

SUSTENTABILIDADE E OTIMIZAÇÃO DAS ROTAS DE TRANSPORTE : AVALIAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL GERADO PELA COLETA SELETIVA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ANA BEATRIZ TEIXEIRA BRAGA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO CARIRI-UFCA

JAQUELINE VÍGOLO COUTINHO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO CARIRI-UFCA

CICERO ISAC DA SILVA FARIA

DOMENICO CEGLIA
ESCOLA DE ADMINISTRAÇÃO

Resumo

Diante da elevada geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) no Brasil, a região Nordeste se destaca com cerca de 37,2% dos resíduos enviados para destinação adequada e 62,8% para disposição inadequada, como lixões e aterros controlados. Nesse contexto, a discussão sobre os impactos ambientais gerados pelas diversas formas de destinação de resíduos sólidos vem se intensificando e a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) tem sido amplamente utilizada para fornecer esses resultados ambientais, fazendo-se necessário incluir etapas como a distribuição e transporte dos RSU. Para obter melhorias significativas no sistema coleta/transporte de resíduos, com a redução das distâncias de viagem e, conseqüentemente, redução nas emissões de gases do efeito estufa, é possível realizar a otimização das rotas de coleta de resíduos. Entretanto, a literatura carece de estudos que abordam, além da otimização das rotas de coleta de resíduos, os impactos ambientais causados por essa atividade. Dessa forma, o objetivo principal do nosso estudo é avaliar as rotas de coleta seletiva de RSU da cidade de Cajazeiras, Paraíba, e utilizar um método eficaz para otimizar as distâncias, através da aplicação de um programa SIG (Sistema de Informação Geográfica) e, por meio de uma ACV e de uma análise econômica, calcular a redução das emissões de GEE e dos gastos gerados. Para o desenvolvimento da pesquisa, foram seguidas 5 principais etapas: definição da área de estudo; levantamento de dados sobre o transporte de materiais recicláveis; aplicação da tecnologia SIG para construção das rotas de transporte; ACV da coleta de resíduos, e análise final dos resultados. Atualmente, uma parte dos resíduos gerados na cidade de Cajazeiras são coletados pela unidade de reciclagem - Recicleiros, por meio de uma coleta seletiva, para serem encaminhados para o processo de reciclagem. Dessa forma, nossa pesquisa identificou alguns desafios enfrentados por esse transporte, relacionados ao planejamento da rota de coleta e alto custo operacional. No estudo, foi levado em consideração dois cenários principais: o cenário C0, que descreve a rota atual da coleta seletiva de RSU baseado nas informações disponibilizadas pelo GPS utilizado pela Recicleiros e o cenário C1, que descreve a rota otimizada, percorrendo as mesmas áreas contempladas pela coleta seletiva do cenário C0. Para a espacialização do cenário C0, foi utilizado o software ArcGis Online, aplicando os dados obtidos anteriormente com a Recicleiros. Foram vetorizadas as rotas atualmente realizadas ao longo de 5 dias, durante o período de 1 semana. Em cada um desses dias, uma área diferente da cidade é contemplada com a coleta seletiva, chamadas neste estudo de zonas. Já para o cenário C1, foi utilizado a ferramenta "planejar rotas" do software ArcGis Online, em que, baseado em uma camada de pontos, o programa determina como

um veículo pode visitar todos esses pontos em menos tempo. Após essa etapa, foi feita a aplicação da avaliação do ciclo de vida, utilizando para os cálculos de emissões de CO₂, CH₄ e N₂O a metodologia do IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas). Por fim, foi possível comparar as distâncias percorridas em quilômetros, o consumo de combustível em litros, o potencial de aquecimento global em quilos e o gasto com combustível em reais, entre a rota atual (C0) e a rota otimizada (C1). Foi possível obter uma economia de cerca de 25 l de diesel por semana, o que significa que aproximadamente 3.880 kg de GEE (gases do efeito estufa) deixariam de ser lançados na atmosfera ao longo de um ano. Os resultados indicaram que uma coleta seletiva bem planejada, apoiada em uma análise de rotas, priorizando o encurtamento das distâncias, garante melhorias em diversos aspectos, como a redução de cerca de 48% da distância percorrida, dos gastos e principalmente, dos impactos ambientais. A aplicação do ArcGis Online demonstrou ser satisfatório para análise de rotas, porém com algumas limitações, como a não utilização das condições de tráfego e a impossibilidade de utilizar parâmetros como a capacidade limite do caminhão de carregar os RSU. Por fim, sugere-se que os próximos estudos desenvolvam um novo cenário ideal, com uma rota de coleta baseada na geração de resíduos por pessoa e que leve em consideração a capacidade de coleta do transporte.

Palavras Chave

Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), Reciclagem de resíduos, Nordeste brasileiro

Agradecimento a órgão de fomento

Funcap

SUSTENTABILIDADE E OTIMIZAÇÃO DAS ROTAS DE TRANSPORTE : AVALIAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL GERADO PELA COLETA SELETIVA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, segundo a ABRELPE (2022), foi gerado em 2022, um total de, aproximadamente, 81,8 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU). A maior parte desses RSU coletados no país (61%) é encaminhada para aterros sanitários, resultando em 46,4 milhões de toneladas enviadas para destinação ambientalmente adequada. Entretanto, na região Nordeste ocorre o contrário, com cerca de 37,2% dos resíduos enviados para destinação adequada e 62,8% para disposição inadequada, como lixões e aterros controlados.

Diante deste cenário, a discussão sobre os impactos ambientais gerados pelas diversas formas de destinação de resíduos sólidos vem se intensificando e a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) tem sido amplamente utilizada para fornecer esses resultados ambientais (Erses Yay, 2015). A ACV é uma ferramenta de análise de sistema que pode avaliar os impactos ambientais totais das opções de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos (GRSU), auxiliando nos processos de tomada de decisão (Das et al., 2019).

Nessa perspectiva, em uma revisão sistemática de estudos recentes de ACV sobre sistemas de GRSU, Zhang et. al. (2021, p. 13) identificou uma lista de lacunas de pesquisa e desafios na condução da ACV e afirma que “é importante adquirir dados precisos sobre o processo de coleta e transporte, já que isso foi frequentemente omitido antes”. Mulya et al. (2022) corrobora essa questão ao realizar uma revisão sistemática de ACV voltado para GRSU e concluir que os limites do sistema desses estudos devem ser melhor definidos incluindo etapas como distribuição e transporte dos RSU. Além disso, Morais et al. (2021) acrescentam em sua pesquisa sobre estimativa de distâncias percorridas pelos caminhões de RSU que, pela alta quilometragem obtida, essa atividade gera impactos negativos ao meio ambiente, sugerindo estudos futuros que analisem as emissões de gases responsáveis pelo aquecimento global que são causadas pelo transporte de RSU.

Para obter melhorias significativas no sistema coleta/transporte de resíduos, com a redução das distâncias de viagem e, conseqüentemente, redução nas emissões de gases do efeito estufa, é possível realizar a otimização das rotas de coleta de resíduos (Kallel et al., 2016). O estudo realizado por Sanjeevi e Shahabudeen (2016), cujo objetivo principal é minimizar a distância total de coleta de RSU, a fim de reduzir o custo e o tempo de coleta, demonstra que a incorporação da metodologia geoespacial pode auxiliar as estratégias de gestão de resíduos sólidos. Outros autores como Hemidat et al. (2017), também concluíram que a tecnologia SIG (Sistema de Informação Geográfica) pode ser aplicada com sucesso ao problema de gestão de resíduos urbanos.

No entanto, a literatura carece de estudos que abordam, além da otimização das rotas de coleta de resíduos, os impactos ambientais causados por essa atividade. Dessa forma, o presente estudo tem como objetivo avaliar as rotas de coleta seletiva de RSU da cidade de Cajazeiras, Paraíba, e utilizar um método eficaz para otimizar as distâncias, através da aplicação de um programa SIG e, por meio de uma ACV e de uma análise econômica, calcular a redução das emissões de GEE e dos gastos gerados. Nesse sentido, ao contrário da abordagem adotada em outros estudos (Mandpe et al., 2022), a nossa pesquisa não utiliza banco de dados de ACV (e.g., GaBi ou Simapro), obtendo-se assim, dados primários que contribuem para que gestores públicos e/ou prestadores de serviço de transporte de RSU possam aplicar esse sistema de otimização de rotas, garantindo assim, a promoção da sustentabilidade nas cidades.

2 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento da pesquisa, foram realizadas 5 principais etapas: definição da área de estudo; levantamento de dados sobre o transporte de materiais recicláveis; aplicação da tecnologia SIG para construção das rotas de transporte; ACV da coleta de resíduos, e análise final dos resultados. Nos tópicos a seguir é descrita cada uma dessas etapas.

2.1 ÁREA DE ESTUDO

O município de Cajazeiras está localizado no estado da Paraíba, na região Nordeste do Brasil, a aproximadamente 470 km de distância da capital João Pessoa. Abrange uma área de aproximadamente 562.700 km² e possui uma população de cerca de 62.000 habitantes, segundo o Censo do IBGE de 2020. A taxa de geração de RSU do município no ano de 2020 foi de, aproximadamente, 21.600 toneladas/ano (Recicleiros, 2021). Atualmente, uma parte desses resíduos são encaminhados para o aterro sanitário de Sousa - PB e a outra parte é encaminhada para a unidade de reciclagem - Recicleiros, localizada na cidade de Cajazeiras.

A coleta de resíduos na cidade estudada ocorre porta a porta. Existem dois sistemas de coleta: a convencional (realizado por uma empresa privada contratada pela Prefeitura de Cajazeiras) e a seletiva (realizado pela Recicleiros), que consiste na coleta dos materiais recicláveis existentes nos resíduos domésticos, separados pela própria população e coletados por um caminhão do tipo gaiola (IBAM, 2001). Dessa forma, nossa pesquisa identificou alguns desafios enfrentados pelo transporte de resíduos sólidos urbanos realizado pela Recicleiros, relacionados ao planejamento da rota de coleta e alto custo operacional. Neste estudo, não foi levado em consideração a coleta convencional, realizada pelo município de Cajazeiras, devido à falta de dados.

2.2 LEVANTAMENTO DE DADOS SOBRE O TRANSPORTE DE MATERIAIS RECICLÁVEIS

Inicialmente, foram realizadas visitas à Recicleiros na cidade de Cajazeiras, com o intuito de avaliar e entender o seu funcionamento. Nesta etapa foi definido o estudo da rota realizada por um caminhão gaiola, modelo *Delivery Express 8-150*, da marca *Volkswagen*, que utiliza o óleo diesel como combustível. A rota foi mapeada por um aparelho de GPS utilizado pela Recicleiros no caminhão de coleta de resíduos. Essas informações serão utilizadas posteriormente para o cálculo das emissões de gases.

2.3 CONSTRUÇÃO DAS ROTAS UTILIZANDO TECNOLOGIA SIG

No estudo, foi levado em consideração dois cenários principais: o cenário C0, que descreve a rota atual da coleta seletiva de RSU, baseado nas informações disponibilizadas pelo GPS utilizado pela Recicleiros e o cenário C1, que descreve a rota otimizada, percorrendo as mesmas áreas contempladas pela coleta seletiva do cenário C0.

Para a espacialização do cenário C0, foi utilizado o software *ArcGis Online*. De acordo com Kholoshyn et al. (2019), a principal vantagem dessa ferramenta é o acesso a diversos recursos espaciais (mapas, imagens de satélite e etc), além da possibilidade de criação dos seus próprios mapas com diversos recursos já prontos no sistema. Dessa forma, com os dados obtidos anteriormente com a Recicleiros, foi possível vetorizar as rotas atualmente realizadas ao longo de 5 dias, durante o período de 1 semana. Em cada um desses dias, uma área diferente da cidade é contemplada com a coleta seletiva, chamadas neste estudo de *zonas*. As distâncias para percorrer cada uma das 5 *zonas* foi disponibilizada pela Recicleiros.

Já para o cenário C1, foi utilizado a ferramenta “planejar rotas” do software *ArcGis Online*, em que, baseado em uma camada de pontos, o programa determina como um veículo pode visitar todos esses pontos em menos tempo. Segundo Masson et al. (2021), esse software é bastante útil para otimização de rotas em termos de distância percorrida, sendo assim, a principal variável analisada por este estudo. Dessa forma, foi feita a otimização do planejamento das rotas de cada uma das 5 *zonas* do cenário C0.

2.4 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

Após a construção dos cenários no ArcGis, foi possível aplicar as demais etapas da ACV: análise do inventário de ciclo de vida; avaliação do impacto de ciclo de vida, e interpretação, descritas nos tópicos seguintes.

2.4.1 Análise do Inventário do Ciclo de Vida

Para a realização dos cálculos, foi escolhida a metodologia do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2006), em que o cálculo das emissões de CO₂, CH₄ e N₂O é dado pela Equação 1.

$$Emissões = \sum_a [CC_a \cdot FE_a] \quad (1)$$

Onde *Emissões* são as emissões de CO₂, CH₄ e N₂O em kg; *CC_a* é o combustível consumido em TJ; *FE_a* é o fator de emissão em kg/TJ, que é igual ao teor de carbono do combustível multiplicado por 44/12; e *a* é o tipo de combustível (por exemplo, diesel, gasolina, gás natural, GLP).

No manual do IPCC é possível encontrar os valores tabelados dos fatores de emissão de CO₂, CH₄ e N₂O. Já para o cálculo do consumo de combustível, basta multiplicar o consumo urbano do veículo pela distância percorrida. Foi considerado que o caminhão que realiza a coleta possui um consumo urbano de 4,8 km/l, de acordo com uma estimativa feita pela Recicleiros. Para converter o consumo de combustível de litros para terajoule, é necessário multiplicar o valor pela densidade do diesel (0,85 kg/l conforme Álvares e Linke, 2001) e pelo poder calorífico do diesel (4,581x10⁻⁵ TJ/kg conforme Silva e Tôrres, 2013).

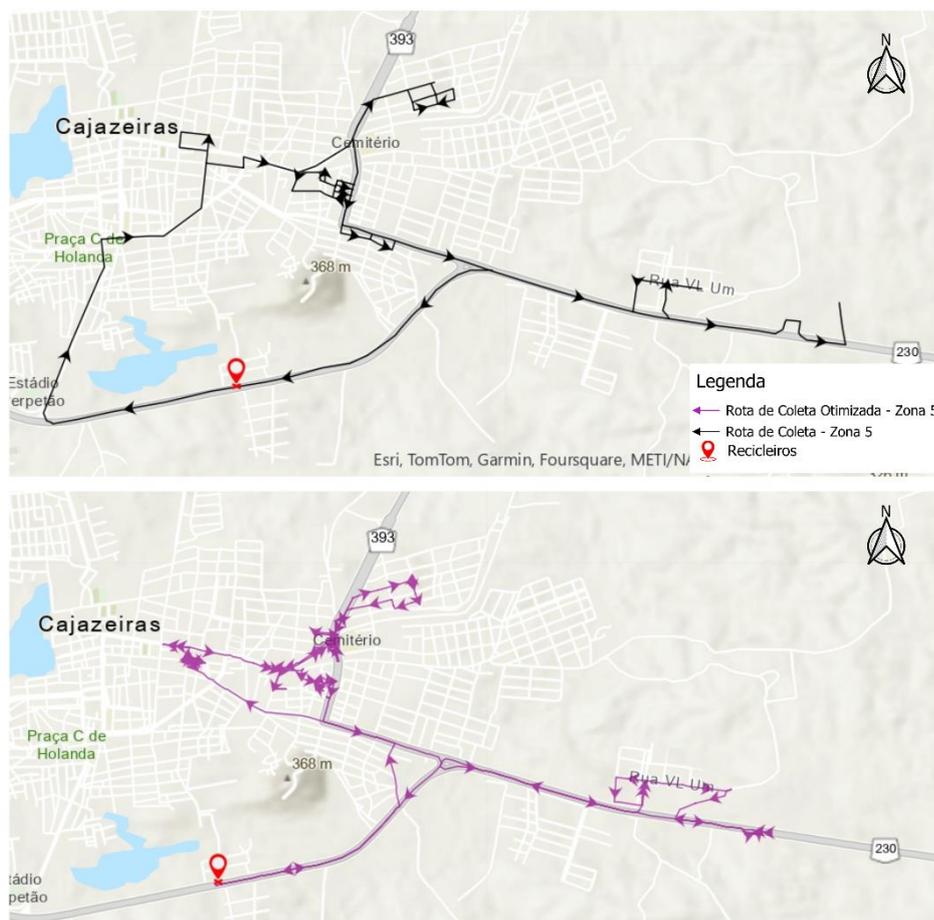
2.4.2 Avaliação do Impacto de Ciclo de Vida

Para quantificar e comparar as emissões dos GEE, é necessário adotar uma medida em comum. Para isso, basta multiplicar a emissão de cada gás (CO₂, CH₄ e N₂O) pelo seu respectivo potencial de aquecimento global (PAG) e depois somar os resultados. Dessa forma, é possível obter um parâmetro mais abrangente do impacto ambiental causado pela atividade de transporte. De acordo com Gogeri e Gouda (2024), o PAG do CO₂ é igual a 1; do CH₄ é igual a 21 e do N₂O é igual a 310.

3 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Por meio da utilização do software *ArcGis Online*, foi possível modelar as rotas otimizadas de cada uma das 5 *zonas* de coleta de RSU, referentes ao período de uma semana de coleta. Para exemplificar os resultados obtidos, a Figura 1 apresenta um comparativo entre a rota atual de coleta de RSU (cenário C0) e a rota otimizada (cenário C1) da *zona* 5, por se tratar de uma área pequena e de fácil visualização. Esta mesma metodologia foi aplicada para as demais *zonas*.

Figura 1 – Otimização da rota da zona 5



Fonte: autores.

Segundo Khan e Samadder (2016), a redução do consumo de combustível conduz o modelo a um sistema ecologicamente correto, além de aumentar sua relação custo-benefício. Portanto, é necessário encurtar a distância total de viagem, bem como o tempo de viagem, para reduzir a taxa de consumo de combustível e maximizar a sustentabilidade ambiental. Dessa forma, além da distância percorrida, foi calculado as emissões de GEE de cada um dos cenários e seus respectivos PAG.

Para que pudesse ser realizada uma análise na perspectiva econômica, foi feita uma estimativa de gastos com o combustível, considerando uma média de valor do diesel para o ano de 2023 de R\$ 5,67 conforme o relatório da Agência Nacional de Petróleo (2024). Assim, a Tabela 1 traz um comparativo do cenário C0 e do cenário C1, ao longo de uma semana do ano de 2023.

Tabela 1 – Comparativo dos resultados entre os cenários C0 e C1

Cenários	Distância Percorrida (km)	Consumo de Combustível (l)	Emissões de GEE			PAG (kg)	Gasto com combustível (R\$)
			Emissões de CO ₂ (kgCO ₂)	Emissões de CH ₄ (kgCH ₄)	Emissões de N ₂ O (kgN ₂ O)		
C0	255,00	53,13	153,30	0,008	0,008	155,97	301,22

C1	133,00	27,71	79,96	0,004	0,004	81,35	157,11
-----------	--------	-------	-------	-------	-------	-------	--------

Fonte: autores.

Com a otimização da rota de transporte, foi possível obter uma economia de cerca de 25 l de diesel por semana, o que significa que aproximadamente 3.880 kg de GEE deixariam de ser lançados na atmosfera ao longo de um ano (diferença entre o PAG dos cenários C0 e C1, considerando 52 semanas em um ano). Vale ressaltar que os valores de emissão de GEE calculados estão diretamente ligados à distância percorrida, porém esse valor pode ser alterado a depender dos esforços mecânicos do veículo. E por fim, na perspectiva econômica, com a otimização da rota seria possível economizar cerca de R\$ 7.500,00 ao longo de um ano.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados indicaram que uma coleta seletiva bem planejada, apoiada em uma análise de rotas, priorizando o encurtamento das distâncias, garante melhorias em diversos aspectos, como a redução de cerca de 48% da distância percorrida, dos gastos e principalmente, dos impactos ambientais. Além disso, o uso da metodologia ACV demonstrou ser eficaz para fornecer resultados sobre o transporte de RSU, indicando que as emissões causadas pela coleta representam uma ameaça potencial ao meio ambiente.

O estudo demonstra que a cidade de Cajazeiras pode avançar no planejamento das rotas de coleta, otimizando o trajeto e contribuindo para a sustentabilidade ambiental. A aplicação do *ArcGis Online* demonstrou ser satisfatório para análise de rotas, porém com algumas limitações, como a não utilização das condições de tráfego e a impossibilidade de utilizar parâmetros como a capacidade limite do caminhão de carregar os RSU. Por fim, sugere-se que os próximos estudos desenvolvam um novo cenário ideal, com uma rota de coleta baseada na geração de resíduos por pessoa e que leve em consideração a capacidade de coleta do transporte.

5 REFERÊNCIAS

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. São Paulo - SP, 2022.

ÁLVARES Jr, O.M.; LINKE, R.R.A. Metodologia simplificada de cálculo das emissões de gases do efeito estufa de frotas de veículos no Brasil. **CETESB**. São Paulo, 2001.

ANP – **Agência Nacional de Petróleo**, 2024. Painel Dinâmico – Preços de Revenda e Distribuição de Combustíveis. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiMGM0NDhhMTUtMjQwZi00N2RILTk1M2UtYjIxZTlkNzYzE5IiwidCI6IjQ0OTlmNGZmLTl0YTYtNGI0Mi1iN2VmLTExYzYyZkxMyJ9>. Acesso em: 10 de abril de 2024.

DAS, S.; LEE, S. -H.; KUMAR, P.; KIM, K. -H.; LEE, S.S.; BHATTACHARYA, S. S. Solid waste management: Scope and the challenge of sustainability. **Journal of cleaner production**, v. 228, p. 658–678, 2019.

ERSES YAY, A.S. Application of life cycle assessment (LCA) for municipal solid waste management: a case study of Sakarya. **Journal of Cleaner Production**, v. 94, pp. 284–293, 2015.

GOGERI, I.; GOUDA, K.C. Assessment of Country-Specific GHG Emissions from Road Transport Sector in Índia. **Mapan**, 2024.

HEMIDAT, S.; OELGEMOLLER, D.; NASSOUR, A.; NELLES, M. Evaluation of Key Indicators of Waste Collection Using GIS Techniques as a Planning and Control Tool for Route Optimization. **Waste and Biomass Valorization**, v. 8, pp. 1533–1554, 2017.

IBAM - Instituto Brasileiro de Administração Municipal. **Manual: gerenciamento integrado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 2001.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Volume 3: Energy, chapter: mobile combustion, 2006.

KALLEL, A.; SERBAJI, M.M.; ZAIRI, M. Using GIS-based tools for the optimization of solid waste collection and transport: case study of Sfax city, Tunisia. **Journal of Engineering**, v. 2016, pp. 1-7, 2016.

MANDPE, A.; BHATTACHARYA, A.; PALIYA, S.; PRATAP, V.; HUSSAIN, A.; KUMAR, S. Life-cycle assessment approach for municipal solid waste management system of Delhi city. **Environmental Research**, v. 212, 2022.

KHOLOSHYN, I. V.; BONDARENKO, O. V.; HANCHUK, O. V.; SHMELTSE, E. O. **Cloud ArcGIS Online as an innovative tool for developing geoinformation competence with future geography teachers**. 2019. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/1909.04388>>.

MASSON, A.; PARAVIÉ, D.; ROHVEIN, C.; VILLALBA, L. Review of vehicle routing problems solving software. **INGE CUC**, v. 17, n. 1, p. 315–328, 2021.

MORAIS, L.; NASCIMENTO, V.; SIMÕES, S.; OMETTO, J. Regional Distance Routes Estimation for Municipal Solid Waste Disposal, Case Study São Paulo State, Brazil. **Energies**, v. 14, 2021.

MULYA, K. S.; ZHOU, J.; PHUANG, Z. X.; LANER, D.; WOON, K. S. A systematic review of life cycle assessment of solid waste management: Methodological trends and prospects. **The Science of the Total Environment**, v. 831, 2022.

RECICLEIROS. **Plano Municipal de Coleta Seletiva de Cajazeiras/PB**. 2021. Disponível em: <https://www.sema.cajazeiras.pb.gov.br/arquivos/5/PLANO%20MUNICIPAL%20DE%20COLETA%20SELETIVA%20VERSAO%20012021___0000001.pdf>

SANJEEVI, V.; SHAHABUDDEN, P. Optimal routing for efficient municipal solid waste transportation by using ArcGIS application in Chennai, India. **Waste Management & Research**, v. 34, pp. 11–21, 2015.

SILVA, E. R. da; TÔRRES, R. B. Thermophysical Properties of Diesel/Biodiesel Blends. **22nd International Congress of Mechanical Engineering**, pp 6577 – 6584, 2013.

ZHANG, J.; QIN, Q.; LI, G.; TSENG, C. -H. Sustainable municipal waste management strategies through life cycle assessment method: A review. **Journal of Environmental Management**, v. 287, 2021.