculado da seguinte forma: $MAX(0, \frac{CR_{target} - CR_{observed}}{CR_{target}})$

Esse fator foi aplicado à área total do aterro para estimar a área adicional que requer cobertura efetiva de coleta de gás de aterro. Como os custos do sistema de coleta no modelo da EPA são dimensionados de acordo com a área do aterro, essa abordagem permitiu estimar os custos de poços adicionais e da infraestrutura de coleta associada sem tratar o aterro como se fosse necessário um sistema inteiramente novo.

Os custos associados à geração de eletricidade foram tratados separadamente. O modelo da EPA estima a capacidade necessária do motor ou da turbina e os custos associados com base no fluxo de gás disponível para utilização. Como o fluxo de gás inserido no cenário de mitigação representava apenas o metano **adicional** capturado como resultado da melhoria do sistema existente, os custos correspondentes de geração de eletricidade foram automaticamente ajustados ao volume adicional de gás.

Essa abordagem, portanto, oferece um método simplificado para estimar os custos incrementais da melhoria de um sistema de LFG existente. O fator de escalonamento baseado na área deve ser interpretado como um indicador de escalonamento de custos, e não como uma estimativa direta da área física atualmente sem infraestrutura de coleta. Na prática, atingir a taxa de captura alvo pode envolver uma

combinação de expansão da cobertura de coleta, instalação ou substituição de poços de extração, melhoria do equilíbrio e da manutenção do campo de poços, modernização de sopradores e da infraestrutura de coleta, além de outras melhorias operacionais.

Limitações e incertezas

As estimativas de custo apresentadas neste estudo devem ser interpretadas como indicadores de triagem para comparação entre projetos, e não como avaliações definitivas de investimento. A avaliação baseia-se no modelo de custos de gás de aterro (LFG) da EPA e não reflete plenamente as condições de engenharia específicas do local, o projeto do aterro, as práticas operacionais, os requisitos regulatórios ou as condições do mercado local. Os custos reais do projeto podem, portanto, diferir substancialmente dos valores apresentados e devem ser confirmados por meio de estudos de engenharia e de viabilidade específicos para o local.

Várias premissas exercem influência significativa sobre os resultados. Os custos locais de construção, equipamentos, mão de obra e operação podem diferir daqueles considerados no modelo, enquanto características específicas do aterro, tais como profundidade dos resíduos, condições da cobertura, densidade dos poços de gás e infraestrutura existente, podem afetar substancialmente as necessidades de investimento. Para aterros com sistemas de coleta de gás já instalados, as estimativas de CAPEX e OPEX baseiam-se no potencial de mitigação estimado remanescente no local específico. Esse potencial de mitigação é utilizado para estimar a área remanescente do aterro na qual seria necessário instalar a infraestrutura de poços. As incertezas em torno da área real de resíduos do aterro e a ausência de informações sobre a cobertura atual da infraestrutura de gás de aterro aumentam a incerteza dessa estimativa de custo. Na prática, alguns locais podem exigir níveis variáveis de investimento para modernizar o sistema de coleta e utilização de gás, a fim de atingir o potencial máximo de captura de gás.

Os resultados também destacam a sensibilidade dos custos estimados de redução às informações específicas de cada local. Em particular, requisitos excepcionalmente elevados para o sistema de coleta de gás de aterro em relação ao potencial de mitigação podem refletir incertezas nos dados sobre a área superficial do aterro ou em outras premissas específicas do local. Essas informações devem, portanto, ser verificadas ao avaliar projetos individuais com maior detalhamento.

Por fim, os resultados econômicos são altamente sensíveis às premissas relativas aos preços da eletricidade, taxas de desconto, inflação e vida útil dos projetos. A análise utiliza uma taxa de desconto de 9%, o que tem um impacto significativo nos VPLs dos projetos. O acesso a financiamento concessionário, fundos climáticos ou outras formas de financiamento de menor custo poderia melhorar substancialmente a viabilidade econômica dos projetos.

4 Resultados

4.1 Emissões de metano observadas por satélite

As observações processadas e anualizadas da Carbon Mapper indicam emissões médias de metano de 642 $ktCH_4$/ano nos aterros analisados. Isso corresponde a aproximadamente 29% das emissões de metano relatadas para o setor de Resíduos Sólidos do Brasil em 2024 (2.253 $ktCH_4$/ano, de acordo com o SEEG).[31] Não se espera que as emissões observadas correspondam às emissões relatadas. As diferenças entre os números podem ser explicadas pelo escopo e pelas características do conjunto de dados da Carbon

[31] SEEG (2024). *Setor de resíduos — Emissões de metano na disposição final*. Disponível em: https://plataforma.seeg.eco.br/?yearRange%5B0%5D=2024&yearRange%5B1%5D=2024&sector%5B0%5D=586&category%5B0%5D=1175&emissionType%5B0%5D=1&gas=1&groupBy=State&rankBy=State&filtersTab=filters&statisticsTab=historical (Acessado em setembro de 2026)

Mapper, que abrange apenas grandes plumas de emissão sob condições favoráveis de observação e não representa todas as emissões difusas e intermitentes dos aterros em todo o país.

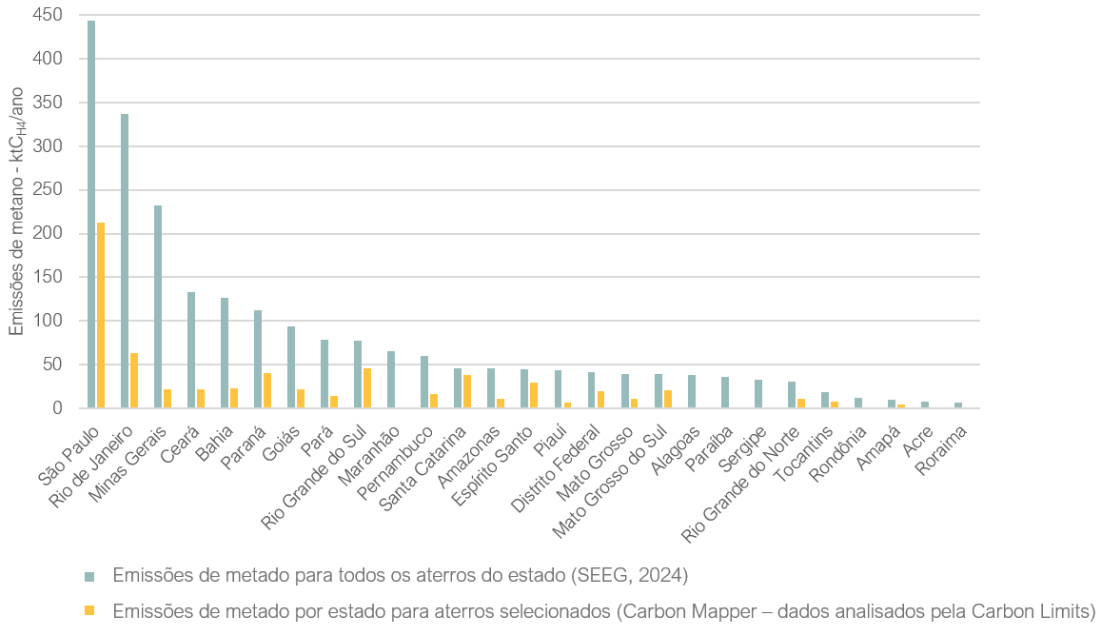
Do total das emissões observadas, 420 ktCH4/ano (65%) provêm de aterros nos quais há relatos de que um sistema de captação de gás de aterro está em operação[32] , enquanto 223 ktCH4/ano (35%) provêm de aterros sem sistemas de captação de gás. Notavelmente, os aterros equipados com sistemas de captação de gás representam 50% dos locais de aterro observados, mas são responsáveis por mais de três quintos das emissões detectadas.

Esses resultados sugerem que a presença de um sistema de captação de gás não resulta necessariamente em baixas emissões de metano. Emissões significativas podem persistir devido à cobertura incompleta da captação, vazamentos de gás através das coberturas dos aterros, operação ineficiente do campo de poços, manutenção inadequada, atrasos na expansão da rede de captação à medida que o aterro cresce ou fuga de metano pela face de trabalho do aterro.

A distribuição de emissões observada não deve ser interpretada como evidência de que todos os sistemas existentes sejam ineficazes. Em vez disso, as observações por satélite podem ser utilizadas para identificar de forma eficaz oportunidades-chave de mitigação para aterros com e sem sistemas de captação de gás. A distribuição de emissões observada indica que ainda podem existir oportunidades substanciais de mitigação de metano em muitos aterros, apesar da presença de infraestrutura de captação de gás, destacando a importância da otimização, manutenção, expansão e verificação do sistema por meio de medições independentes.

Tanto o conjunto de dados da Carbon Mapper quanto o do SEEG mostram uma forte concentração de emissões em um pequeno número de estados (consulteFigura 4). Isso sugere que esforços de mitigação direcionados a um número limitado de aterros, particularmente em São Paulo (22 aterros observados), no Rio de Janeiro (5 aterros observados) e em outros estados com altas emissões observadas, poderiam proporcionar reduções significativas de metano e deveriam ser priorizados para investigação posterior e avaliação do desempenho dos sistemas de captação de gás.

Figura 4 . Emissões de metano declaradas versus observadas por estado



Fonte: Análise da Carbon Limits com base nas observações da Carbon Mapper e nos dados do SEEG

[32] Dados coletados junto ao governo

A relação entre as observações da Carbon Mapper e as emissões de metano relatadas pelo SEEG varia consideravelmente entre os estados brasileiros (ver Figura 5). Vários fatores podem explicar essas diferenças, incluindo:

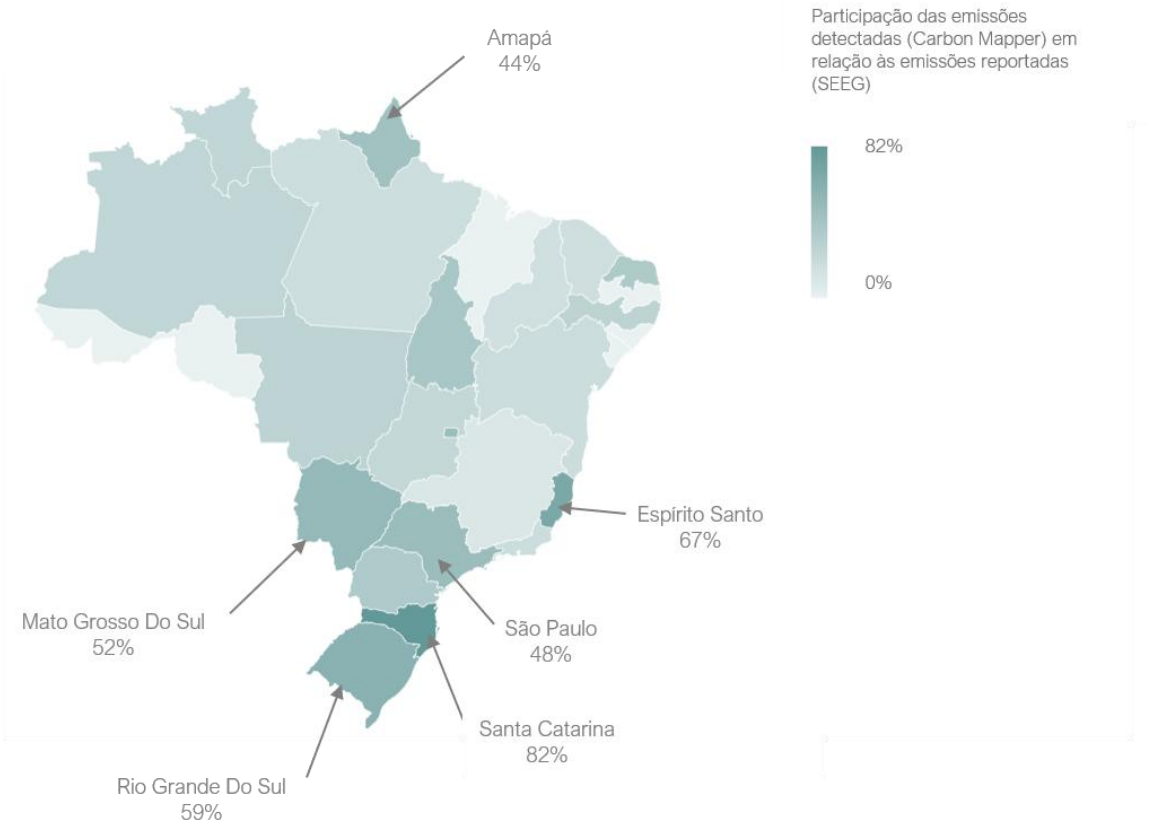
- Variações nas infraestruturas e práticas de gestão de aterros
- Diferenças no projeto, na operação e no desempenho dos sistemas de captação de gás de aterro
- Cobertura espacial e temporal desigual da observação por satélite entre os estados
- Emissões que ocorrem abaixo do limiar de detecção da Carbon Mapper.
- Variações nas condições ambientais e meteorológicas no momento da observação por satélite

Em alguns estados, particularmente em Santa Catarina (6 aterros observados) e no Rio Grande do Sul (5 aterros observados), as observações da Carbon Mapper representam uma parcela relativamente grande das emissões relatadas pelo SEEG. Isso pode indicar que um pequeno número de aterros com altas emissões é responsável por uma parcela substancial das emissões em nível estadual, embora diferenças na cobertura e nas condições de observação também possam contribuir para isso. Seria necessária uma investigação mais aprofundada em nível local para determinar os fatores subjacentes a esses resultados.

Em contrapartida, vários estados, incluindo Acre, Roraima e Amapá, apresentam emissões observadas muito baixas ou nulas, apesar das emissões de metano diferentes de zero relatadas no inventário do SEEG. Isso não indica necessariamente emissões baixas ou inexistentes de metano em aterros, pois as emissões podem não ter sido observadas durante as passagens do satélite devido às razões descritas acima e podem, de modo geral, ter sido muito pequenas ou dispersas para serem detectadas.

Figura 5 compara as emissões anualizadas de metano derivadas das observações da Carbon Mapper com as estimativas do SEEG relativas às emissões de metano provenientes do descarte final de resíduos em nível estadual. As porcentagens representam a relação entre as emissões derivadas da Carbon Mapper e as emissões estimadas pelo SEEG e não devem ser interpretadas como a proporção das emissões totais detectadas pela Carbon Mapper. Elas podem, ao contrário, ser utilizadas para ajudar a identificar regiões onde as emissões estão mais concentradas em um pequeno número de instalações. Por exemplo, no estado do Rio Grande do Sul, as emissões de metano detectadas pela Carbon Mapper representam 59% das emissões totais estimadas e relatadas pelo SEEG para esse mesmo estado.

Figura 5 . Emissões derivadas da Carbon Mapper como parcela das emissões de metano em aterros estimadas pelo SEEG



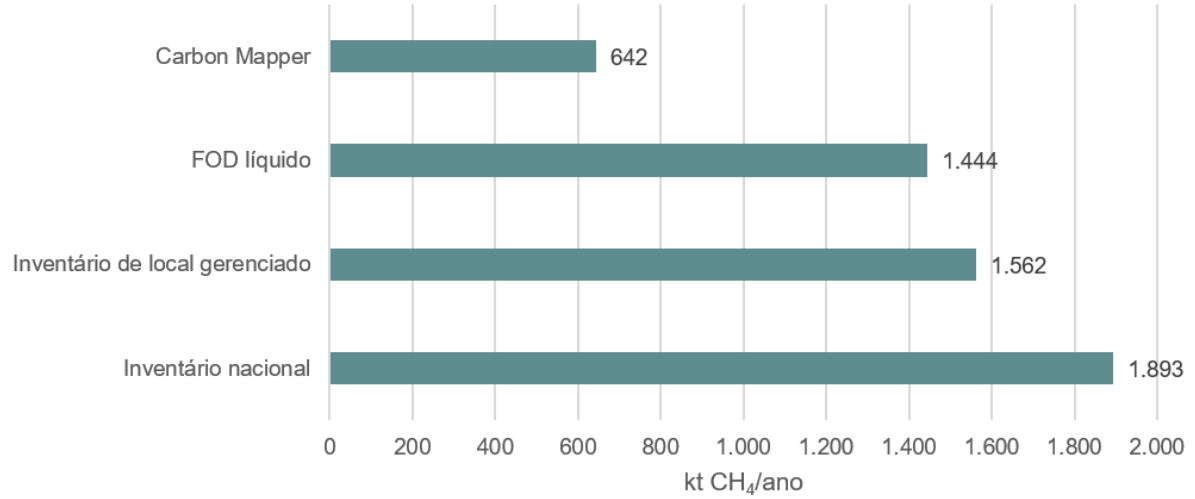
Fonte: Análise da Carbon Limits com base nas observações da Carbon Mapper

4.2 Emissões modeladas pelo FOD

O modelo de Decaimento de Primeira Ordem (FOD) foi aplicado a todos os 66 locais de disposição de resíduos avaliados, utilizando informações específicas de cada aterro sobre quantidades de resíduos, idade do aterro, composição dos resíduos (em nível estadual), condições climáticas e características de gestão do aterro. Nos casos em que havia informações disponíveis sobre a recuperação de gás de aterro, os volumes de recuperação de metano relatados foram incorporados aos cálculos para estimar as emissões líquidas de metano nas condições operacionais atuais.

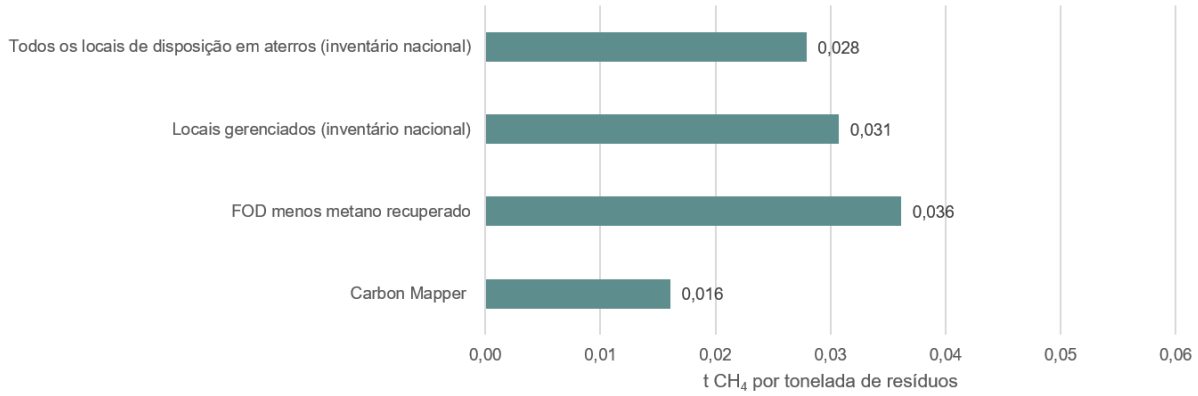
Utilizando essa abordagem, estimou-se que os aterros avaliados emitiriam aproximadamente 1.444 $ktCH_4$/ano no total em 2025. Em comparação, as observações anualizadas da Carbon Mapper indicam emissões de metano de aproximadamente 642 $ktCH_4$/ano, o que equivale a cerca de 44% das emissões estimadas pelo modelo FOD.Figura 6 mostra as estimativas de emissão total de metano para quatro fontes: o conjunto de dados da Carbon Mapper para as 66 instalações avaliadas; o modelo FOD desenvolvido para este estudo, ajustado com base nos dados de captação de gás de aterro obtidos por meio da pesquisa de informações sobre aterros (Net FOD) para as 66 instalações; as emissões de aterros gerenciados em todo o Brasil relatadas no Relatório do Inventário Nacional (NIR); e as emissões totais de aterros para todo o país relatadas no NIR.

Figura 6 – Estimativas de emissões totais conforme relatadas no inventário nacional (NIR), cálculos de FOD e observações da Carbon Mapper



Para compreender a intensidade das emissões associadas aos resíduos depositados em aterros, as emissões totais de metano foram normalizadas pela quantidade anual de resíduos descartados. Essa métrica fornece uma indicação das taxas implícitas de geração e emissão de metano subjacentes ao inventário nacional, aos cálculos de FOD específicos dos aterros e às observações da Carbon Mapper. Com base nas informações combinadas do Relatório do Inventário Nacional (NIR), dos dados do SEEG e do portfólio de aterros avaliado, as intensidades de metano resultantes são apresentadas na Figura 9.

Figura 7 – Indicador de intensidade de metano por tonelada de resíduos depositados



A comparação das intensidades de metano demonstra que as observações da Carbon Mapper são, em média, inferiores tanto ao inventário nacional quanto às estimativas de FOD ajustadas pela recuperação. As observações da Carbon Mapper correspondem a uma média de aproximadamente 0,016 tCH_4/t de resíduos, em comparação com 0,031 tCH_4/t de resíduos para a componente de aterros controlados do inventário nacional e 0,036 tCH_4/t de resíduos para os cálculos do FOD ajustados pela recuperação. As estimativas do FOD ajustadas pela recuperação estão, em linhas gerais, em concordância com as estimativas nacionais, sendo aproximadamente 18% superiores à estimativa do inventário de locais gerenciados, enquanto as observações da Carbon Mapper são aproximadamente 48% inferiores à estimativa do inventário de locais gerenciados e 51% inferiores aos cálculos do FOD ajustados pela recuperação. A concordância relativamente próxima entre as estimativas baseadas no FOD e o inventário nacional também é consistente com sua base metodológica, uma vez que o NIR do Brasil também aplica a abordagem do FOD para estimar as emissões de metano decorrentes do descarte de resíduos sólidos.

Essas comparações devem ser interpretadas com cautela, uma vez que as observações de satélite e as estimativas baseadas no FOD representam abordagens fundamentalmente diferentes para caracterizar as emissões de aterros. As observações da Carbon Mapper detectam plumas de metano provenientes de fontes pontuais suficientemente grandes e concentradas sob condições adequadas de observação, enquanto os modelos FOD estimam a geração total de metano e as emissões ao longo do tempo. Além disso, a conversão de observações discretas de satélite em estimativas de emissões anualizadas introduz incerteza, pois as emissões dos aterros podem variar ao longo do tempo e a amostragem por satélite é intermitente. A reconciliação das observações de satélite de fontes pontuais com modelos de aterros de abordagem bottom-up e a obtenção de médias anuais representativas a partir de medições de satélite ainda é um tema em estudo.[33] A comparação agregada aqui apresentada deve, portanto, ser entendida como uma comparação de estimativas de emissões complementares, e não como uma validação direta de qualquer uma das abordagens.

De modo geral, a comparação mostra que os cálculos do FOD produzem emissões agregadas de metano substancialmente mais elevadas do que as observações da Carbon Mapper. Considerar ambas as fontes de informação proporciona, portanto, uma base mais completa para interpretar as emissões de metano nos aterros avaliados.

4.3 Potencial de mitigação

Uma parcela substancial das emissões de metano observadas nos aterros avaliados poderia, potencialmente, ser evitada por meio de uma melhor gestão do gás de aterro (LFG). Com base na metodologia descrita na Seção 3.2 , aproximadamente 456 $ktCH_4$/ano, correspondendo a 71% das 642 $ktCH_4$/ano de emissões anualizadas derivadas das observações da Carbon Mapper e 20% das emissões de resíduos sólidos relatadas para o Brasil em 2024[34] , poderiam ser mitigadas por meio (i) da implementação de novos sistemas de captação de gás em locais onde atualmente não existem (189 $ktCH_4$ /ano) e (ii) de melhorias de desempenho em aterros já equipados com infraestrutura de captação de gás (266 $ktCH_4$ /ano). Conforme destacado naFigura 8 , para aterros sem sistemas de captação de gás existentes, o potencial de mitigação estimado corresponde a 85% das emissões observadas nesse grupo, refletindo a eficiência de captura alvo assumida. Para locais com sistemas existentes, o potencial de mitigação correspondente é de aproximadamente 63%, após considerar o metano já captado.

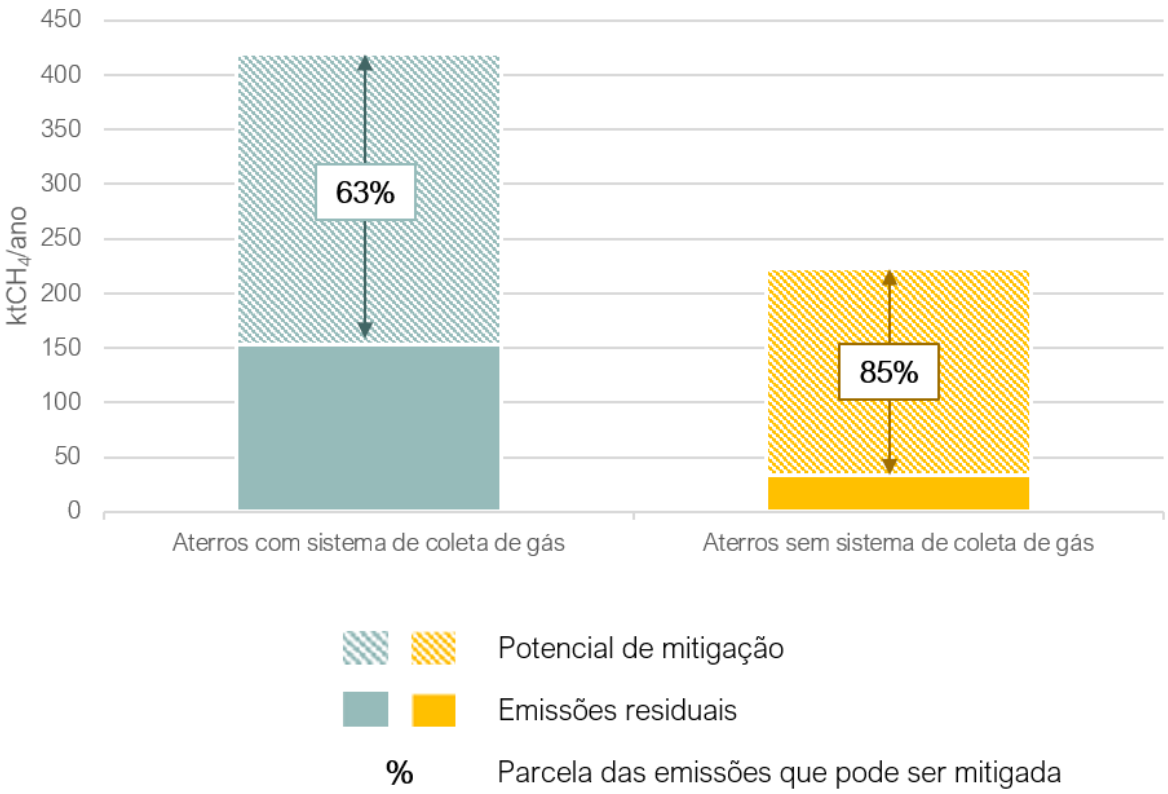
O maior potencial de mitigação associado a locais que já possuem coleta de gás de aterro reflete as elevadas emissões observadas em vários desses aterros. Isso indica que as estratégias de mitigação devem considerar tanto melhorias nos sistemas existentes quanto a instalação de nova infraestrutura de coleta.

Para aterros sem sistemas de captação de gás, a mitigação poderia ser alcançada por meio da instalação de sistemas ativos de extração de gás, combinados com tecnologias adequadas de destruição ou utilização do metano.

[33] Scarpelli, T., Cusworth, D., Kim, J., O'Neill, K., Duren, R. e Howell, K.: Utilização de observações de satélite com imagens de fontes pontuais para orientar melhorias nos modelos de metano de aterros sanitários em escala nacional e subnacional, Assembleia Geral da EGU 2026, Viena, Áustria, 3 a 8 de maio de 2026, EGU26-7927, https://doi.org/10.5194/egusphere-egu26-7927, 2026

[34] SEEG (2024). *Setor de resíduos — Emissões de metano na disposição final*. Disponível em: https://plataforma.seeg.eco.br/?yearRange%5B0%5D=2024&yearRange%5B1%5D=2024&sector%5B0%5D=586&category%5B0%5D=1175&emissionType%5B0%5D=1&gas=1&groupBy=State&rankBy=State&filtersTab=filters&statisticsTab=historical (Acessado em setembro de 2026)

Figura 8 . Potencial de mitigação e emissões residuais de aterros com e sem sistemas de coleta de gás instalados.



Fonte: Análise da Carbon Limits com base em observações da Carbon Mapper

As emissões residuais representam a parcela de emissões remanescente após a implementação das oportunidades de mitigação identificadas.

O potencial estimado de mitigação varia entre os estados brasileiros, oscilando entre aproximadamente 45% e 85% das emissões observadas. Essas diferenças são determinadas principalmente por:

- A proporção de aterros já equipados com sistemas de captação de gás
- A quantidade de metano atualmente captada e destruída ou utilizada
- O desempenho dos sistemas de captação existentes em relação à eficiência de captação alvo estimada de 85%
- Fatores específicos do local, como o tamanho do aterro.

Deve-se observar que o potencial de mitigação estimado considera apenas as reduções diretas nas emissões de metano resultantes do aumento da captura e destruição ou utilização do metano. Benefícios climáticos adicionais podem ser obtidos quando o metano capturado é utilizado para gerar energia ou substituir combustíveis fósseis. Nesses casos, o gás de aterro recuperado pode substituir a eletricidade gerada a partir de fontes de combustíveis fósseis ou substituir o gás natural e outros combustíveis fósseis em aplicações industriais, comerciais ou de transporte. Essas emissões evitadas de combustíveis fósseis não estão incluídas no potencial de mitigação aqui apresentado, o que significa que o benefício climático geral dos projetos de recuperação de gás de aterro poderia ser superior às estimativas de redução direta de metano relatadas nesta avaliação.

Por fim, o potencial de mitigação estimado deve ser considerado uma estimativa indicativa de limite superior, baseada nas emissões observadas e nas metas de desempenho de coleta presumidas. Seriam

necessárias avaliações técnicas ao nível de local para confirmar a viabilidade, a relação custo-benefício e as reduções de emissões alcançáveis para aterros individuais.

4.4 Custos de redução

A análise de custos de redução indica que reduções significativas de metano em aterros podem ser alcançadas a um custo relativamente baixo, particularmente em aterros maiores com alto potencial de geração de metano. Entre os aterros avaliados, os locais maiores geralmente apresentam custos de redução mais baixos do que os menores, refletindo economias de escala na coleta e utilização do gás de aterro (LFG).

Com base na abordagem de triagem de tecnologias descrita na Seção 3.3.1, 37 locais foram designados para projetos de turbinas a gás, 25 locais para projetos de motores alternativos padrão e 4 locais para projetos de motores de pequeno porte. Os projetos de turbinas a gás representam aproximadamente 345 $ktCH_4$/ano de potencial de mitigação, o que corresponde a cerca de três quartos do total, e apresentam o menor custo mediano de redução, de aproximadamente 6,59 USD/tCO_2e. Os projetos de motores padrão representam aproximadamente 107 $ktCH_4$/ano, com um custo mediano de redução de aproximadamente 8,22 USD/tCO_2e, enquanto os projetos de motores de pequeno porte representam 3,7 $ktCH_4$/ano e apresentam um custo mediano substancialmente mais elevado, de aproximadamente 17,35 USD/tCO_2e. Esses resultados estão resumidos na Tabela 5 .

Tabela 5 – Custos de redução por tipo de projeto

Tecnologia	Projetos	CAPEX total ($m)	Potencial total de mitigação (kt CH_4/ano)	Custo mediano ($/$tCO_2e$)	CAPEX mediano ($m)
Motor de pequeno porte	4	14,8	3,7	17,35	3,57
Motor padrão	25	252,8	106,8	8,22	11,03
Turbina padrão	37	811,6	345,0	6,59	19,52

Os resultados indicam que projetos de maior porte tendem a apresentar custos de redução mais baixos. Grandes aterros metropolitanos, como o Aterro Sanitário Municipal de Guarulhos, o CTDR Mauá, Caieiras, a Estre Ambiental – CGR Iguaçu e o Sítio São João, combinam alto potencial de recuperação de metano com volumes de gás suficientes para viabilizar tecnologias de recuperação de energia de maior porte, resultando em custos relativamente baixos por tonelada de emissões evitadas. Vários desses locais apresentam custos de redução inferiores a 5 USD/tCO_2e, o que os coloca entre as oportunidades de mitigação de metano de menor custo identificadas na análise.

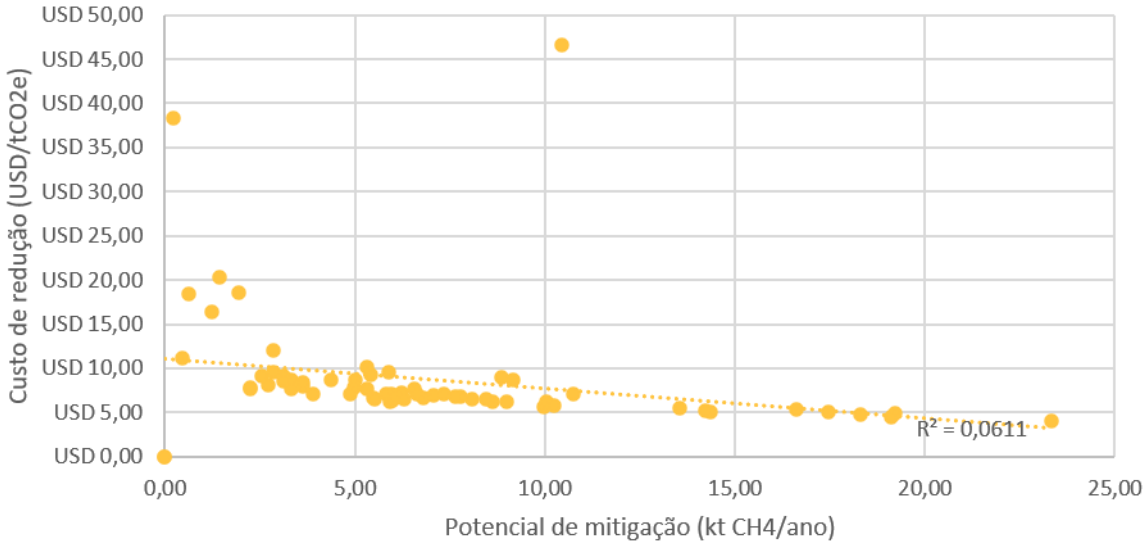
Aterros com infraestrutura de captação de gás já instalada também apresentam, em geral, custos de redução mais baixos do que locais onde seria necessário instalar novos sistemas. Os locais com sistemas existentes representam aproximadamente 266 $ktCH_4$/ano de potencial de mitigação e apresentam um custo mediano de redução de aproximadamente 6,48 USD/tCO_2e. Em comparação, os locais sem sistemas de captação de gás representam aproximadamente 189 $ktCH_4$/ano de potencial de mitigação e apresentam um custo mediano de redução de aproximadamente 8,52 USD/tCO_2e. Esses resultados estão resumidos na Tabela 6 .

Tabela 6 — Custos de redução para aterros com/sem sistemas de coleta de gás existentes

Coleta de gás existente	Projetos	CAPEX ($m)	Mitigação (kt CH_4/ano)	Custo mediano ($/$tCO_2e$)
Sim	33	645,2	266,4	6,48
Não	33	434,0	189,2	8,52

Figura 9 mostra que os custos de redução são influenciados tanto pelo potencial de mitigação quanto pela escala da infraestrutura de coleta necessária. Embora muitos projetos apresentem custos inferiores a 10 USD/tCO_2e, um pequeno número de locais apresenta custos substancialmente mais elevados, chegando a cerca de 50 USD/tCO_2e. Esses custos mais elevados estão associados, principalmente , a locais que combinam um potencial de mitigação relativamente baixo com sistemas de coleta de grande porte, resultando em elevados requisitos de investimento em relação ao volume de emissões que podem ser mitigadas.

Figura 9 - Gráfico de dispersão dos custos de redução e do potencial de mitigação por aterro



Os projetos de maior custo, incluindo o Recebimento de Resíduos da Construção Civil de Baldan (18 USD/tCO_2e), o Aterro Sanitário de Boa Vista (20 USD/tCO_2e), o Aterro Sanitário do Município de Joinville (16 USD/tCO_2e) e o CGA BARU (19 USD/tCO_2e), combinam um potencial de mitigação relativamente modesto, de 1 a 3 ktCH_4/ano, com grandes áreas de superfície de aterro (29 a 80 acres).

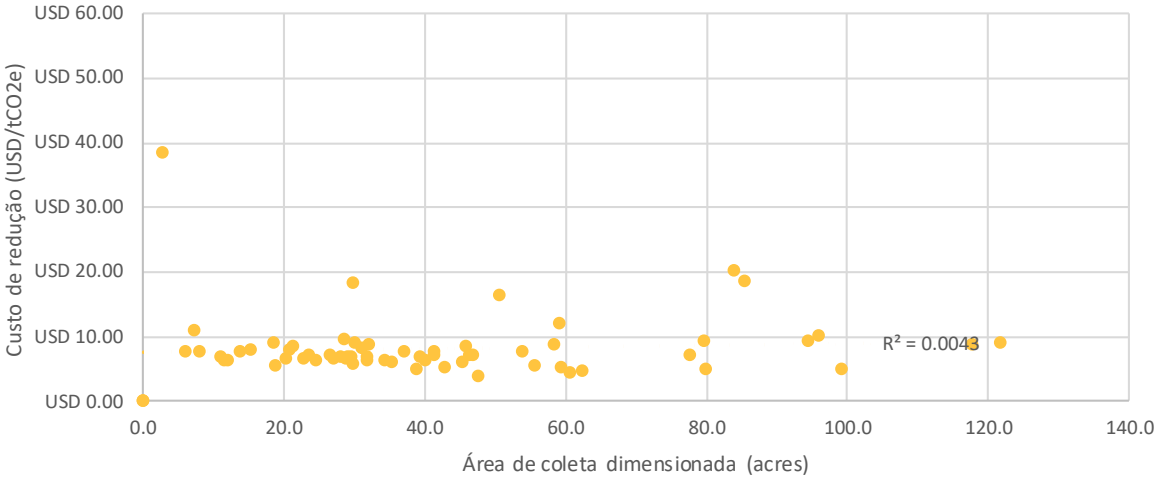
O Ecoparque Corpus – Unidade Indaiatuba representa um caso à parte. Seu alto custo de redução (38 USD/tCO_2e) está associado a um potencial de mitigação adicional muito pequeno, de aproximadamente 0,23 ktCH_4/ano, uma vez que o local já alcança um alto grau de captura de metano. Consequentemente, mesmo custos adicionais relativamente modestos resultam em um alto custo por tonelada de emissões evitadas.

O CTR Cachoeiro de Itapemirim (47 USD/tCO_2e) parece ser um caso atípico, com uma área de 1.946 acres, o que provavelmente indica um erro nos dados relativos às características do aterro.

De modo geral, a área do aterro por si só não parece ser um forte indicador do custo de redução. Vários aterros de grande porte apresentam custos de redução relativamente baixos, nos quais é possível obter reduções substanciais de metano. Em vez disso, os resultados indicam que a relação entre a escala do

sistema de coleta necessário e o potencial de mitigação alcançável é importante para a viabilidade econômica do projeto. Excluindo o valor atípico, os cinco projetos de maior custo apresentam uma intensidade de área mediana de aproximadamente 42 acres padronizados por $ktCH_4$ mitigado, em comparação com aproximadamente 6 acres padronizados por $ktCH_4$ para o restante do portfólio.

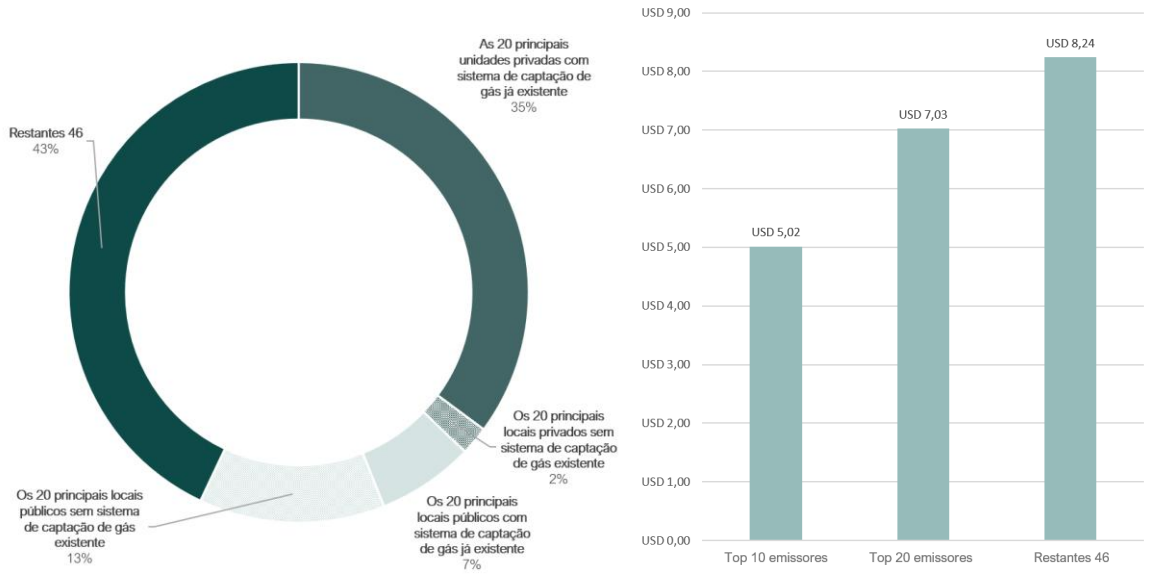
Figura 10 - Gráfico de dispersão dos custos de redução e da área de superfície para a expansão do sistema de coleta de gás por aterro (excluindo o valor atípico de área)



Um número relativamente pequeno de aterros é responsável por uma grande parcela do potencial total de mitigação. Os 10 principais locais representam 37% do potencial total de mitigação, com um custo médio ponderado de redução de 5,02 USD/tCO_2e, em comparação com 8,24 USD/tCO_2e para os 56 locais restantes. Os 20 locais com maior emissão representam 57% do total, com um custo ponderado de redução de 7,03 USD/tCO_2e, ligeiramente inferior aos 8,24 USD/tCO_2e estimados para os demais locais.

Notavelmente, 7 dos 10 locais com maior emissão e 15 dos 20 locais com maior emissão já relatam a existência de sistemas de captação de gás de aterro. Isso indica que muitas das oportunidades de mitigação com maior potencial e menor custo estão associadas a locais grandes e já estabelecidos, onde ainda é possível obter reduções significativas de metano, apesar da presença de infraestrutura de captação já existente. Entre os locais com maiores emissões, a propriedade estava dividida: 4 dos 10 locais com maiores emissões são de propriedade privada, enquanto 13 dos 20 locais com maiores emissões são de propriedade privada. Com base nos potenciais de mitigação, isso divide a parcela das emissões predominantemente para o setor privado (36%) em comparação com o setor público (18%) para os 20 locais com maiores emissões.

Figura 11 - Participação no potencial total de mitigação para todos os locais (à esquerda) e custos de redução em dólares americanos por tonelada de CO_2e (à direita)



No total, 57 dos 66 aterros avaliados apresentam custos de redução inferiores a 10 USD/tCO_2e, representando, em conjunto, 95% do potencial total de mitigação. Os resultados indicam que priorizar aterros de grande porte e com altas emissões poderia constituir uma abordagem economicamente viável para reduzir as emissões de metano, uma vez que uma parcela substancial do potencial de mitigação identificado pode ser abordada a um custo relativamente baixo. Muitos desses locais também estão entre as maiores fontes de emissão de metano identificadas na análise.

5 Discussão

5.1 Implicações para a mitigação do metano no Brasil

Os resultados sugerem que os esforços de mitigação de metano em aterros no Brasil poderiam, inicialmente, concentrar-se em um número relativamente limitado de aterros superemissores, nos quais reduções substanciais podem ser alcançadas a custos de redução relativamente baixos. Priorizar esses locais poderia constituir um ponto de partida prático para a implementação, enquanto a experiência adquirida por meio de projetos iniciais poderia apoiar esforços de mitigação subsequentes em uma gama mais ampla de instalações.

É importante ressaltar que muitas das maiores oportunidades de mitigação identificadas na análise estão associadas a aterros onde já existem sistemas de coleta de gás de aterro (LFG). A presença de infraestrutura de coleta não deve, portanto, ser necessariamente interpretada como um indício de que o potencial de mitigação disponível já tenha sido aproveitado. Os resultados destacam a importância de considerar melhorias nos sistemas existentes, paralelamente à instalação de nova infraestrutura de coleta.

Para locais com custos de redução mais elevados, fontes adicionais de receita ou apoio financeiro poderiam melhorar a viabilidade econômica do projeto. As receitas do mercado de carbono, o financiamento climático, o apoio público e as receitas decorrentes da utilização do gás de aterro poderiam, portanto, desempenhar um papel na ampliação da implementação para além das oportunidades de menor custo identificadas na análise.

Embora os resultados identifiquem claramente um conjunto de oportunidades de fácil acesso, eles não sugerem que os esforços de mitigação devam se limitar exclusivamente aos locais maiores e de menor custo. Em vez disso, as conclusões destacam o valor potencial de mecanismos financeiros e de políticas

complementares que poderiam expandir a implementação para além do grupo prioritário inicial. Muitos projetos com custos de redução moderados ou mais elevados continuam capazes de proporcionar reduções significativas de metano, especialmente quando há disponibilidade de receitas provenientes da utilização de gás de aterro, fundos climáticos, receitas do mercado de carbono ou mecanismos de apoio público. Sob condições favoráveis do mercado de carbono, uma proporção substancial de projetos que atualmente parecem marginais poderia se tornar economicamente atraente. Os créditos de carbono podem ser particularmente relevantes para projetos de metano em aterros. Informações recentes do mercado sugerem que os créditos voluntários de gás de aterro podem atualmente atingir preços acima de aproximadamente 4,5 USD/tCO_2e, enquanto os créditos autorizados pelo governo brasileiro para uso como Resultados de Mitigação Transferidos Internacionalmente (ITMOs) no âmbito do Esquema de Compensação e Redução de Carbono para a Aviação Internacional (CORSIA) poderiam potencialmente atingir valores na faixa de aproximadamente 13 a 15,5 USD/tCO_2e, sujeitos aos requisitos de elegibilidade e à correspondente autorização de ajuste por parte do Brasil.[35] Nesses cenários, as receitas de carbono poderiam melhorar significativamente a viabilidade econômica dos projetos e reduzir os custos efetivos de redução de emissões, particularmente para projetos que atualmente se encontram próximos da viabilidade econômica com base apenas nas receitas de energia. Portanto, os VPLs negativos relatados para muitos projetos devem ser considerados no contexto das premissas aplicadas e não necessariamente como evidência de que a implementação seria comercialmente pouco atraente em todas as condições de mercado.

Por fim, o estudo ilustra o valor da adoção de uma estratégia de mitigação de metano baseada em medições. As abordagens tradicionais de inventário continuam essenciais para estimar as emissões nacionais, enquanto as observações por satélite demonstram a capacidade das tecnologias de sensoriamento remoto de identificar instalações individuais com altas emissões e apoiar os esforços de priorização. A combinação de observações por satélite, dados no nível das instalações, avaliações de engenharia e monitoramento contínuo do sistema de captação de gás de aterro cria uma estrutura prática para direcionar recursos às fontes de emissão mais significativas e verificar a eficácia das ações de mitigação ao longo do tempo. Isso é especialmente relevante no âmbito da iniciativa de superemissores no Brasil, onde a combinação adequada de dados pode promover a transparência e a mitigação eficaz onde ela tem maior impacto.

5.2 Comparação entre as emissões de FOD modeladas e as emissões observadas pela Carbon Mapper

A diferença entre as estimativas do FOD ajustadas pela recuperação e as observações da Carbon Mapper provavelmente reflete incertezas e diferenças metodológicas associadas a ambas as abordagens. O modelo FOD baseia-se em suposições relativas ao histórico de descarte de resíduos, à composição dos resíduos, ao potencial de geração de metano (L_0), às taxas de decomposição (k) e ao desempenho da recuperação de metano, fatores que influenciam as emissões estimadas. Além disso, os cálculos do FOD realizados neste estudo não incluíram a oxidação do metano nos solos de cobertura dos aterros, o que contribuiu para uma certa superestimativa das emissões, particularmente em aterros bem gerenciados com sistemas de cobertura estabelecidos.

Ao mesmo tempo, as observações da Carbon Mapper podem subestimar as emissões totais, pois quantificam principalmente plumas de metano detectáveis e podem não capturar totalmente as emissões difusas, as liberações de baixa concentração ou as emissões que ocorrem fora dos períodos de observação por satélite.

[35] Quantum Commodity Intelligence. (s.d.). *Quantum Commodity Intelligence*. Disponível em: https://www.qcintel.com/ (Acessado em setembro de 2026)

Os resultados sugerem, portanto, que as emissões reais podem situar-se entre as estimativas modeladas e as baseadas em observações para muitos locais. Embora as estimativas de FOD ajustadas pela recuperação mostrem concordância razoável com o componente de aterros controlados do inventário nacional do Brasil, ainda existem diferenças significativas entre os métodos. Portanto, considerar as duas abordagens em conjunto pode ajudar a identificar locais onde as estimativas de emissões divergem substancialmente e onde investigações adicionais ou dados específicos do local mais precisos podem ser particularmente valiosos.

5.3 Impacto de práticas alternativas de gestão de aterros

As emissões de metano dos aterros são influenciadas por uma série de práticas de gestão que vão além da captação de gás de aterro (GAA). Essas medidas podem reduzir a geração de metano, aumentar a oxidação do metano ou melhorar a captação de gás ao limitar as emissões fugitivas. Como esses mecanismos interagem entre si, seus impactos não devem ser somados diretamente ao potencial de mitigação estimado para sistemas aprimorados de captação de GAA. Medidas que reduzem a geração de metano também reduzem a quantidade de gás disponível para recuperação, enquanto medidas que melhoram o desempenho operacional podem aumentar a eficiência da coleta.[36,37]

O modelo de decaimento de primeira ordem (FOD) captura alguns desses efeitos por meio de parâmetros como o Fator de Correção de Metano (MCF) e o fator de oxidação (OX), mas muitos fatores operacionais importantes que influenciam as emissões não são representados explicitamente. Fatores como a integridade da cobertura, o gerenciamento da frente de trabalho, as condições de umidade, o desempenho da drenagem, as vias de migração do gás e o tempo de inatividade do sistema de coleta podem influenciar fortemente as emissões, embora permaneçam fora do escopo da modelagem FOD convencional.[38] Consequentemente, o FOD é adequado para estimar a geração de metano a longo prazo, mas é menos eficaz para prever emissões operacionais específicas do local e eventos de superemissão identificados por meio de sensoriamento remoto.

Para o portfólio de aterros brasileiros avaliado neste estudo, as medidas alternativas mais relevantes provavelmente serão aquelas que melhorem o desempenho dos sistemas de captação de gás existentes. Dos locais avaliados, 50% relatam possuir infraestrutura de captação de gás; no entanto, esses locais são responsáveis por uma grande parcela das emissões de metano observadas, indicando oportunidades substanciais de otimização. Medidas como sistemas de cobertura aprimorados, minimização das áreas de trabalho ativas, melhor gestão da drenagem, expansão oportuna das redes de captação e aprimoramento da operação e manutenção podem reduzir as emissões fugitivas e, ao mesmo tempo, melhorar a recuperação de metano.[39] [40] Essa observação é consistente com a constatação de que muitas das maiores oportunidades de mitigação ocorrem em aterros onde já existem sistemas de captação, mas que não estão operando em seu pleno potencial.

---

[36] Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. (2019). *Atualização de 2019 das Diretrizes do IPCC de 2006 para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa, Volume 5: Resíduos, Capítulo 3: Descarte de Resíduos Sólidos*. Disponível em: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/5_Volume5/19R_V5_3_Ch03_SWDS.pdf (Acessado em setembro de 2026)

[37] Agência de Proteção Ambiental dos EUA. (2024a). *Manual de Desenvolvimento de Projetos de Energia a partir de Gás de Aterro (LFG)*. Programa de Divulgação sobre Metano de Aterros Sanitários. Disponível em: https://www.epa.gov/lmop/landfill-gas-energy-project-development-handbook (Acessado em setembro de 2026)

[38] Krause, M.J. (2018). Protocolo de metano de aterros sanitários do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas: uma análise de 20 anos de aplicação. *Waste Management & Research*, 36(9), 827–840. Disponível em: https://www.swa.org/DocumentCenter/View/6472/Intergovernmental-panel-on-climate-changes-landfill-methane-protocol-Reviewing-20-years-of-application?bidId= (Acessado em setembro de 2026)

[39] Scarpelli, T.R. et al. (2024). Investigação das principais fontes de emissões de metano em aterros sanitários dos EUA. *Environmental Science & Technology*, 58, 21545–21556. Disponível em: https://pubs.acs.org/esthag/article-pdf/58/49/21545/1686035/es4c07572.pdf (Acessado em setembro de 2026)

[40] *Fundação de Pesquisa e Educação Ambiental (EREF) (2025). Análise crítica da literatura sobre a eficiência da captação de gás de aterro. Fundação de Pesquisa e Educação Ambiental. Disponível em: www.erefdn.org*

Outras abordagens de gestão, incluindo coberturas biológicas, operação semi-aeróbica, aeração ativa e desvio de resíduos orgânicos, também podem reduzir as emissões em condições adequadas. No entanto, ao contrário das medidas que melhoram a captura de gás, essas abordagens geralmente reduzem a geração de metano e, portanto, podem diminuir a quantidade de gás disponível para recuperação de energia ou produção de biometano. Sua adequação deve, portanto, ser avaliada caso a caso, levando em consideração tanto os objetivos de redução de emissões quanto a viabilidade técnica e econômica da utilização do gás de aterro.

De modo geral, as práticas alternativas de gestão de aterros devem ser vistas como complementares à coleta de gás de aterro, e não como medidas de mitigação independentes. Seus efeitos não devem ser somados diretamente ao potencial estimado de mitigação para a coleta de gás de aterro, pois isso acarretaria o risco de contagem dupla das reduções. Em vez disso, a modelagem de FOD, observações remotas como a Carbon Mapper e avaliações de engenharia específicas para cada local devem ser utilizadas em conjunto para avaliar estratégias integradas de mitigação e identificar a combinação mais adequada de medidas para cada aterro.

5.4 Benefícios colaterais da captação de gás de aterro

Além dos retornos financeiros e da mitigação climática, melhorar a captura de gás de aterro e as práticas de gestão associadas em locais brasileiros pode trazer benefícios substanciais à saúde pública e à qualidade do ar, uma vez que a captura e a destruição do gás reduzem as emissões de compostos orgânicos voláteis, odores e precursores do ozônio troposférico que afetam a qualidade do ar local.[41] Um estudo brasileiro recente sobre um aterro sanitário em Maringá confirma que a recuperação controlada de biogás reduz de forma mensurável a exposição da população a esses poluentes nocivos, um benefício particularmente valioso, considerando o número de locais que ainda operam como lixões controlados ou a céu aberto.[42] Além disso, a remoção de compostos de enxofre, como o sulfeto de hidrogênio, reduz os odores que são uma fonte persistente de reclamações da comunidade nas proximidades dos aterros.[43]

6 Conclusões

Este estudo avaliou o potencial de mitigação de metano de 66 aterros no Brasil, identificados por meio de observações de satélite fornecidas pela Carbon Mapper. Ao combinar emissões de metano baseadas em observações, informações específicas dos aterros, modelagem de FOD e análise econômica, o estudo oferece uma avaliação preliminar da escala, do custo e da distribuição das oportunidades de mitigação de metano em um subconjunto significativo do setor de resíduos do Brasil.

Os resultados indicam que o portfólio avaliado representa uma fonte substancial de emissões de metano. As observações anualizadas da Carbon Mapper estimam emissões de aproximadamente 642 ktCH4/ano, o que equivale a cerca de 29% das emissões de metano relatadas para o setor de disposição final de resíduos do Brasil, apesar de representarem apenas 66 das 1.005 (6,6%) instalações de aterros e controlados em todo o país. Essas descobertas confirmam que as emissões de metano estão altamente

[41] EPA dos EUA (2026). *Benefícios dos projetos de energia a gás de aterro.* Programa de Divulgação do Metano de Aterros (LMOP). Disponível em: https://www.epa.gov/lmop/benefits-landfill-gas-energy-projects (Acessado em setembro de 2026)

[42] Nazzari, E. C., et al. (2026). *Do Resíduo à Saúde: A Recuperação de Biogás de Aterros como Estratégia para a Mitigação de Gases de Efeito Estufa e Benefícios Colaterais à Saúde Pública no Brasil.* Revista Internacional de Pesquisa Ambiental e Saúde Pública, 23(5), 648. Disponível em: https://www.mdpi.com/1660-4601/23/5/648 (Acessado em setembro de 2026)

[43] Pecorini, I., et al. (2020). *Mitigação das emissões de metano, NMVOCs e odores em sistemas de biofiltração ativa e passiva em aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos.* Sustentabilidade, 12(8), 3203. Disponível em: https://www.mdpi.com/2071-1050/12/8/3203 (Acessado em setembro de 2026)

concentradas em um número limitado de grandes aterros superemissores e demonstram o valor das observações por satélite para identificar oportunidades prioritárias de mitigação.

A análise estima que aproximadamente 456 $ktCH_4$/ano das emissões observadas poderiam ser mitigadas por meio de uma melhor gestão do gás de aterro, o que corresponde a cerca de 71% das emissões observadas nos locais avaliados e a cerca de 20% das emissões de resíduos sólidos relatadas pelo Brasil para 2024. É importante ressaltar que a maior parte desse potencial de mitigação está associada a aterros onde já existe infraestrutura de captação de gás. Aproximadamente 266 $ktCH_4$/ano do potencial de mitigação está associado a locais que já relatam a existência de sistemas de captação de gás de aterro, enquanto 189 $ktCH_4$/ano está associado a locais onde seria necessário instalar infraestrutura de captação. Essa constatação destaca que reduções substanciais de metano podem ser alcançadas não apenas por meio da implantação de novos sistemas, mas também por meio da otimização, expansão e melhoria da operação da infraestrutura existente.

As oportunidades de mitigação identificadas neste estudo estão amplamente associadas a um número relativamente pequeno de locais. Os 10 principais locais representam 37% do potencial total estimado de mitigação, enquanto os 20 locais com maior emissão representam 57%. Além disso, esses locais apresentam custos médios ponderados de redução substancialmente mais baixos do que o restante dos locais avaliados. De maneira mais ampla, 57 dos 66 locais avaliados apresentam custos estimados de redução inferiores a 10 USD/$tCO2_e$ representam aproximadamente 95% do potencial total de mitigação. Projetos de gás de aterro de maior porte geralmente apresentam custos de redução mais baixos, refletindo economias de escala e a capacidade de distribuir os custos de infraestrutura por volumes maiores de recuperação de metano. Esses resultados sugerem que priorizar aterros de alto potencial e baixo custo poderia proporcionar uma parcela substancial das reduções de metano identificadas a um custo relativamente baixo.

A comparação entre as emissões modeladas pelo FOD e as observações da Carbon Mapper demonstra a importância de combinar múltiplas abordagens na avaliação das emissões de metano de aterros. O modelo FOD estimou aproximadamente 1.444 $ktCH_4$/ano de emissões em todo o portfólio avaliado, valor substancialmente superior aos 642 $ktCH_4$/ano derivados das observações da Carbon Mapper. As diferenças observadas refletem uma combinação de abordagens fundamentalmente diferentes para caracterizar as emissões de aterros e incertezas gerais associadas a ambas as abordagens, incluindo limitações na detecção por satélite e simplificações inerentes às metodologias de modelagem. Os resultados, portanto, destacam a importância de integrar observações de cima para baixo, modelagem de baixo para cima e medições no nível local para aprimorar os inventários de metano e apoiar o planejamento de mitigação.

De modo geral, os resultados demonstram que a mitigação do metano em aterros representa uma oportunidade significativa e amplamente acessível para a redução das emissões de gases de efeito estufa no Brasil. A combinação de um potencial de mitigação substancial, custos de redução relativamente baixos e a concentração de oportunidades em um número limitado de grandes instalações cria condições favoráveis para reduções rápidas das emissões. Ao priorizar aterros com altas emissões, melhorar o desempenho dos sistemas de coleta de gás existentes e aproveitar abordagens de monitoramento baseadas em medições, o Brasil poderia alcançar reduções significativas de metano no curto prazo, ao mesmo tempo em que geraria benefícios adicionais para o meio ambiente, a saúde pública e a recuperação de energia. Além do escopo deste estudo, as medidas propostas devem ser consideradas em paralelo com medidas a montante que visam reduzir a geração de resíduos e desviar o descarte de resíduos, a fim de alcançar reduções de longo prazo nas emissões de metano no setor de resíduos.

7 Referências

ABREMA (2024). *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2024.* Disponível em: https://www.abrema.org.br/panorama/ (Acessado em setembro de 2026)

Banco central do Brazil (2026). *Selic interest rate.* Disponível em: https://www.bcb.gov.br/en/monetarypolicy/selicrate (Acessado em setembro de 2026)

Barlaz, M.A., Chanton, J.P. and Green, R.B. (2009). *Controls on Landfill Gas Collection Efficiency: Instantaneous and Lifetime Performance.* Disponível em: https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.3155/1047-3289.59.12.1399 (Acessado em setembro de 2026)

Blue Green Atlas. (n.d.). *The climate of Brazil.* Disponível em: https://bluegreenatlas.com/climate/brazil_climate.html (Acessado em setembro de 2026)

Brazil tax brief (2026). Corporate Tax in Brazil: The Complete Guide for Foreign Companies (2026). Disponível em: https://braziltaxbrief.com/posts/corporate-tax-brazil-complete-guide/ (Acessado em setembro de 2026)

Carbon Limits (2024). *Methane Super Emitters – Low Cost, High Impact: Satellite Insights on Global Methane Super-Emitters.* Disponível em: https://www.carbonlimits.no/projects/methane-super-emitters-kizd1 (Acessado em in July 2026)

Carbon Mapper (2025). Product Guide: Data Definition & Specification. Disponível em: https://carbonmapper.org/articles/product-guide (Acessado em setembro de 2026)

Carbon Mapper (2026). *Frequently Asked Questions (FAQs).* Disponível em: https://carbonmapper.org/about/faq (Acessado em setembro de 2026)

Chen et al. (2022). *Quantifying Regional Methane Emissions in the New Mexico Permian Basin with a Comprehensive Aerial Survey.* Disponível em: https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.1c06458 (Acessado em in July 2026)

DNB (2026). *Currency converter.* Disponível em: https://www.dnb.no/en/markets/fx-and-ir/currency-converter (Acessado em setembro de 2026)

Electricity Trading Chamber (Câmara de Comercialização de Energia Elétrica) (CCEE). *Panel de preços.* Disponível em: https://www.ccee.org.br/en/precos/painel-precos (Acessado em setembro de 2026)

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

Environmental Research & Education Foundation (EREF) (2025). *Critical Analysis of Literature on Landfill Gas Collection Efficiency – Executive Summary.* Disponível em: https://erefdn.org/wp-content/uploads/2025/03/Landfill-Gas-Collection-Efficiency-Executive-Summary.pdf (Acessado em setembro de 2026)

Government of Brazil (2024). *Brazil National Inventory Report 2024.* Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-bienais-de-transparencia-btrs/relatorios_slogo/bra_nir_2024_eng_slogo.pdf (Acessado em September 8th, 2026)

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). *Dashboard of indicators.* Disponível em: https://www.ibge.gov.br/en/indicators.html (Acessado em setembro de 2026)

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 5: Waste, Chapter 3: Solid Waste Disposal.* Disponível em: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/5_Volume5/V5_3_Ch3_SWDS.pdf (Acessado em setembro de 2026)

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2019). *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 5: Waste, Chapter 3: Solid Waste Disposal.* Disponível em: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/5_Volume5/19R_V5_3_Ch03_SWDS.pdf (Acessado em setembro de 2026)

Krause, M.J. (2018). Intergovernmental Panel on Climate Change's landfill methane protocol: Reviewing 20 years of application. *Waste Management & Research*, 36(9), 827–840. Disponível em: https://www.swa.org/DocumentCenter/View/6472/Intergovernmental-panel-on-climate-changes-landfill-methane-protocol-Reviewing-20-years-of-application?bidId= (Acessado em setembro de 2026)

Lair, A., Mansuy, M., Romand, C., Oberti, O., Pradels, C., Barina, G., Denoun, T., Venturini, M. and Trommsdorff, C. (2024). *Enhancing landfill efficiency to drive greenhouse gas reduction: A comprehensive study on best practices and policy recommendations.* Disponível em: https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/0734242X241270951 (Acessado em setembro de 2026)

Ministério das Cidades (2025). *Relatório dos Serviços de Limpeza Urbana e Manejo de Resíduos Sólidos – SINISA 2024 (ano de referência 2023).* Disponível em: https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/sinisa/resultados-sinisa (Acessado em setembro de 2026)

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. Disponível em: https://www.mdpi.com/1660-4601/23/5/648 (Acessado em setembro de 2026)

Pecorini, I., et al. (2020). *Mitigation of Methane, NMVOCs and Odor Emissions in Active and Passive Biofiltration Systems at Municipal Solid Waste Landfills.* Sustainability, 12(8), 3203. Disponível em: https://www.mdpi.com/2071-1050/12/8/3203 (Acessado em setembro de 2026)

Quantum Commodity Intelligence. (n.d.). *Quantum Commodity Intelligence.* Disponível em: https://www.qcintel.com/ (Acessado em setembro de 2026)

Scarpelli, T., Cusworth, D., Kim, J., O'Neill, K., Duren, R., and Howell, K.: Using point source imaging satellite observations to guide landfill methane model improvements at the national and sub-national scale, EGU General Assembly 2026, Vienna, Austria, 3–8 May 2026, EGU26-7927, https://doi.org/10.5194/egusphere-egu26-7927, 2026

Scarpelli, T.R. et al. (2024). Investigating major sources of methane emissions at US landfills. *Environmental Science & Technology*, 58, 21545–21556. Disponível em: https://pubs.acs.org/esthag/article-pdf/58/49/21545/1686035/es4c07572.pdf (Acessado em setembro de 2026)

SEEG (2024). *Waste Sector - Final Disposal methane emissions.* Disponível em: https://plataforma.seeg.eco.br/?yearRange%5B0%5D=2024&yearRange%5B1%5D=2024&sector%5B0%5D=586&category%5B0%5D=1175&emissionType%5B0%5D=1&gas=1&groupBy=State&rankBy=State&filtersTab=filters&statisticsTab=historical (Acessado em setembro de 2026)

Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), Observatório do Clima (2025). *Análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil (1970–2024).* Disponível em: https://seeg.eco.br (Acessado a 6 de Outubro 2026).

U.S. Environmental Protection Agency (EPA) (2020). *LFG Energy Project Development Handbook: Chapter 7 – Best Practices for Landfill Gas Collection System Design and Installation.* Disponível em: https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-03/documents/pdh_chapter7.pdf (Acessado em setembro de 2026)

U.S. Environmental Protection Agency (EPA) (2023). *Landfill Gas Energy Cost Model (LFGcost-Web) User's Manual, Version 3.6.* Disponível em: https://www.epa.gov/system/files/documents/2023-09/lfgcost_web_v3.6_usersmanual_sep2023.pdf (Acessado em setembro de 2026)

U.S. Environmental Protection Agency. (2024). *LFG energy project development handbook.* Landfill Methane Outreach Program. Disponível em: https://www.epa.gov/lmop/landfill-gas-energy-project-development-handbook (Acessado em setembro de 2026)

U.S. Environmental Protection Agency (EPA) (2025). *Table HH-3 to Subpart HH of Part 98 – Landfill Gas Collection Efficiencies.* Disponível em: https://www.ecfr.gov/current/title-40/chapter-I/subchapter-C/part-98/subpart-HH/appendix-Table%20HH-3%20to%20Subpart%20HH%20of%20Part%2098 (Acessado em setembro de 2026)

US EPA (2026). *Benefits of Landfill Gas Energy Projects*. Landfill Methane Outreach Program (LMOP). Disponível em: https://www.epa.gov/lmop/benefits-landfill-gas-energy-projects (Acessado em setembro de 2026)