

UMA ANÁLISE SOBRE POSSÍVEIS CENÁRIOS NO BRASIL SOBRE A GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

1 INTRODUÇÃO

Segundo o relatório do Banco Mundial, em 2016, os resíduos sólidos geraram aproximadamente 1,6 bilhão de toneladas de CO₂ equivalente em emissões de gases de efeito estufa (World Bank, 2021). No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) regulamenta e estabelece metas para a gestão de resíduos, sugerindo que políticas públicas adotem novos cenários que incluam reciclagem, recuperação energética e compostagem de resíduos orgânicos, com a participação ativa de agentes econômicos na utilização do composto gerado (BRASIL, Lei No. 12.305, 2010).

Um sistema eficaz de gestão de resíduos requer planejamento abrangente em todas as etapas, desde a coleta até a disposição final (World Bank, 2021). Segundo o relatório de Diretrizes e Princípios de Inventário por Assessment (1993), esse planejamento deve ser baseado na análise de cenários que considerem o ciclo de vida completo da gestão de resíduos. O relatório do Banco Mundial (2021) recomenda uma análise criteriosa das opções disponíveis antes da formulação de planos nacionais, considerando a situação atual, explorando cenários potenciais e avaliando os benefícios de abordagens alternativas para o desenvolvimento do setor.

Chen et al. (2020) investigaram o ciclo de vida do tratamento de resíduos domésticos em comunidades-piloto chinesas, utilizando cenários e a metodologia IPCC para calcular emissões de carbono, contribuindo para a tomada de decisões no gerenciamento de resíduos urbanos de baixo carbono. Pérez et al. (2021) modelaram seis cenários de gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU) em Valdivia, Chile, que descarta 95% de seus resíduos em lixões, e compartilha características com outras cidades do Sul Global, podendo a metodologia deste estudo pode ser aplicada a outras cidades com desafios semelhantes.

Estudos recentes de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) têm comparado métodos alternativos de tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), mas ainda se mostram limitados e específicos. Paes et al. (2020) avaliaram cenários, incluindo tratamento mecânico-biológico (MBT), enquanto Deus et al. (2017) analisaram o impacto ambiental de um programa integrado de reciclagem e compostagem, ambos em São Paulo. Os autores notaram a falta de abordagem do estágio de transporte de RSU no Brasil e a necessidade de pesquisas sobre digestão anaeróbica, devido à alta geração de materiais biodegradáveis. Muller et al. (2021) examinaram opções de tratamento de RSU em Juazeiro do Norte, Ceará, considerando critérios econômicos e ambientais. Entretanto, o autor utilizou cenários impraticáveis, adotando taxas de reciclagem de 100%, além de não considerar a receita de GEE pela redução na demanda de energia e as emissões de CO₂ biogênico dos resíduos orgânicos.

O problema está na necessidade de uma avaliação abrangente dos impactos ambientais, apresentando opções de tratamento viáveis, porém ainda não aplicadas na região do nordeste brasileiro. Este estudo utiliza uma ACV para analisar os impactos ambientais de alternativas de gestão de RSU em uma cidade brasileira, considerando todo o ciclo de vida dos resíduos, desde a geração até a disposição final. Os cenários propostos no estudo são fundamentados nas sugestões de desenvolvimento da PNRS, delineando possíveis melhorias para o sistema atual com alternativas que unam a reciclagem, o tratamento de orgânicos e o tratamento energético. Os objetivos específicos são: (1) Propor cenários ideais de gerenciamento de RSU a partir da otimização das instalações já existentes e (2) quantificar as emissões de gases de efeito estufa, propondo ações futuras para implementação dos melhores cenários de ecoeficiência para a realidade local.

2 MÉTODO

2.1 ÁREA DE ESTUDO

Este estudo propõe cenários estratégicos para atingir as metas da política nacional de gestão de resíduos, aplicados à cidade de Cajazeiras, no Nordeste do Brasil. Em 2022, a região gerou 10,4 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos, frequentemente descartados em lixões e aterros controlados, com apenas 1,6% dos resíduos orgânicos encaminhados para compostagem (Abrelpe, 2022; IPEA, 2012). Cajazeiras contribui com 10,59 mil toneladas de resíduos anuais, sendo mais da metade orgânicos.

O cenário de referência para este estudo é a gestão de resíduos em Cajazeiras - PB, onde a Unidade de Processamento de Materiais Recicláveis (UPMR), instalada pela cooperativa Recicleiros em 2023, recupera 3,49% dos resíduos da cidade. A coleta seletiva é feita porta a porta com caminhões gaiolas e inclui triagem manual na UPMR. O vidro é moído, o papelão é prensado e outros materiais são separados e prensados quando em quantidade suficiente. A operação é realizada por catadores e os materiais recicláveis são comercializados. Os rejeitos são enviados para o aterro sanitário de Sousa. O estudo considera a possibilidade de aumentar a recuperação de resíduos por meio da otimização da UPMR e da instalação de uma nova unidade de reciclagem.

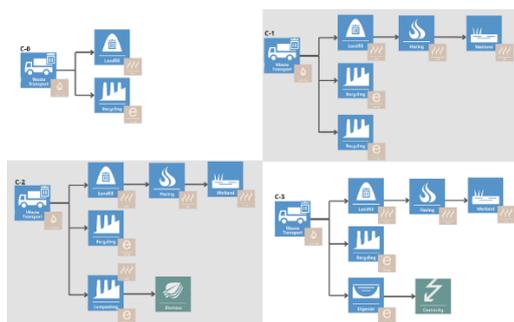
O segundo modo de tratamento está localizado em Sousa, a 52,5 km de Cajazeiras. O aterro controlado, em funcionamento desde 2022, recebeu 96,51% dos resíduos de Cajazeiras em 2023 e também atende outras cidades da região. A coleta é feita porta a porta com caminhões compactadores e basculantes, e no aterro, uma retroescavadeira distribui o material, que é compactado por um trator e coberto. O lixiviado é armazenado em lagoa para tratamento químico. Alternativas como unidades de compostagem, digestão anaeróbica ou a instalação de estrutura para coleta e queima de biogás em flare podem ser consideradas para cenários futuros.

2.2 MODELAGEM DE CENÁRIOS

Os cenários foram baseados na composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos (RSU). O objetivo foi entender as necessidades de gerenciamento, destacando que os resíduos orgânicos representam mais de 45% do volume total e os recicláveis, 50%. Os cenários buscaram melhorar o sistema atual, mantendo as principais unidades de tratamento, como a unidade de reciclagem e o aterro sanitário, e alinharam-se com as quatro metas da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS): i) Eliminação de lixões e aterros controlados; ii) Recuperação da fração orgânica por tratamento biológico; iii) Reciclagem da fração seca dos recicláveis; iv) Aproveitamento energético por tratamento térmico.

Os três cenários modelados, como apresentados na Figura 1, incluem uma proposta de unidade de reciclagem e aterro sanitário com gerenciamento semi-aeróbico eficaz. Além disso, os cenários incorporam novas instalações de gerenciamento de resíduos, como unidades de compostagem, digestão anaeróbica e usina de reciclagem. As melhorias específicas nos cenários são: (i) Implementação de um sistema de tratamento de lixiviados, ausente no aterro do cenário base; (ii) Integração do sistema de drenagem de lixiviados com o sistema de ventilação de gás e queima em flare além da reciclagem de uma fração da borracha no cenário 1; (iii) Utilização de material de cobertura permeável, com composto produzido localmente para melhorar o tratamento no aterro no cenário 2; e (iv) Tratamento anaeróbio do biogás para geração de eletricidade no cenário 3.

Figura 1 - Modelagem dos cenários de gestão de resíduos



Fonte: autores.

- cenário 0 (C0): Cenário base de Cajazeiras: reciclagem da fração de material seco (papel, plástico, metal e vidro) e aterramento sanitário da fração residual não-reciclável e do material orgânico biodegradável.
- cenário 1 (C1): reciclagem da fração de material seco (papel, plástico, metal e vidro) e aterramento sanitário da fração residual não-reciclável e do material orgânico biodegradável com coleta do biogás e queima em flare;
- cenário 2 (C2): reciclagem da fração de material seco (papel, plástico, metal e vidro), compostagem do material orgânico biodegradável e aterramento sanitário da fração residual não-reciclável;
- cenário 3 (C3): reciclagem da fração de material seco (papel, plástico, metal e vidro) e digestão anaeróbica com geração de eletricidade do material orgânico biodegradável, e aterramento sanitário da fração residual não-reciclável;

2.3 METODOLOGIA DE LCA

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) foi usada para avaliar o desempenho ambiental dos cenários de gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), conforme a norma TSE EN ISO 14040-44 (2006). O método inclui definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação dos resultados, permitindo quantificar os impactos ambientais na disposição final dos resíduos (Pérez et al., 2021).

Para calcular as emissões de gases de efeito estufa (GEE), utilizou-se o método IPCC (2019), que estima CO₂, CH₄ e N₂O das categorias de disposição de resíduos, tratamento biológico e tratamento de águas residuais. O potencial de retenção de calor do CO₂ (GWP) foi usado para representar a contribuição de cada gás para o aquecimento global, e os resultados são apresentados em equivalente de carbono (CE).

As emissões diretas de GEE incluem aquelas do processo de disposição em aterros, vazamentos do tratamento biológico e lixiviados de decomposição. As emissões indiretas abrangem o consumo de energia elétrica nas instalações de reciclagem, combustível na coleta e transporte de resíduos e gestão de aterros, seguindo diretrizes do IPCC. A estimativa das emissões de CO₂ mitigadas pela reciclagem e reuso, e o crédito de carbono pela recuperação de materiais e geração de energia, foram calculados conforme as diretrizes da UNFCCC (2017).

3 RESULTADO

Análises de sensibilidade foram conduzidas para observar os efeitos dos diferentes modelos de gestão de resíduos e da meta de redução de emissões de GEE aplicado na configuração do sistema de GRSU na cidade brasileira do estudo de caso em termos de alocação de resíduos para cada tecnologia. Como base nos cálculos fornecidos pelo IPCC (2019) E

UNFCC (2017), as análises de sensibilidade foram conduzidas dentro da fronteira do sistema considerando e apresentaram os seguintes resultados em emissões:

Tabela 1 - Variação nos impactos na categoria de aquecimento global

Cenário 0	Peso (%)	Coleta Km/ano	Energia KWh/ano	Emissão CO2eq/ano	Total CO2eq.	84.600
Aterro	96,49	382.200	119.880	77.396		
Reciclagem - UPMR	3,51	26.108	10.620	11.203		
Cenário 1						144.966
Aterro com queima de LFG	73,04	289.299	119.880	67.546		
Reciclagem - UPMR	77,63	56.692	23.061	40.913		
Unidade de Reciclagem	19,34	130.023		36.507		
Cenário 2						93.035
Aterro	69,73	276.187	119.880	47.114		
Reciclagem - UPMR	7,63	56.692	23.061	40.913		
Compostagem	22,65	370.414	80.000	5018		
Cenário 3						88.321
Aterro	69,73	276.187	119.880	47.114		
Reciclagem - UPMR	7,63	56.692	23.061	40.913		
Digestão Anaeróbica	22,65	370.414		293		

Fonte: autores.

A Tabela 1 mostra a contribuição total para as emissões de GEE de cada cenário, calculada através da categoria de impacto de aquecimento global com base nas emissões de CO2 equivalente. Os resultados indicam que o cenário 0 teve o melhor desempenho em emissões totais, seguido pelos cenários 3 e 2. O cenário 1 apresentou o pior desempenho ambiental, com 70% mais emissões do que o cenário atual. Isso destaca que, em termos de emissões de GEE, a reciclagem pode não ser sempre uma alternativa ambientalmente vantajosa em comparação com o aterro.

Os valores de demanda de combustíveis fósseis na coleta foram previstos como emissões indiretas, conforme os valores tabelados acima. Para o aterro e a reciclagem (UPMR), os dados foram coletados em campo e projetados para os cenários propostos, considerando a mudança no volume de resíduos transportados. No aterro, os cálculos de emissões indiretas pelo transporte também incluíram o manejo dos resíduos com trator e pá carregadeira, enquanto na compostagem foi considerado apenas o uso de pá carregadeira. Na planta de reciclagem (UPMR), o valor de km/ano considera a destinação dos resíduos processados para plantas de reciclagem em cidades a até 440 km de distância.

Dados coletados no serviço de coleta porta a porta no cenário 0 indicam que a coleta de recicláveis emite quase o dobro de CO2 em comparação à coleta no aterro, para o mesmo volume de resíduos. Isso ocorre apesar dos caminhões de coleta urbana percorrerem 52,5 km até o aterro em Souza, enquanto a UPMR está localizada em Cajazeiras. Essa disparidade deve-se ao fato de que a coleta no aterro é realizada por caminhões compactadores, que têm maior capacidade do que os caminhões caçamba usados na coleta de recicláveis.

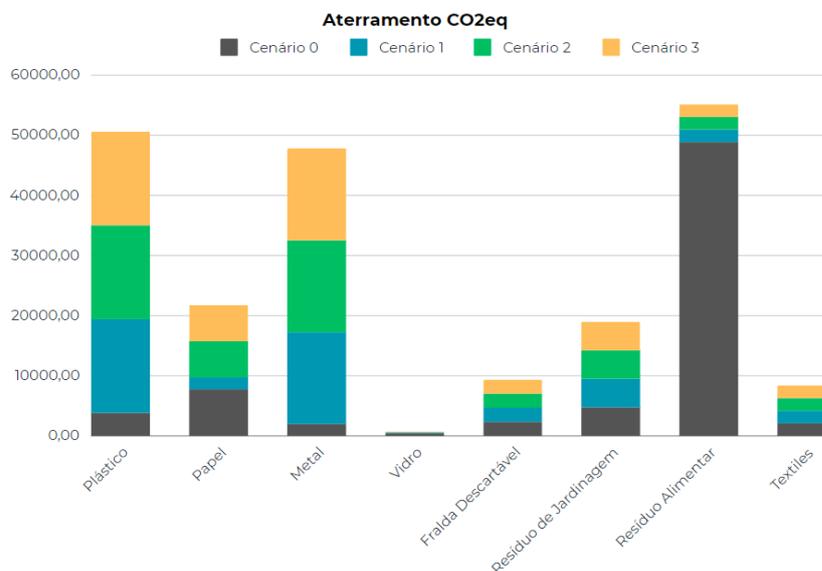
Nos cenários 2 e 3, o transporte pode representar até 7% das emissões totais, destacando-se como o fator mais significativo para a coleta de tratamento orgânico. Isso ocorre porque, se forem adotadas plantas de compostagem e digestão anaeróbica próximas ao aterro em Souza, conforme proposto, o transporte dos resíduos será realizado por caminhões caçamba de menor capacidade, similar aos utilizados na coleta seletiva da cidade.

Os valores de demanda de eletricidade para o processamento foram previstos como emissões indiretas, conforme os dados na Tabela 1. Para a reciclagem - UPMR, os dados foram coletados em campo e projetados para os cenários, levando em conta a variação no volume de

resíduos processados. O consumo de energia do aterro foi não varia com o volume de resíduos, pois a unidade opera sempre de forma plena.

O uso de energia na reciclagem, tanto na reciclagem - UPMR quanto na Planta de Reciclagem do cenário 1, não está incluído na Tabela 1, mas foi considerado nos cálculos de emissão de acordo com a metodologia de cálculo da UNFCCC (2017). As emissões associadas ao consumo de eletricidade na digestão anaeróbica não foram contabilizadas separadamente, pois foram consideradas como perda elétrica de autoconsumo de 10% no cálculo da geração de energia. No cenário 2, o consumo de energia é o fator mais significativo, representando 14% das emissões totais. Isso ocorre porque, embora a nova unidade de compostagem reduza em 22,5% o tratamento por aterro, essa redução no volume de resíduos aterrado não resulta em diminuição no consumo de eletricidade enquanto o aterro continuar em operação plena.

Figura 2 - Contribuição do aterramento de cada material na categoria de impacto.



Fonte: autores

A Figura 2 mostra a contribuição das emissões de CO2 equivalente por tipo de material aterrado. As variações nas emissões diretas entre os cenários resultam principalmente da redução na quantidade de resíduos aterrados, especialmente resíduos alimentares. Para esses resíduos, conforme são propostos tratamentos específicos no cenário 2, com a compostagem, e no cenário 3, com a digestão anaeróbica, as emissões diretas de CO2 equivalente, contabilizados no vazamento de carbono dessas gestões, são reduzidas em quase 100% em comparação com as emissões geradas pela decomposição por aterro desses resíduos no cenário atual.

Embora o volume de resíduos aterrados diminua cerca de 25% nos cenários 1, 2 e 3 em relação ao cenário atual, a redução nas emissões não é proporcional ao volume de resíduos. Isso acontece porque a decomposição de resíduos recicláveis gera emissões de CO2 equivalente 50% menores do que a decomposição de resíduos orgânicos, como mostrado na Figura 2.

4 CONCLUSÃO

O cenário atual apresentou o melhor desempenho na categoria de aquecimento global analisada. Apesar da intenção de propor cenários alternativos para tornar o sistema de gestão de RSU da cidade de Cajazeiras mais sustentável ambientalmente, as emissões dos cenários propostos mostraram-se desfavoráveis para esse objetivo, isso se deu principalmente porque conforme houve a melhora na eficiência da reciclagem de resíduos, representou um aumento significativo nas emissões líquidas de carbono.

A redução líquida de emissões de carbono aumentou linearmente com a melhoria da eficiência de reciclagem e a proposta de um novo centro de reciclagem, como no cenário 1, que

apresentou o pior desempenho. No cenário 1, o volume de material reciclado aumentou 23,45% em relação ao cenário 0, resultando em emissões de reciclagem (77.421 CO₂eq) maiores do que as do aterro (67.546 CO₂eq), mesmo com o aterro recebendo 73,04% dos resíduos. Isso ocorre porque os resíduos recicláveis, quando aterrados, não contabilizam emissões de decomposição nos primeiros 30 anos. A reciclagem realizada sem a unidade de processamento é mais vantajosa, com 2,8 vezes menos emissões, uma vez que o transporte e o consumo de eletricidade do maquinário na UPMR representam emissões indiretas significativas.

O tratamento biológico demonstrou vantagens significativas em termos de impacto ambiental, com uma taxa muito baixa de emissões de CO₂eq ao tratar grandes volumes de resíduos. Entre os métodos biológicos, a digestão anaeróbica destacou-se em relação à compostagem, apresentando 17 vezes menos emissões. Isso se deve ao menor vazamento de carbono durante o tratamento anaeróbico e ao benefício adicional da produção de eletricidade.

Concluimos que a gestão por biogaseificação e recuperação de energia (C3) apresenta a maior redução nas emissões de CO₂, comparada às outras alternativas propostas ao cenário atual, com um desempenho ambiental superior aos cenários que não incluem essas práticas. De acordo com este estudo, a implantação do tratamento orgânico é indispensável para a redução drástica das emissões de GEE. Para contribuir ainda mais para a redução das emissões de CO₂, propõe-se que as unidades de compostagem e digestão anaeróbica sejam localizadas na cidade de Cajazeiras, mitigando grande parte das emissões relacionadas ao transporte.

REFERÊNCIAS

WORLD BANK. **Bridging the gap in solid waste management: Governance requirements for results.** World Bank, 2021.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, e dá outras providências. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 3 ago. 2010.

HARVEY, LD Danny. **A guide to global warming potentials (GWPs).** Energy Policy, v. 21, n. 1, p. 24-34, 1993.

CHEN, Sisi et al. **Carbon emissions under different domestic waste treatment modes induced by garbage classification: Case study in pilot communities in Shanghai, China.** Science of the Total Environment, v. 717, p. 137193, 2020.

PÉREZ, Lorena Espinoza et al. **Closing the gap in the municipal solid waste management between metropolitan and regional cities from developing countries: A life cycle assessment approach.** Waste Management, v. 124, p. 314-324, 2021.

PAES, Michel Xocaira et al. **Municipal solid waste management: Integrated analysis of environmental and economic indicators based on life cycle assessment.** Journal of cleaner production, v. 254, p. 119848, 2020.

DEUS, Rafael Mattos; BATTISTELLE, Rosane Aparecida Gomes; SILVA, Gustavo Henrique Ribeiro. **Current and future environmental impact of household solid waste management scenarios for a region of Brazil: carbon dioxide and energy analysis.** Journal of cleaner production, v. 155, p. 218-228, 2017.

MÜLLER, Luiz Neto Paiva e Silva et al. **Uma análise multicritério de alternativas para o tratamento de resíduos sólidos urbanos do município de Juazeiro do Norte no Ceará.** Engenharia Sanitaria e Ambiental, v. 26, n. 1, p. 159-170, 2021.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA - IPEA. **Diagnóstico dos resíduos sólidos urbanos: relatório de pesquisa.** Brasília, 2012. Disponível em:

http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/121009_relatorio_residuos_solidos_urbanos.pdf. Acesso em: 06 fev. 2024.

ABRELPE. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil. São Paulo, 2022. **Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais.** Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em: 07 jan. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR ISO 14040:2009 - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura.** Rio de Janeiro, 2009.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **2019 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Agriculture, Forestry and Other Land Use.** Geneva, 2019. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/index.html>. Acesso em: 06 fev. 2024.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION FOR CLIMATE CHANGE - UNFCCC. **Clean Development Mechanism - Draft Small-scale Methodology: AMS-III.AJ: Recovery and recycling of materials from solid wastes, Version 07.0 – Draft. United Nations, 2017.** Disponível em:

<https://cdm.unfccc.int/methodologies/DB/R22750M155F84YR0D4YVYOS0CLSCII>. Acesso em: 06 fev. 2024.