

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM
COMPUTACIONAL

Sara Crislei de Souza Soares

Otimização de Rotas como uma Ferramenta para Redução de Custos e
Emissões no Transporte de Resíduos: Um Estudo de Caso da Cidade de Sapucaia,
RJ

Juiz de Fora
2024

Sara Crislei de Souza Soares

Otimização de Rotas como uma Ferramenta para Redução de Custos e Emissões no Transporte de Resíduos: Um Estudo de Caso da Cidade de Sapucaia, RJ

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Modelagem Computacional Área de concentração: Modelagem Computacional

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Goliatt da Fonseca

Juiz de Fora

2024

Ficha catalográfica elaborada através do Modelo Latex do CDC da UFJF
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Soares, Sara Crislei de Souza .

Otimização de Rotas como uma Ferramenta para Redução de Custos e Emissões no Transporte de Resíduos : Um Estudo de Caso da Cidade de Sapucaia, RJ / Sara Crislei de Souza Soares. – 2024.

82 f. : il.

Orientador: Leonardo Goliatt da Fonseca

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia . Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, 2024.

1. Gerenciamento de Resíduos Sólidos. 2. Redução dos Custos. 3. Redução das Emissões. 4. OSRM. 5. Vroom. I. Fonseca, Leonardo Goliatta, orient. II. Doutor.

Sara Crislei de Souza Soares

Otimização de Rotas como uma Ferramenta para Redução de Custos e Emissões no Transporte de Resíduos: Um Estudo de Caso da Cidade de Sapucaia, RJ

Dissertação
apresentada ao
Programa de Pós-
Graduação em
Modelagem
Computacional
da Universidade
Federal de Juiz de
Fora como requisito
parcial à obtenção do
título de Mestre em
Modelagem
Computacional. Área
de
concentração: Modelagem
Computacional.

Aprovada em 08 de outubro de 2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Leonardo Goliatt da Fonseca - Orientador

Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof.^a Dr.^a Luciana Conceição Dias Campos

Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof.^a Dr.^a Carolina Ribeiro Xavier

Universidade Federal de São João del-Rei

Juiz de Fora, 23/09/2024.



Documento assinado eletronicamente por **Luciana Conceicao Dias Campos**,



Professor(a), em 08/10/2024, às 12:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Leonardo Goliatt da Fonseca, Professor(a)**, em 08/10/2024, às 12:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Carolina Ribeiro Xavier, Usuário Externo**, em 08/10/2024, às 13:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Ufjf (www2.ufjf.br/SEI) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **1998873** e o código CRC **2C0AD704**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais e à minha família, que sempre acreditaram no meu potencial e me apoiaram, oferecendo não apenas suporte emocional e financeiro, mas também compreensão e encorajamento durante cada dia de dedicação a este trabalho.

Agradeço ao meu orientador, Leonardo Goliatt, por sua orientação, paciência e valiosas contribuições ao longo de todo o período do mestrado. Suas sugestões e conselhos foram fundamentais para o desenvolvimento deste estudo.

Aos professores e colegas do PPGMC, pela troca de conhecimentos e por tornarem essa jornada acadêmica mais enriquecedora.

Agradeço à Prefeitura Municipal de Sapucaia, em especial à Secretária de Meio Ambiente, Laíse, por fornecer as informações referentes à coleta e transporte dos resíduos no município.

Por fim, gostaria de agradecer à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), por me conceder uma bolsa de estudos, que foi essencial para a realização desta pesquisa.

RESUMO

A gestão eficiente de resíduos sólidos é fundamental para a preservação do meio ambiente e a garantia da saúde pública. As etapas de coleta e transporte de resíduos desempenham um papel essencial na gestão de resíduos sólidos, chegando a consumir até 80% de todos os recursos disponíveis. Estes custos resultam das despesas com mão de obra, elevado consumo de combustível e manutenção dos veículos. Além disso, o uso intensivo dos veículos nessas atividades leva a um grande consumo de energia, à emissão de poluentes atmosféricos e ao aumento do congestionamento nas áreas urbanas. O planejamento de rotas pode ser uma solução para diminuir tanto os custos quanto as emissões relacionadas a esse processo. A otimização de rotas, também conhecida como problema de roteamento de veículos (VRP), oferece uma abordagem organizada para o planejamento de rotas. Este estudo teve como objetivo desenvolver um modelo computacional para otimização de rotas de coleta e transporte de resíduos para um pequeno município brasileiro, Sapucaia. O problema de otimização proposto foi abordado utilizando duas ferramentas: a *Open Source Routing Machine (OSRM)* e a *Vehicle Routing Open-source Optimization Machine (Vroom)*. Além disso, foram calculadas estimativas das emissões de gases de efeito estufa (GEE) resultantes da combustão dos combustíveis utilizados durante o processo. Para tanto, foi adotada uma metodologia de cálculo de emissões de GEE baseada no Programa Brasileiro *GHG Protocol*. Como uma forma de tentar amenizar o impacto gerado por tais emissões, também foi realizado o cálculo da quantidade de árvores que deveriam ser plantadas para neutralizar essas emissões. Os resultados obtidos através da otimização mostraram uma redução de 18% na distância percorrida, em comparação com o cenário praticado atualmente. A redução na distância percorrida também reduziu a quantidade de combustível consumida, gerando uma economia anual média de aproximadamente R\$ 17.000,00. A redução na quantidade de combustível consumida também reduziu as emissões dos GEE. Se comparadas com o cenário praticado atualmente, as emissões de CO_2 equivalente foram aproximadamente 18% menores ao se adotar as rotas otimizadas. Além disso, verificou-se que seria necessário plantar cerca de 214 árvores para compensar a emissão média anual de CO_2 equivalente gerada no processo, quando adotadas as rotas otimizadas. Caso o cenário de coleta não fosse alterado, seriam necessárias 261 árvores para compensar estas emissões.

Palavras-chave: Gerenciamento de Resíduos Sólidos. Redução dos Custos. Redução das Emissões. *OSRM*. *Vroom*.

ABSTRACT

Efficient solid waste management is paramount for environmental preservation and public health. The collection and transportation phases play a pivotal role in solid waste management, often consuming up to 80% of all available resources. These costs stem from labor expenses, high fuel consumption, and vehicle maintenance. Furthermore, the intensive use of vehicles in these activities leads to significant energy consumption, atmospheric pollutant emissions, and increased urban congestion. Route planning can serve as a solution to mitigate both costs and emissions associated with this process. Route optimization, also known as the vehicle routing problem (VRP), offers a structured approach to route planning. This study aimed to develop a computational model for optimizing collection and transportation routes for a small Brazilian municipality, Sapucaia. The proposed optimization problem was addressed using two tools: the Open Source Routing Machine (OSRM) and the Vehicle Routing Open-source Optimization Machine (VROOM). Additionally, estimates of greenhouse gas (GHG) emissions resulting from fuel combustion during the process were calculated. For this purpose, a GHG emissions calculation methodology based on the Brazilian GHG Protocol was adopted. As a means to mitigate the impact of such emissions, the number of trees required to offset these emissions was also calculated. The results obtained through optimization demonstrated an 18% reduction in the distance traveled, compared to the current scenario. The reduction in distance traveled also reduced fuel consumption, resulting in an average annual saving of approximately R\$ 17,000. The decrease in fuel consumption also reduced GHG emissions. Compared to the current scenario, equivalent CO_2 emissions were approximately 18% lower when adopting the optimized routes. Moreover, it was found that approximately 214 trees would need to be planted to offset the average annual equivalent CO_2 emissions generated in the process when adopting the optimized routes. If the collection scenario were not altered, 261 trees would be required to offset these emissions.

Keywords: Solid Waste Management. Cost Reduction. Emissions Reduction. OSRM. Vroom.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | | |
|-----------|---|----|
| Figura 1 | – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) | 14 |
| Figura 2 | – Critérios de Inclusão e Exclusão | 19 |
| Figura 3 | – Localização do Município de Sapucaia, RJ | 30 |
| Figura 4 | – Rota Gerada Através do <i>OSRM</i> | 32 |
| Figura 5 | – Rota Gerada Através do <i>Vroom</i> | 33 |
| Figura 6 | – das Etapas Seguidas no Trabalho | 40 |
| Figura 7 | – Desenho da Rota Atual do Distrito de Sapucaia | 42 |
| Figura 8 | – Desenho da Rota Atual do Distrito de Anta | 42 |
| Figura 9 | – Desenho da Rota Atual do Distrito de Aparecida | 43 |
| Figura 10 | – Estimativa das Emissões de GEE Diárias - Cenário Atual | 47 |
| Figura 11 | – Estimativa das Emissões de GEE Anuais - Cenário Atual | 47 |
| Figura 12 | – Resultado <i>Vroom</i> para o Distrito de Sapucaia | 48 |
| Figura 13 | – Resultado <i>Vroom</i> para o Distrito de Anta | 49 |
| Figura 14 | – Resultado <i>Vroom</i> para o Distrito de Aparecida | 49 |
| Figura 15 | – Estimativa das Emissões de GEE Diárias - Rotas Otimizadas | 53 |
| Figura 16 | – Estimativa das Emissões de GEE Anuais - Rotas Otimizadas | 53 |
| Figura 17 | – Ilustração da Rota Gerada | 75 |
| Figura 18 | – Rota Utilizando 1 Veículo | 79 |
| Figura 19 | – Rota Utilizando 2 Veículos | 81 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – ODS Relacionados com a GRS | 16 |
| Tabela 2 – PICO | 17 |
| Tabela 3 – Resumo dos Trabalhos Incluídos Na Revisão | 23 |
| Tabela 4 – Fatores de emissão por utilização de combustíveis fósseis em fontes móveis | 36 |
| Tabela 5 – Fatores de emissão por utilização biocombustível em fontes móveis . . . | 36 |
| Tabela 6 – Potencial de Aquecimento Global (<i>GWP</i>) dos Gases Emitidos no Consumo de Combustíveis | 37 |
| Tabela 7 – Estatísticas da Proporção do Biodiesel no Diesel e da Eficiência do Veículo | 41 |
| Tabela 8 – Distância Percorrida (km) em Cada Distrito | 44 |
| Tabela 9 – Distância Total Percorrida no Município - Cenário Atual | 44 |
| Tabela 10 – Consumo e Custo de Combustível Diário - Cenário Atual | 45 |
| Tabela 11 – Consumo e Custo de Combustível Anual- Cenário Atual | 45 |
| Tabela 12 – Estimativas das Emissões Diárias de GEE (em kg) - Cenário Atual . . | 46 |
| Tabela 13 – Estimativas das Emissões Anuais de GEE (em kg) - Cenário Atual . . | 46 |
| Tabela 14 – Distância Percorrida (km) em Cada Distrito | 50 |
| Tabela 15 – Distância Total Percorrida no Município - Rotas Otimizadas | 50 |
| Tabela 16 – Consumo e Custo de Combustível Diário - Rotas Otimizadas | 51 |
| Tabela 17 – Consumo e Gasto com Combustível Anual - Rotas Otimizadas | 51 |
| Tabela 18 – Estimativas das Emissões Diárias de GEE (em kg) - Rotas Otimizadas | 52 |
| Tabela 19 – Estimativas das Emissões Anuais de GEE (em kg) - Rotas Otimizadas | 52 |
| Tabela 20 – Estatísticas da Eficiência do Veículo e da Proporção de Biodiesel no Diesel - Valores superiores ao limite - Emissões de CO_2e | 55 |
| Tabela 21 – Estatísticas da Eficiência do Veículo e da Proporção de Biodiesel no Diesel - Valores superiores ao limite - Emissões de CO_2 Biogênico | 55 |
| Tabela 22 – Estatísticas de Emissões de CO_2e - Valores Maiores que o Limite Definido - Cenário Atual e Otimizado - Diário | 56 |
| Tabela 23 – Estatísticas de Emissões de CO_2e - Valores Maiores que o Limite Definido - Cenário Atual e Otimizado - Anual | 56 |
| Tabela 24 – Estatísticas de Emissões de CO_2 Biogênico- Valores Maiores que o Limite Definido - Cenário Atual e Otimizado - Diário | 57 |
| Tabela 25 – Estatísticas de Emissões de CO_2 Biogênico- Valores Maiores que o Limite Definido - Cenário Atual e Otimizado - Anual | 57 |
| Tabela 26 – Quantidade de Árvores Necessárias para Compensar as Emissões de CO_2e | 58 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|------------------------|---|
| <i>API</i> | <i>Application Programming Interface</i> (Interface de Programação de Aplicação) |
| <i>BSA</i> | <i>Backtracking Search Algorithm</i> |
| Capes | Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior |
| CEBDS | Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável |
| <i>CH₄</i> | Metano |
| <i>CO₂</i> | Dióxido de Carbono |
| <i>CO_{2e}</i> | Carbono equivalente |
| CVRP | Problema de Roteamento de Veículos Capacitado (<i>Capacitated Vehicle Routing Problem</i>) |
| FGVces | Centro de Estudos em Sustentabilidade da Fundação Getúlio Vargas |
| GEE (<i>GHG</i>) | Gases de Efeito Estufa (<i>Greenhouse Gas</i>) |
| <i>GIS</i> | <i>Geographic Information System</i> (Sistema de Informação Geográfica) |
| GLP | Gás Liquefeito de Petróleo |
| GNV | Gás Natural Veicular |
| GRS (<i>SWM</i>) | Gestão de Resíduos Sólidos (<i>Solid waste management</i>) |
| <i>GWP</i> | <i>Global Warming Potential</i> (Potencial de Aquecimento Global) |
| HFCs | Hidrofluorcarbonos |
| HTTP | <i>Hypertext Transfer Protocol</i> |
| IBF | Instituto Brasileiro de Florestas |
| <i>IPCC</i> | <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> |
| <i>ISWA</i> | <i>International Solid Waste Association</i> |
| <i>JSON</i> | <i>JavaScript Object Notation</i> |
| MMC | Método de Monte Carlo |
| <i>N₂O</i> | Óxido nitroso |
| ODM | Objetivos de Desenvolvimento do Milênio |
| ODS | Objetivos de Desenvolvimento Sustentável |
| ONU | Organização das Nações Unidas |
| <i>OSRM</i> | <i>Open Source Routing Machine</i> |
| PFCs | Perfluorcarbonos |
| PICO | População/problema, Intervenção, Controle e <i>Outcome</i> /resultado |
| RSU | Resíduos Sólidos Urbanos |
| <i>SF₆</i> | Hexafluoreto de enxofre |
| <i>url</i> | <i>Uniform Resource Locator</i> |
| <i>VRP</i> | <i>Vehicle Routing Problem</i> |
| <i>Vroom</i> | <i>Vehicle Routing Open-source Optimization Machine</i> |
| <i>WBCSD</i> | <i>World Business Council for Sustainable Development</i> |
| <i>WEEE</i> | Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (<i>Waste Electrical and Electronic Equipment</i>) |
| <i>WRI</i> | <i>World Resource Institute</i> |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 12 |
| 1.1 | GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS COMO UM MEIO DE ALCANÇAR OS OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL | 13 |
| 1.2 | OBJETIVOS | 15 |
| 1.2.1 | Objetivo Geral | 15 |
| 1.2.2 | Objetivos Específicos | 15 |
| 1.3 | ESTRUTURA DO TRABALHO | 15 |
| 2 | REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA | 17 |
| 2.1 | QUESTÃO DE PESQUISA | 17 |
| 2.2 | BASES UTILIZADAS | 18 |
| 2.3 | FASE DE SELEÇÃO | 18 |
| 2.4 | FASE DE EXTRAÇÃO DE DADOS | 18 |
| 2.5 | RESULTADOS | 20 |
| 2.5.1 | Tipo de Resíduos | 21 |
| 2.5.2 | Custos e Impactos Ambientais | 22 |
| 2.5.3 | Área Geográfica do Estudo | 23 |
| 2.5.4 | Ferramentas Computacionais | 23 |
| 2.6 | SÍNTESE DOS TRABALHOS ANALISADOS | 24 |
| 2.7 | DISCUSSÕES | 29 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 30 |
| 3.1 | ÁREA DE ESTUDO | 30 |
| 3.2 | OBTENÇÃO DAS ROTAS | 31 |
| 3.2.1 | Obtendo as rotas atuais com o auxílio do OSRM | 31 |
| 3.2.2 | Otimizando as rotas através do <i>Vroom</i> | 32 |
| 3.3 | GASTOS COM COMBUSTÍVEL | 33 |
| 3.4 | GERAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO VEÍCULO E DA PROPORÇÃO DE BIODIESEL UTILIZANDO O MÉTODO DE MONTE CARLO | 34 |
| 3.5 | ESTIMATIVAS DAS EMISSÕES | 35 |
| 3.5.1 | <i>GHG Protocol</i> | 35 |
| 3.5.1.1 | <i>Gases de efeito estufa considerados nos inventários</i> | 35 |
| 3.5.1.2 | <i>Cálculo das emissões</i> | 37 |
| 3.6 | COMPENSAÇÃO DAS EMISSÕES | 39 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 41 |
| 4.1 | EFICIÊNCIA DO VEÍCULO E PROPORÇÃO DO BIODIESEL NO DIESEL | 41 |
| 4.2 | CENÁRIO ATUAL | 41 |
| 4.2.1 | Consumo e Gastos com Combustível | 44 |

| | | |
|-------|---|----|
| 4.2.2 | Contabilização das Emissões | 45 |
| 4.3 | ROTAS OTIMIZADAS | 48 |
| 4.3.1 | Consumo e gastos com combustível | 50 |
| 4.3.2 | Contabilização das emissões de GEE | 51 |
| 4.4 | CENÁRIO ATUAL × ROTAS OTIMIZADAS | 54 |
| 4.5 | COMPENSAÇÃO DAS EMISSÕES | 58 |
| 5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 59 |
| | REFERÊNCIAS | 61 |
| | APÊNDICE A – Aplicação da API do OSRM | 66 |
| | APÊNDICE B – Utilizando o Software <i>Vroom</i> | 76 |

1 INTRODUÇÃO

O crescimento da urbanização e da população faz com que a quantidade de resíduos produzidos também aumente. Estima-se que em 2050 a geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) seja de 3,4 bilhões de toneladas em todo o mundo (1). O descarte desses resíduos, principalmente se for realizado de maneira incorreta, pode provocar danos ao solo, às águas e ao ar, além de impactar negativamente a saúde das pessoas. Além disso, a forma como é feita a disposição final desse material pode contribuir significativamente para o processo de mudanças climáticas, uma vez que a decomposição dos resíduos provoca a emissão de gases de efeito estufa (GEE), como o metano (CH_4) e o dióxido de carbono (CO_2) (1, 2). Sendo assim, gestão sustentável dos resíduos deve ser vista como uma questão global, uma vez que o tratamento inadequado dos mesmos representa uma ameaça não apenas ao meio ambiente e à saúde pública, mas também à economia e à sociedade como um todo (2).

Neste sentido, a gestão adequada dos resíduos funciona como um instrumento para a proteção do meio ambiente e também da saúde pública. A Gestão de Resíduos Sólidos (GRS) compreende todas as ações executadas ao longo de todo o processo de coleta, transporte, tratamento e destinação final adequada de resíduos sólidos gerados (3). De acordo com Hannan et al.(4) o processo de GRS se inicia com a saída dos veículos coletores de algum depósito ou instalação para fazer o percurso de coleta dos resíduos nos locais necessários. Depois disso, estes veículos voltam para as suas instalações originais onde o material coletado é transferido para outros veículos que levarão a carga coletada para os seus respectivos destinos, como centros de reciclagem, aterros sanitários ou usinas de compostagem.

Dentro de todo o processo de GRS, as partes mais importantes seriam as etapas de coleta e transporte dos resíduos, desde o local onde são gerados até o local onde são descartados (5). Estudos anteriores trazem informações de que esta fase compromete a maior parte do orçamento destinado a todo o processo, podendo chegar a até 80% de todos os recursos disponíveis (4, 5, 6, 7, 8). Estes gastos podem ser justificados pelas despesas com salários, custos elevados de combustíveis e manutenção dos veículos, uma vez que o uso de veículos durante toda a fase de coleta é muito intenso (6).

Do ponto de vista social e ambiental, Abdallah et al.(6) e Liu e Liao(8) afirmam que o fato do processo de coleta e transporte de resíduos envolver o uso intenso de veículos, gera como resultado um grande consumo de energia, emissões de gases poluentes na atmosfera e congestionamentos no tráfego das cidades. Diante disso, os responsáveis por realizar a GRS estão cada vez mais em busca de meios mais sustentáveis para realizar o processo de forma mais eficiente, como uma tentativa de reduzir os custos e os impactos ambientais do processo (4). Uma das formas mais eficientes de se reduzir os custos e as emissões envolvidas no processo de coleta e transporte dos resíduos é o planejamento das rotas dos

veículos utilizados (4, 9).

1.1 GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS COMO UM MEIO DE ALCANÇAR OS OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

A GRS se insere nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), estando relacionada, direta ou indiretamente, com vários deles (4, 10). Os ODS foram estabelecidos em 2015 pelos países membros da Organização das Nações Unidas (ONU) em substituição aos Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM) (11, 12).

Os ODMs representaram um conjunto formado por oito objetivos globais que os países membros da ONU assumiram, com o objetivo de fazer o mundo progredir de forma rápida em direção "à eliminação da extrema pobreza e da fome do planeta, fatores que afetavam especialmente as populações mais pobres, dos países menos desenvolvidos"(12, p. 33).

A respeito dos ODMs Roma(12), afirma que os ODMs

abrangiam ações específicas de combate à fome e à pobreza, associadas à implementação de políticas de saúde, saneamento, educação, habitação, promoção da igualdade de gênero e meio ambiente, além de medidas para o estabelecimento de uma parceria global para o desenvolvimento sustentável (12, p. 33).

Roma(12) ainda complementa que para cada objetivo foi definido um conjunto de metas globais, o que resultava em 21 metas no total. Grande parte das metas estabelecidas consideravam o intervalo entre 1990 e 2015 como horizonte de tempo. Neste sentido, fez-se necessário adotar uma nova agenda para substituir os ODMs a partir de 2015.

Assim, em setembro de 2015 os países membros da ONU definiram um novo plano de ação, com a adoção do documento chamado "Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável"(12). Neste documento, foi reconhecido que "a erradicação da pobreza em todas as suas formas e dimensões, incluindo a pobreza extrema, é o maior desafio global e um requisito indispensável para o desenvolvimento sustentável" (12, p. 38).

A Agenda 2030 é formada por 17 ODS e 169 metas a serem seguidas a partir de 2016. A Figura 1 mostra todos os 17 ODS definidos pela ONU.

Dentre os ODS, a GRS pode ser relacionada, direta ou indiretamente, com pelo menos 10 deles (4, 10). Sobre este ponto, Hannan et al.(4) afirmam que a coleta de resíduos sólidos nos municípios, independente do seu tamanho, pode ajudar a alcançar os ODS e as metas que se relacionam com a melhoria das cidades, através da redução da pobreza e da proteção ambiental e da saúde pública. Os autores complementam que tais metas

Figura 1 - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)



Fonte: Retirado de Organização das Nações Unidas(11)

podem ser alcançadas ao direcionar eficientemente a GRS para o consumo e a produção responsáveis, aumentando a participação de energia renovável na matriz energética global, prevenindo a poluição marinha, reduzindo significativamente as emissões de GEE, reduzindo resíduos químicos e biológicos perigosos, garantindo o fornecimento de água limpa e saneamento, mantendo o bem-estar e a boa saúde, desenvolvendo cidades sustentáveis, proporcionando trabalho decente e promovendo o crescimento econômico e a redução da pobreza (4, p. 3, tradução nossa) ¹.

A Tabela 1 mostra os ODS que se relacionam com a GRS e suas possíveis contribuições para o alcance dos ODS.

Sendo assim, a preocupação com as questões relacionadas com a GRS torna o alcance dos ODS mais acessível, uma vez que as cidades que possuem essa questão bem resolvida conseguem promover um ambiente saudável, melhorar o bem-estar da sua

¹ These targets can be achieved by efficiently directing SWM towards responsible consumption and production, rising the renewable energy share in the global energy mix, preventing marine pollution, greatly reducing GHG emissions, reducing chemical and biological hazardous wastes, ensuring the supply of clean water and sanitation, maintaining well-being and good health, developing sustainable cities, providing decent work and promoting economic growth and poverty reduction.

população, entre outros atributos que contribuem para o desenvolvimento sustentável da cidade (10, 13).

1.2 OBJETIVOS

Esta seção apresenta os objetivos geral e específicos desta dissertação.

1.2.1 Objetivo Geral

Este estudo tem como objetivo propor um modelo computacional de planejamento de rotas de coleta de resíduos sólidos, com o cálculo dos custos financeiros e das emissões dos GEE para o município de Sapucaia, que se localiza no interior do estado do Rio de Janeiro, no Brasil.

1.2.2 Objetivos Específicos

Este estudo conta com os seguintes objetivos específicos:

- Calcular os custos associados ao processo de coleta e transporte de resíduos;
- Calcular as emissões de GEE geradas no processo;
- Estimar quantas árvores deveriam ser plantadas para neutralizar as emissões de GEE.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido da seguinte forma:

1. **Introdução:** apresenta a contextualização sobre o tema, a importância do estudo e os objetivos da pesquisa;
2. **Revisão da Literatura:** discute os principais trabalhos existentes que abordam o problema de pesquisa;
3. **Materiais e Métodos:** descreve o processo de coleta de dados e as ferramentas utilizadas para a realização da pesquisa;
4. **Resultados e Discussões:** apresenta e analisa os resultados obtidos, discutindo suas implicações e comparando-os com a literatura revisada;
5. **Considerações Finais:** resume as principais conclusões da pesquisa, discute suas contribuições para o campo e sugere possíveis direções para trabalhos futuros.

Tabela 1 – ODS Relacionados com a GRS

| Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) | Alvo específico | Possível contribuição da GRS para alcançar os ODS |
|---|--|---|
| ODS 1: Erradicação da Pobreza | 1.4: Garantir que todos os homens e mulheres, particularmente os pobres e vulneráveis, tenham direitos iguais a recursos econômicos, bem como acesso a serviços básicos, propriedade e controle sobre a terra e a outras formas de propriedade, herança, recursos naturais, novas tecnologias apropriadas e serviços financeiros, incluindo microfinanças. | Reutilização e reciclagem como potenciais geradores de empregos. |
| ODS 3: Saúde e Bem-Estar | 3.2: Acabar com as mortes evitáveis de recém-nascidos e crianças menores de 5 anos, com todos os países objetivando reduzir a mortalidade neonatal para pelo menos até 12 por 1.000 nascidos vivos e a mortalidade de crianças menores de 5 anos para pelo menos até 25 por 1.000 nascidos vivos; 3.3: Acabar com as epidemias de AIDS, tuberculose, malária e doenças tropicais negligenciadas, e combater a hepatite, doenças transmitidas pela água, e outras doenças transmissíveis; 3.9: Reduzir substancialmente o número de mortes e doenças por produtos químicos perigosos e por contaminação e poluição do ar, da água e do solo. | A Gestão eficaz dos resíduos ajuda a prevenir a propagação de doença, o que pode contribuir para a saúde e bem-estar da população. |
| ODS 6: Água Potável e Saneamento | 6.3: melhorar a qualidade da água, reduzindo a poluição, eliminando despejo e minimizando a liberação de produtos químicos e materiais perigosos, reduzindo à metade a proporção de águas residuais não tratadas, e aumentando substancialmente a reciclagem e reutilização segura em âmbito mundial. | A gestão ambientalmente correta dos resíduos, principalmente dos resíduos perigosos, pode prevenir a poluição e contaminação das águas. |
| ODS 7: Energia Limpa e Acessível | 7.2: aumentar substancialmente a participação de energias renováveis na matriz energética global. | A coleta de resíduos eficaz e a utilização de tecnologias para transformação de resíduos em energia podem contribuir para o mix energético. |
| ODS 8: Trabalho Decente e Crescimento Econômico | 8.1: sustentar o crescimento econômico per capita, de acordo com as circunstâncias nacionais e, em particular, pelo menos um crescimento anual de 7% do produto interno bruto nos países de menor desenvolvimento relativo. | Os serviços de coleta e transporte de resíduos frequentemente são realizados por indivíduos ou pequenas empresas nos países em desenvolvimento. Isso significa que as medidas de apoio adotadas poderão contribuir para melhorar os meios de subsistência. |
| ODS 11: Cidades e Comunidades Sustentáveis | 11.1: garantir o acesso de todos a habitação adequada, segura e a preço acessível, e aos serviços básicos, bem como assegurar o melhoramento das favelas; 11.6: reduzir o impacto ambiental negativo per capita das cidades, inclusive prestando especial atenção à qualidade do ar, gestão de resíduos municipais e outros. | Acabar com o despejo de resíduos descontrolado e com a queima a céu aberto; Superar os desafios gerados pela rápida urbanização e melhorar os locais danificados através da retirada segura, da reciclagem e da gestão de resíduos eficientes nas cidades. Assim, espera-se que as residências sejam capazes de se expandir e prosperar, ao mesmo tempo que reduzem a poluição e a maneira de se utilizar os recursos. |
| ODS 12: Assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis | 12.3: reduzir pela metade o desperdício de alimentos per capita mundial, em nível de varejo e do consumidor, e reduzir as perdas de alimentos ao longo das cadeias de produção e abastecimento, incluindo as perdas pós-colheita; 12.4: até 2020, alcançar o manejo ambientalmente adequado dos produtos químicos e de todos os resíduos, ao longo de todo o ciclo de vida destes, de acordo com os marcos internacionalmente acordados, e reduzir significativamente a liberação destes para o ar, água e solo, para minimizar seus impactos negativos sobre a saúde humana e o meio ambiente; 12.5: reduzir substancialmente a geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reuso. | Criação de empregos 'verdes', eliminação do despejo descontrolado e da queima a céu aberto e diminuição da geração de resíduos através da prevenção e dos 3Rs (reduzir, reutilizar e reciclar). |
| ODS 13: Ação Contra a Mudança Global do Clima | 13.1: reforçar a resiliência e a capacidade de adaptação a riscos relacionados ao clima e às catástrofes naturais em todos os países | práticas adequadas de gerenciar os resíduos sólidos podem contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa. |
| ODS 14: Vida na Água | 14.1: até 2025, prevenir e reduzir significativamente a poluição marinha de todos os tipos, especialmente a advinda de atividades terrestres. | A gestão eficiente de resíduos pode evitar que os resíduos acabem nos oceanos. |
| ODS 15: Vida Terrestre | 15.1: até 2020, assegurar a conservação, a recuperação e o uso sustentável de ecossistemas terrestres e de água doce interiores e seus serviços, em especial, florestas, zonas úmidas, montanhas e terras áridas, em conformidade com as obrigações decorrentes dos acordos internacionais | Assegurar um sistema para o controle de resíduos que garanta a proteção da água e do solo, principalmente dos resíduos biológicos e tóxicos. |

Fonte: Adaptado de Bowan; Hannan et al.; Organização das Nações Unidas(10, 4, 11).

2 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Para auxiliar no desenvolvimento deste trabalho, uma revisão sistemática foi realizada com o objetivo de analisar como os trabalhos existentes na literatura abordam a questão da geração de rotas de coleta de resíduos mais eficientes, como uma maneira de contribuir para a redução dos custos associados a este serviço.

De acordo com Galvão e Ricarte(14) uma revisão sistemática da literatura é um tipo de pesquisa que segue protocolos específicos para entender "e dar alguma logicidade a um grande corpus documental, especialmente, verificando o que funciona e o que não funciona num dado contexto"(14, p. 58). Em outras palavras, uma

revisão sistemática de literatura é uma pesquisa científica composta por seus próprios objetivos, problemas de pesquisa, metodologia, resultados e conclusão, não se constituindo apenas como mera introdução de uma pesquisa maior como pode ser o caso de uma revisão de literatura de conveniência (14, p. 59).

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

Como dito anteriormente, uma revisão sistemática requer a definição das suas próprias questões de pesquisa. Neste trabalho, a questão principal da pesquisa foi obtida através da utilização da estratégia PICO (sigla que representa: **P**roblema ou **p**opulação, **I**ntervenção, **C**omparação e **O**utcome/resultado). Sobre a delimitação da questão de pesquisa, Galvão e Ricarte(14) afirmam que ela

deve contemplar a especificação da população, ou do problema ou da condição que será estudada, o tipo de intervenção que será analisado, se haverá comparação entre intervenções e o desfecho que se pretende estudar (14, p. 63).

Sendo assim, a Tabela 2 mostra como ficou definido o PICO desta pesquisa.

Tabela 2 – PICO

| | | |
|----------|---------------------|---|
| P | Problema | Coleta de resíduos sólidos em municípios |
| I | Intervenção | Processo de roteamento do transporte |
| C | Comparação/Controle | Atuais rotas de coletas de resíduos |
| O | Outcome | Reduzir os custos relacionados a coleta de resíduos sólidos |

Fonte: Elaborada pela autora (2024).

Assim, foi possível formular a seguinte pergunta: É possível gerar rotas de coleta de resíduos sólidos, através de um processo de roteamento do transporte, que sejam capazes de estimar/antecipar os custos referentes a este serviço?

A partir de então, foi possível definir as seguintes palavras-chave e seus sinônimos (termos entre parênteses): rotas de coleta, roteirização, resíduos sólidos urbanos (resíduos) e redução de custos (redução de custo). Como as buscas foram realizadas em bases internacionais, foi necessário obter também os termos em inglês. Assim, *collection routes*, *routing*, *urban solid waste (waste)*, *cost reduction (costs reduction)* foram as palavras-chave utilizadas durante as buscas. Estas palavras foram combinadas utilizando os operadores booleanos *And* (E) e *OR* (OU) para gerar a *string* de busca nas bases.

2.2 BASES UTILIZADAS

As bases utilizadas nesta revisão estão disponíveis na internet e foram acessadas via plataforma Periódicos da Capes (Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior). Foram utilizadas 4 bases: *Scopus*, *Science Direct*, *Springer Link* e *Sage Journals*. O processo de busca nas bases resultou em 159 trabalhos para a fase de seleção.

2.3 FASE DE SELEÇÃO

Inicialmente, verificou-se se os trabalhos faziam parte dos tipos aceitos: artigos publicados em jornais e revistas; monografias, dissertações e teses. Não foram aceitos trabalhos dos seguintes tipos: artigos de conferência e livros ou capítulos de livros. Após essa análise inicial, foram identificados 12 trabalhos fora dos tipos aceitos, sendo então removidos da revisão.

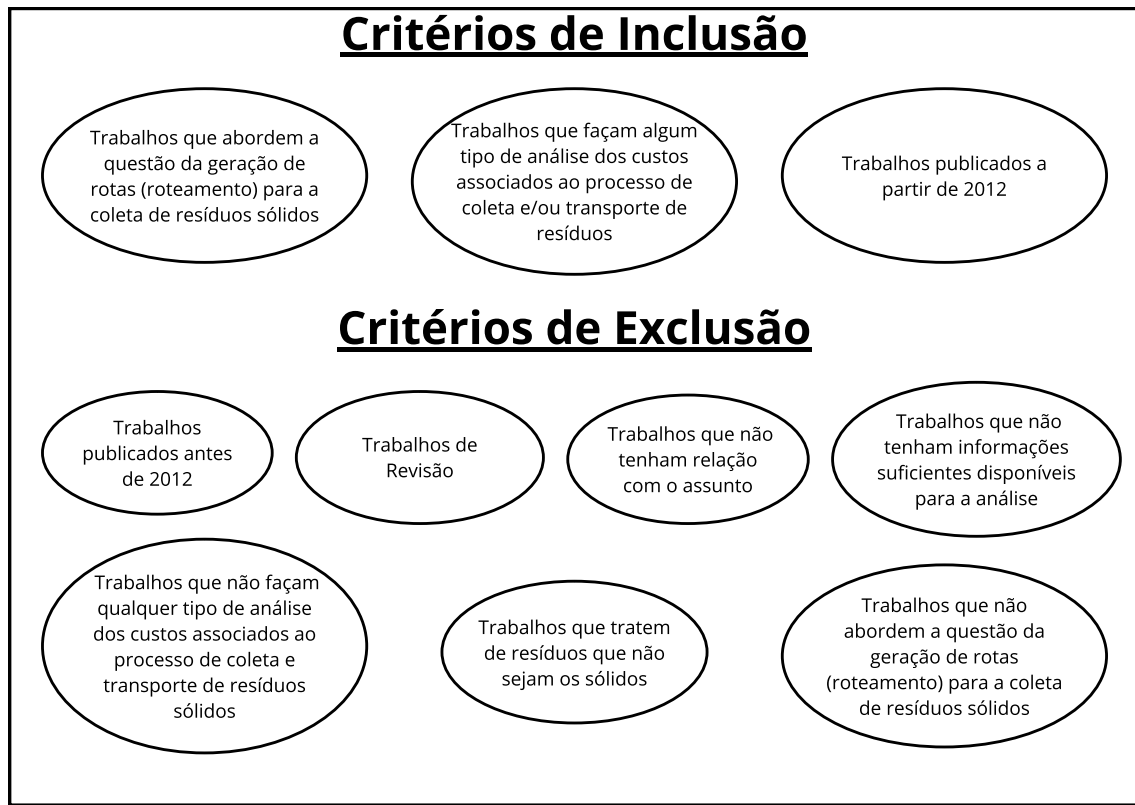
Os 147 trabalhos restantes passaram pela etapa de seleção, onde foram verificadas as possíveis duplicatas. Em seguida, foram lidos os seguintes campos: título, resumo e palavras-chave. A partir de então, era verificado se o trabalho atendia aos critérios de inclusão ou exclusão definidos. A Figura 2 mostra os critérios adotados para a inclusão ou a exclusão. Foi definido que um trabalho só seria incluído se atendesse aos três critérios simultaneamente. Mas para ser excluído, bastava atender apenas a um dos sete critérios de exclusão.

Dos 147 trabalhos analisados nesta etapa, foram obtidos os seguintes resultados: 7 duplicatas; 29 trabalhos incluídos, pois atenderam aos três critérios de inclusão simultaneamente; e, 111 trabalhos rejeitados, porque atenderam a pelo menos um critério de exclusão.

2.4 FASE DE EXTRAÇÃO DE DADOS

A fase de extração de dados consiste em realizar a leitura completa dos artigos e retirar deles os dados de interesse. As perguntas listadas a seguir foram formuladas para auxiliar na extração dos dados dos artigos.

Figura 2 - Critérios de Inclusão e Exclusão



Fonte: Elaborado pela autora (2024)

- Quais são os objetivos do trabalho?
- Qual o tipo de resíduo analisado?
- O trabalho utiliza algum *software* para auxiliar na otimização?
- O trabalho considera alguma área/região/cidade específica? Se sim, qual?
- O trabalho faz alguma análise ambiental, como emissões de carbono, por exemplo?
- Qual tipo de custo o trabalho considera?
- Quais são os resultados do trabalho?

Durante a fase de extração de dados foram excluídos mais 4 artigos, pois após realizar a leitura completa dos trabalhos, constatou-se que os mesmos não atendiam a algum dos critérios de inclusão. Como foi o caso do pesquisa realizada por Khan e Samadder(15) que não apresentava uma análise dos custos associados ao processo de coleta e transporte de resíduos sólidos.

Por sua vez, Gilardino et al.(16) não fizeram uma análise dos custos associados ao processo de coleta e transporte de RSU. Os autores resolvem um VRP com foco em calcular as emissões de GEE do processo. Eles consideram que a quantidade de caminhões necessária seria menor, mas não existe um custo relacionado a isso.

Já Rızvanođlu et al.(17) tinham como objetivo de pesquisa desenvolver um cronograma de rotas para a coleta de resídulos sólidos que reduzisse os custos ao mínimo. Entretanto ao final do trabalho, foi possível perceber que os custos que os autores analisaram eram os custos computacionais e não econômicos, que eram os de interesse deste trabalho.

Por fim, Sulemana et al.(18) utilizaram Sistema de Informação Geográfica (em inglês, *Geographic Information System - GIS*) para gerar rotas de coleta de lixo ótimas para o campus da Universidade de Ciência e Tecnologia de Kwame Nkrumah, localizada em Kumasi, Gana. O trabalho mostra que houve uma redução da distância percorrida durante a coleta. A partir de então, os autores concluem que os custos serão reduzidos, utilizando outros trabalhos como base para sustentar suas afirmações. Ou seja, os autores não fazem o cálculo efetivo dos custos gerados nas rotas antigas para comparar com os obtidos nas otimizadas.

2.5 RESULTADOS

Na literatura recente, foram encontrados diversos estudos que abordam o planejamento de rotas de veículos como uma estratégia eficaz para reduzir os custos associados ao processo de GRS. Esse planejamento pode ser alcançado por meio de processos de otimização, conhecidos na literatura como o problema de roteamento de veículos (em inglês, *Vehicle Routing Problem - VRP*), que consiste na determinação de rotas ideais para um conjunto de veículos para o atendimento de um conjunto de clientes (4).

A formulação inicial do VRP foi criada por Dantzig e Ramser em 1959, e foi originalmente chamada de *Truck Dispatching Problem*. Neste estudo, os autores modelaram um sistema de distribuição para postos de gasolina, com o objetivo de minimizar a distância percorrida pelos caminhões partindo de um depósito central. Mais tarde, em 1964, Clarke e Wright expandiram o problema proposto por Dantzig e Ramser, apresentando uma generalização (19).

O VRP é um dos problemas de otimização combinatória mais explorados na área de Pesquisa Operacional, devido à sua ampla aplicabilidade em diversos setores. Devido à complexidade envolvida na sua resolução, o VRP é classificado como um problema NP-Complexo, o que significa que, à medida que o número de clientes a serem atendidos aumenta, a dificuldade de encontrar a solução ótima cresce exponencialmente (20).

Na sua forma clássica, o VRP pode ser representado por um grafo não orientado

$G = (V, A)$, composto por um conjunto de vértices $V = \{v_0, v_1, \dots, v_n\}$ e um conjunto de arestas $A = \{(v_i, v_j) : v_i, v_j \in V, i < j\}$. O vértice v_0 representa o depósito, onde estão localizados n veículos idênticos com capacidade Q , enquanto os demais vértices correspondem aos clientes a serem atendidos. Cada cliente v_i tem uma demanda associada q_i , que é não negativa. As arestas $\{v_i, v_j\}$ têm um custo de deslocamento c_{ij} , também não negativo, que pode ser medido em termos de distância, tempo ou custo de viagem. O objetivo do VRP é determinar um conjunto de rotas, cada uma atribuída a um veículo, de modo que cada cliente seja visitado apenas uma vez e por um único veículo, minimizando o custo total da viagem enquanto se atende à demanda dos clientes (20).

Ao longo do tempo, diversas variantes do problema clássico foram desenvolvidas, como o Problema de Roteamento de Veículos Capacitado (CVRP), onde a demanda total de cada rota não pode exceder a capacidade do veículo, e cada veículo deve iniciar e finalizar sua rota no depósito. Quando se assume que os veículos da frota possuem diferentes capacidades, o problema se torna um VRP com frota heterogênea (20). Já o VRP com janelas de tempo introduz uma restrição adicional, onde cada cliente deve ser atendido dentro de um intervalo de tempo previamente estabelecido (21).

2.5.1 Tipo de Resíduos

Resíduos sólidos são todos os materiais, substâncias, produtos ou bens, em estado sólido ou semissólido, que resultam das atividades humanas em sociedade. Também entram nesta definição os gases e líquidos contidos em recipientes, que por causa da sua natureza não podem ser descartados na natureza de qualquer maneira (3).

Os resíduos sólidos podem ser classificados tanto pela sua origem quanto pela sua periculosidade. Em relação à origem, os resíduos podem ser classificados como: domiciliares, industriais, de construção civil, de limpeza urbana, de serviços públicos de saneamento básico, de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviço, de transporte, de serviços de saúde, de mineração, agrossilvopastoris e sólidos urbanos. Quanto à periculosidade, eles podem ser divididos em perigosos ou não perigosos (3).

Na literatura analisada, foi possível encontrar trabalhos que abordam os diferentes tipos de resíduos. A maioria foca em resíduos sólidos gerais, também chamados de resíduos sólidos municipais, resíduos sólidos ou RSU. Segundo a Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, os RSU incluem tanto os resíduos domiciliares, provenientes das atividades domésticas em áreas urbanas, quanto os resíduos de limpeza urbana, gerados pelos serviços de limpeza dessas áreas (3). Os trabalhos de Abdallah et al.(6), Akhtar et al.(5), Alarcon-Gerbier, Linß e Buscher(22), Aliahmadi, Barzinpour e Pishvaei(23), Hannan et al.(4), Hemidat et al.(7), Kala e Sodhi(24), Mahdavi, Mansour e Sajadieh(25), Mes, Schutten e Rivera(26) e Zaeimi e Rassafi(27) abordam os RSU.

Além disso, também foram encontrados estudos que tratam exclusivamente de

resíduos domésticos/residenciais (28, 29, 8), bem como de resíduos alimentares domésticos (30), resíduos orgânicos (31) e bio-resíduos (32).

Outro tipo de resíduo encontrado foi o industrial (33). Segundo a Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, os resíduos industriais são aqueles produzidos durante o processo produtivo ou em instalações industriais (3).

Também foi possível encontrar inúmeras pesquisas que abordam resíduos recicláveis. Os trabalhos de Cao, Liao e Huang(9), Chari, Venkatadri e Diallo(34) e Franca, Ribeiro e Chaves(35) abordam os resíduos recicláveis, sem definir um de forma específica. Já Zsigraiova, Semiao e Beijoco(36) e Marampoutis, Vinot e Trilling(37) analisaram a coleta e transporte de vidros e garrafas de vidros recarregáveis, respectivamente. Outros tipos de resíduos recicláveis encontrado foram: os resíduos elétricos e eletrônicos (38, 39); e o óleo de cozinha usado (40).

2.5.2 Custos e Impactos Ambientais

O processo de coleta e transporte de resíduos pode comprometer até 80% do orçamento destinado para executar toda a GRS (4, 5, 6, 7, 8). Esse processo envolve o uso intenso de veículos que, para funcionar, utilizam combustíveis. A queima desses combustíveis, também chamada de combustão, gera a emissão de gases poluentes na atmosfera (41). E, o aumento destes gases pode contribuir para o aumento do aquecimento global.

Com base nos critérios de inclusão e exclusão, os trabalhos selecionados deveriam abordar, de alguma maneira, a questão dos custos associados ao processo de coleta e transporte de resíduos. Dessa forma, todos os trabalhos incluídos realizam alguma análise referente aos custos. Assim, é possível dividir os trabalhos em dois grupos: aqueles que apresentam apenas uma análise dos custos financeiros associados a qualquer fase do processo e aqueles que também avaliam o impacto ambiental, que em geral tem relação com as emissões de gases poluentes na atmosfera. Desta forma, percebe-se que existe também uma preocupação com as questões ambientais envolvidas no processo de coleta e transporte de resíduos, além das preocupações financeiras.

Os trabalhos de Armington e Chen(30), Aliahmadi, Barzinpour e Pishvae(23), Cao, Liao e Huang(9), Franca, Ribeiro e Chaves(35), Hemidat et al.(7), Jammeli, Argoubi e Masri(29), Kala e Sodhi(24), Lavigne, Beliën e Dewil(32), Mes, Schutten e Rivera(26), Nowakowski, Szwarc e Boryczka(39) e Rabbani, Sadati e Farrokhi-Asl(33) formam o grupo dos trabalhos que possuem apenas a análise dos custos.

O outro grupo é formado pelos trabalhos de Abdallah et al.(6), Abdelli et al.(28), Akhtar et al.(5), Alarcon-Gerbier, Linß e Buscher(22), Chari, Venkatadri e Diallo(34), Fujii et al.(31), Hannan et al.(4), Liu e Liao(8), Mahdavi, Mansour e Sajadieh(25), Marampoutis, Vinot e Trilling(37), Nowakowski e Mrówczyńska(38), Rodríguez, Orjuela e Cadavid(40),

Zaeimi e Rassafi(27) e Zsigraiova, Semiao e Beijoco(36).

2.5.3 Área Geográfica do Estudo

Alguns dos trabalhos encontrados trataram de cidades ou regiões específicas. Com isso, encontramos as seguintes cidades/localidades: Teerã (23, 25, 33); Qazvin (27) no Irã; Bogotá, Colômbia (40); Lion, França (37); Bruxelas, Bélgica (32); Sousse, Tunísia (29); Barreiro, Portugal (36); Mostaganem, Argélia Ocidental (28); Chongqing, China (8); Holanda (26); Rio de Janeiro, Brasil (35); Nova Escócia, Canadá (34); Abu Dhabi, Emirados Árabes Unidos (6); Silésia, Polônia (38); Penfield, Estados Unidos (30) e Nova Délhi, Índia (24).

Alguns trabalhos analisaram mais de um local ao mesmo tempo. Hemidat et al.(7) utilizaram as cidades de Irbid, Zarqa e Al-Mafraq, localizadas na Jordânia. Já Nowakowski, Szwarc e Boryczka(39) utilizaram dados de Tóquio, Filadélfia e Varsóvia. E Fujii et al.(31) consideraram Machida, Tama e Hachioji, no Japão.

2.5.4 Ferramentas Computacionais

Cada trabalho definiu seu problema a ser otimizado e alguns autores especificaram o uso de algum software ou linguagem da programação para auxiliar no processo de obtenção das rotas otimizadas, dentre os quais temos: o *Solver CPLEX* (23, 25, 27, 29, 30, 33); o ArcGIS (6, 7, 28, 36); o *Solver Gurobi* (8, 22, 37); o *MATLAB* (5, 23); o *Python* (40); e, o *C++* (38).

A Tabela 3 mostra um resumo com as principais informações retiradas dos trabalhos.

Tabela 3 – Resumo dos Trabalhos Incluídos Na Revisão

| Referência | Tipo de Resíduo | Impacto Ambiental | Área do Estudo |
|--------------------------------------|---|-------------------|---------------------------------------|
| Zsigraiova, Semiao e Beijoco(36) | Vidro | Sim | Barreiro, em Portugal |
| Fujii et al.(31) | Resíduos sólidos orgânicos | Sim | Machida, Tama e Hachioji, no Japão |
| Mes, Schutten e Rivera(26) | Resíduos sólidos urbanos | Não | Holanda |
| Abdelli et al.(28) | Resíduos domésticos | Sim | Mostaganem, Argélia Ocidental |
| Chari, Venkatadri e Diallo(34) | Resíduos recicláveis | Sim | Nova Escócia, Canadá |
| Akhtar et al.(5) | Resíduos sólidos | Sim | — |
| Hemidat et al.(7) | Resíduos sólidos urbanos | Não | Irbid, Zarqa e Al-Mafraq, na Jordânia |
| Armington e Chen(30) | Resíduos alimentares | Não | Penfield, Nova York |
| Nowakowski e Mrówczyńska(38) | Resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (WEEE) | Sim | Silésia, na Polônia |
| Nowakowski, Szwarc e Boryczka(39) | Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos | Não | Tóquio, Filadélfia e Varsóvia |
| Abdallah et al.(6) | Resíduos sólidos | Sim | Um Gafa, nos Emirados Árabes Unidos |
| Franca, Ribeiro e Chaves(35) | Resíduos recicláveis | Não | Rio de Janeiro, no Brasil |
| Aliahmadi, Barzinpour e Pishvaei(23) | resíduos sólidos municipais | Não | Teerã, no Irã |
| Hannan et al.(4) | Resíduos sólidos | Sim | — |
| Rabbani, Sadati e Farrokhi-Asl(33) | Resíduos industriais | Não | Teerã, no Irã |
| Cao, Liao e Huang(9) | Resíduos recicláveis | Não | — |
| Jammeli, Argoubi e Masri(29) | Resíduos domésticos | Não | Sousse, na Tunísia |
| Lavigne, Bel'én e Dewil(32) | Resíduos biológicos | Não | Região da Capital de Bruxelas |
| Liu e Liao(8) | Resíduos domésticos | Sim | Chongqing, na China |
| Zaeimi e Rassafi(27) | Resíduos sólidos municipais | sim | Qazvin, no Irã. |
| Mahdavi, Mansour e Sajadieh(25) | Resíduos sólidos municipais | Sim | Teerã, no Irã |
| Marampoutis, Vinot e Trilling(37) | Garrafas de vidros reutilizáveis | Sim | Lyon, na França |
| Rodríguez, Orjuela e Cadavid(40) | Óleo de Cozinha usado | Sim | Bogotá, na Colômbia. |
| Alarcon-Gerbier, Linß e Buscher(22) | Resíduos sólidos | Sim | — |
| Kala e Sodhi(24) | Resíduos residenciais e comerciais | Não | Nova Delhi, Índia |

Fonte: Elaborada pela autora (2024).

2.6 SÍNTESE DOS TRABALHOS ANALISADOS

Esta seção apresenta um resumo de cada um dos textos incluídos nesta revisão sistemática. Cada resumo fornece uma visão geral do conteúdo abordado em cada estudo, destacando os objetivos e principais resultados.

O modelo proposto por Mahdavi, Mansour e Sajadieh(25) considera, simultaneamente, as três dimensões do conceito da sustentabilidade como pontos estratégicos, operacionais e táticos para as duas partes principais dos sistemas de gerenciamento de resíduos sólidos municipais, que são a coleta dos resíduos e o redesenho das estações de transferência intermediárias. O estudo foi realizado em Teerã, no Irã e os resultados mostraram que o modelo aplicado provoca uma redução nas distâncias percorridas de 86%, o que causa uma redução nos custos totais de 66%.

Hemidat et al.(7) realizaram um estudo cujo objetivo era desenvolver uma metodologia para a otimização dos sistemas de coleta de resíduos para as cidades de Irbid, Zarqa e Al-Mafraq, localizadas na Jordânia. A estratégia adotada pelos autores consistia na avaliação de indicadores de desempenho e indicadores de custos operacionais. A partir da análise dos indicadores, seria possível determinar as melhores possibilidades de rotas para coleta de resíduos com relação ao tempo de viagem, distância percorrida e custos. Foram simulados cenários, formados por diferentes suposições, para serem comparados com as rotas atuais. Os resultados mostraram que os cenários propostos geram custos totais menores para as três cidades analisadas, podendo chegar a economias de cerca de 31, 17 e 23% nos custos com pessoal e 23, 8 e 13% nos custos totais para as cidades de Irbid, Zarqa e Al-Mafraq, respectivamente.

Jammeli, Argoubi e Masri(29) desenvolveram um modelo para resolver o problema da coleta e transporte de resíduos domésticos na cidade de Sousse, na Tunísia. O modelo determina as rotas para os veículos e a quantidade de lixeiras que devem ser alocadas em cada possível local de coleta, de forma que os custos de coleta e o impacto ambiental sejam minimizados. Os resultados mostram uma redução nos custos da coleta. O impacto ambiental é analisado em termos de quantidade de lixeiras necessárias, uma vez que, para os autores, os resíduos domésticos armazenados podem causar problemas ambientais, como emissão de substâncias tóxicas, gases de efeito estufa e atração de animais.

Armington e Chen(30) buscaram desenvolver um modelo para coleta de resíduos alimentares residenciais, com foco nos impactos da expansão e crescimento da rede de coleta, tanto em consideração à adição de novas famílias/grupos familiares quanto à adição de novas comunidades, considerando a cidade de Penfield, município localizado próximo a Rochester, Nova York . A partir de um VRP capacitado, formulado como um programa matemático inteiro misto, que é solucionado utilizando a heurística *cluster-first, route second*, os autores realizaram o roteamento intra e entre bairros para obter uma sequência a ser percorrida, o tempo total do percurso de coleta e a quantidade total de resíduos

coletados. A implementação do modelo proposto mostrou uma redução no tempo de viagem por domicílio à medida que a densidade domiciliar aumenta, revelando que o tempo de viagem por grupo familiar diminui ao se incluir mais grupos na rota até um ponto crítico.

Lavigne, Belien e Dewil(32) propuseram um modelo de otimização de rotas para a coleta de bio-resíduos na região da capital de Bruxelas, na Bélgica. Os bio-resíduos são compostos por resíduos alimentares e resíduos verdes. Os autores consideraram diferentes cenários de coleta, onde eles analisaram a variação da forma como os resíduos são coletados, juntos ou separados, e a opção de tratamento final dos resíduos. Os resultados encontrados mostraram que a coleta conjunta dos resíduos alimentares e verdes poderia reduzir os custos de coleta em até 31%.

Fujii et al.(31) tiveram como objetivo desenvolver um método para planejar um sistema inteligente de tratamento e reciclagem de resíduos, que fosse econômico e robusto às mudanças de fatores externos, como população e comportamento de consumo. A otimização foi realizada através de GIS. Como estudo de caso, foram considerados dados de três cidades satélites dentro da região metropolitana de Tóquio, Japão. Os resultados mostraram que a reciclagem inteligente é capaz de reduzir não só as emissões de poluentes, mas também os custos globais.

Rodríguez, Orjuela e Cadavid(40) propuseram uma otimização das rotas de coleta de recipientes de óleos alimentares usados pelos estabelecimentos comerciais da cidade de Bogotá, na Colômbia. O modelo desenvolvido pelos autores buscava minimizar a distância percorrida que, em consequência, acabava reduzindo o tempo de viagem. A otimização mostrou que é possível reduzir uma média de 0,37 USD/kg de OCU (óleo de cozinha usado), além de uma redução média de 117,2g de CO_2/kg de OCU coletado. Os autores também chegaram à conclusão de que a otimização das rotas, combinada com um aumento na capacidade de armazenamento do óleo usado nos pontos geradores, e com a utilização da capacidade máxima dos veículos de coleta, é capaz de promover uma redução adicional de quase 20%, tanto nos custos de coleta quanto nas nas emissões de CO_2 .

Aliahmadi, Barzinpour e Pishvae(23) propuseram um modelo para otimizar as rotas de coleta de resíduos sólidos urbanos no Teerã, no Irã. A rede de coleta considerada era composta por lixeiras, instalações intermediárias, depósitos, aterros sanitários e veículos heterogêneos. O principal objetivo do modelo era reduzir os custos totais do processo. Os resultados mostraram uma redução nos custos, uma vez que a distância percorrida foi reduzida.

O trabalho desenvolvido por Abdelli et al.(28) tinha como objetivo otimizar a coleta de resíduos sólidos domésticos/domiciliares na cidade de Mostaganem, localizada da Argélia Ocidental. A otimização buscava uma redução tanto nos custos quanto na quantidade de emissões poluentes. Foram analisados 4 cenários e os resultados obtidos foram comparados

com o cenário atual praticado na coleta de resíduos. Dos cenários propostos, os autores identificaram que os melhores resultados foram obtidos com a construção de uma estação de transferência de resíduos. Foram obtidos uma redução de 71,81% nos circuitos de coleta, 72,05% no consumo de combustível, 46,8% no custo total de coleta. Em relação a emissão de poluentes, as reduções foram de 60,2% para os óxidos de carbono, 67,9% para os dióxidos de carbono, 74,2% para os óxidos de nitrogênio e 65% para material particulado.

Franca, Ribeiro e Chaves(35) analisaram a possibilidade da adoção de coleta seletiva de resíduos recicláveis, considerando uma empresa responsável pela coleta de resíduos em estabelecimentos comerciais na cidade do Rio de Janeiro, no Brasil. Os resultados obtidos para os cenários analisados mostraram que mesmo com um aumento na distância total percorrida foi possível alcançar uma redução de 45,4% no custo total por cliente, se a toda a região da coleta realizar a separação dos resíduos que podem ser reciclados.

Nowakowski e Mrówczyńska(38) desenvolveram um modelo para planejar as rotas e as localizações dos pontos de coleta. Os autores comparam as três formas de coletar os resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (em inglês, *Waste Electrical and Electronic Equipment - WEEE*) mais comuns, a saber: recolha móvel, onde um veículo é destinado para percorrer as ruas e os locais de coleta; coleta estacionária, onde os contêineres são colocados em locais próximos às residências, de forma que os moradores não precisem se locomover por grandes distâncias para realizar o descarte; e, transporte do resíduo pelo residente até um centro específico, onde os residentes devem levar os seus resíduos até um local no centro do município. O estudo foi realizado em duas regiões, uma área urbana e outra rural, localizadas no sul da Polônia. Os resultados indicam que o método de coleta móvel é o que apresenta os custos mais baixos e os menores impactos ao meio ambiente.

Nowakowski, Szwarc e Boryczka(39) analisaram uma outra possibilidade de coleta de WEEE, que consiste na coleta móvel sob demanda. Nesta modalidade, o indivíduo detentor do WEEE solicita que seja realizada a coleta em sua residência, em um horário determinado por ele mesmo. Assim, as rotas são geradas a partir da solicitação dos clientes. Os autores utilizaram as cidades de Tóquio, Filadélfia e Varsóvia para simular as solicitações de coleta. Os resultados encontrados mostram que melhorias significativas no planejamento das rotas de coleta de resíduos elétricos e eletrônicos podem ser obtidas.

Rabbani, Sadati e Farrokhi-Asl(33) descreveram um sistema para o transporte de resíduos automotivos, para o caso de uma empresa de automóveis localizada no Irã. No modelo proposto, os autores buscaram encontrar o conjunto ótimo das rotas de coleta e a localização dos pontos de coleta. Os resultados obtidos mostram que o planejamento poderia reduzir os custos da empresa.

Cao, Liao e Huang(9) adotaram um modelo de otimização das rotas de coleta de resíduos recicláveis que considera a utilização de uma frota heterogênea, formada

por veículos elétricos e a combustíveis, no processo. O modelo foi desenvolvido em dois níveis. No primeiro nível, o transporte ocorre dos clientes para as estações de reciclagem, enquanto o segundo compreende a movimentação das estações de reciclagem para os centros de reciclagem. Em ambos os casos, o modelo é estabelecido buscando as rotas que minimizem o custo total. A partir da realização de experimentos computacionais, os autores concluíram que a utilização de uma frota de veículos heterogênea pode promover a redução dos custos. Embora não seja realizado um cálculo das emissões de carbono, os autores afirmam que a utilização de veículos elétricos no processo seria capaz de promover uma redução nas emissões.

Liu e Liao(8) também formularam um modelo para otimizar as rotas de coleta em dois níveis. No primeiro nível se encontram as estações de transferência de resíduos. No segundo, estão as instalações finais dos resíduos, que neste caso seriam os aterros ou locais de incineração. O modelo desenvolvido considera a cooperação e a distribuição dos lucros entre os agentes participantes da rede de coleta. Os autores mostram que a cooperação entre as diferentes empresas de coleta, a partir de uma rede colaborativa para coletar e transferir os resíduos, pode reduzir os custos de transporte e as emissões de carbono.

Kala e Sodhi(24) propuseram a otimização do sistema de coleta e transporte de resíduos sólidos urbanos em ambientes de baixa tecnologia. O estudo foi desenvolvido considerando a cidade de Nova Deli, na Índia. Os resultados mostraram que é possível alcançar economias anuais de até 4,05% nos custos.

Marampoutis, Vinot e Trilling(37) desenvolveram um modelo de roteirização aplicado à coleta de garrafas de vidro retornáveis na cidade de Lyon, na França. O estudo foi baseado em um caso real. Os autores resolveram o problema para diferentes cenários, variando, por exemplo, a quantidade de clientes a serem atendidas e o tipo de veículo a ser utilizado, de forma que os resultados obtidos, em termos de custo financeiro e emissões de CO_2 , serviram como instrumento para os tomadores de decisão escolherem o melhor planejamento para a organização e o melhor veículo para ser utilizado.

O trabalho proposto por Alarcon-Gerbier, Linß e Buscher(22) analisa a viabilidade econômica e ambiental de se implementar instalações móveis de reciclagem de resíduos sólidos, com foco nos aspectos econômicos e ambientais. Através de um modelo de programação inteira mista, os autores formulam uma estrutura para otimizar a alocação de recursos na rede de reciclagem, levando em consideração os aspectos da localização, produção e roteamento. Os resultados do trabalho mostram que a utilização de unidades de reciclagem móveis reduz significativamente a distância e o custo de transporte, o que reduz as emissões de CO_2 , em comparação ao cenário de reciclagem centralizada.

Zaeimi e Rassafi(27) desenvolveram um modelo de otimização para ajudar a planejar a gestão dos resíduos sólidos municipais em Qazvin, no Irã. O modelo desenvolvido tinha como objetivo minimizar tanto os custos quanto as emissões de gases poluentes gerados pelo

transporte de resíduos, e considerava a localização e a alocação das instalações de coleta, reciclagem e também de descarte final dos resíduos. Os resultados obtidos mostraram que seria possível obter economias significativas nos custos e nas emissões de poluentes.

Chari, Venkatadri e Diallo(34) tinham como objetivo criar uma rede de roteamento para a coleta de resíduos recicláveis em Nova Escócia, no Canadá. Para isso, eles desenvolveram um modelo de decomposição matemático em duas fases para a coleta de múltiplos produtos recicláveis utilizando reboques compactadores. Os resultados mostraram que com a otimização é possível reduzir significativamente os custos de coleta em 53,7%, além de reduzir as emissões de GEE, promovendo assim maior sustentabilidade ambiental na gestão de resíduos.

Alguns trabalhos consideram a utilização de o nível de enchimento das lixeiras. O estudo realizado por Hannan et al.(4) tinha como objetivo desenvolver um modelo para a otimização das rotas para a coleta de resíduos sólidos, que promovesse melhora na eficiência da coleta, reduzisse os custos e as emissões, considerando a otimização de rotas fixas, que consideram dados estáticos das lixeiras e das rotas variáveis, que considera os dados obtidos do nível de enchimento da lixeira em tempo real. A otimização foi realizada através da utilização de um modelo de programação linear inteira mista. Os resultados obtidos mostram que a otimização promoveu redução tanto nos custos quanto nas emissões de carbono.

Akhtar et al.(5) desenvolveram um estudo para otimizar a coleta de resíduos a partir de dados do nível de enchimento das lixeiras em tempo real. O método utilizado foi o *Backtracking Search Algorithm* (BSA), um algoritmo evolucionário simples e eficaz. Os resultados mostraram que o modelo proposto é melhor do que o sistema convencional, em termos de distância percorrida, quantidade de resíduos coletados, eficiência, consumo e custo de combustível e emissões de CO_2 .

Em sua pesquisa Abdallah et al.(6) avaliaram a possibilidade de implantação de um sistema de coleta de resíduos inteligente, que se baseia em dados reais do nível de enchimento da lixeira para realizar a coleta das mesmas. A seleção das lixeiras que seriam coletadas foi realizada através de um algoritmo de tomada de decisão baseado em conhecimento, enquanto a otimização das rotas se deu através da utilização de ferramentas GIS. Os resultados mostraram uma redução dos custos operacionais de 19% em comparação com as rotas praticadas, enquanto as emissões de CO_2 podem ser reduzidas em até 21,9%, a depender do cenário considerado.

Mes, Schutten e Rivera(26) tiveram como objetivo desenvolver uma metodologia de planejamento para a coleta dinâmica de resíduos depositados em contêineres subterrâneos equipados com sensores. O modelo proposto considerava tanto as consequências de longo prazo das decisões quanto as incertezas relacionadas ao descarte de resíduos. Para solucionar o problema proposto, os autores desenvolveram uma heurística para ser implementada

e ajustada de maneira fácil. Os resultados mostraram que a implementação do modelo na empresa apresentou economias significativas. Além disso, os experimentos numéricos mostraram que realizar uma otimização nos parâmetros utilizados na heurística construída pode levar a reduções de custos de até 40%.

Zsigraiova, Semiao e Beijoco(36) buscaram desenvolver uma metodologia para reduzir custos operacionais e as emissões de poluentes envolvidas no processo de coleta e transporte de resíduos, que combina otimização de rotas de veículos com a programação da coleta de resíduos, que é realizada utilizando dados históricos para a taxa de enchimento de cada uma das lixeiras ao invés de considerar uma taxa de enchimento média. O modelo desenvolvido é aplicado no sistema de coleta de vidro na cidade de Barreiro, em Portugal. Os resultados mostraram os benefícios da otimização tanto em termos de custos operacionais quanto das emissões de gases poluentes, independente do critério utilizado na otimização. Ao se otimizar o tempo, são obtidas reduções de 62%, 43% e 40% no tempo gasto, no consumo de combustíveis e nas emissões de gases poluentes, respectivamente. O que representa uma redução de cerca de 57% nos custos totais.

2.7 DISCUSSÕES

A pesquisa realizada teve como objetivo descobrir como o planejamento de rotas para a coleta e transporte de resíduos pode ajudar a reduzir os custos com este serviço. A literatura existente mostrou que o problema de geração de rotas para coleta de resíduos pode ser tratado como problema de roteamento de veículos. Com base nos resultados obtidos, pode-se perceber que gerar rotas a partir de um processo de roteamento pode contribuir para a redução dos custos.

Também foi possível constatar que existe uma preocupação em obter sistemas de coleta e transporte eficientes não apenas em termos econômicos, mas também em termos ambientais e sociais, uma vez que o descarte de resíduos de maneira incorreta pode contribuir para a proliferação de doenças na sociedade e provocar mudanças climáticas.

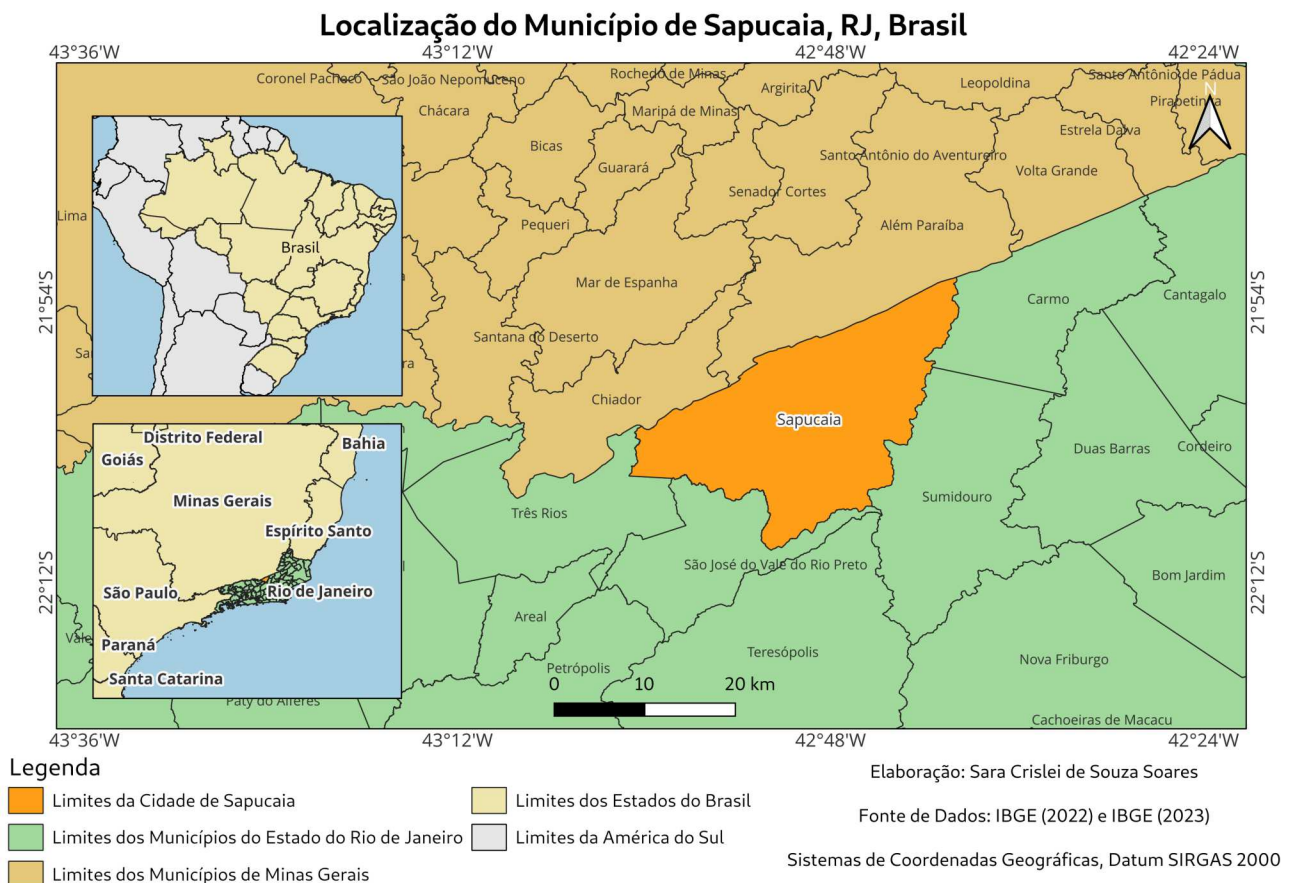
A pesquisa nos mostra que novos trabalhos podem ser realizados na área. Existem poucos trabalhos aplicados no contexto brasileiro. Apenas o trabalho realizado por Franca, Ribeiro e Chaves(35) faz isso. E em seu trabalho os autores não abordam a questão ambiental do problema, eles levam em consideração apenas o contexto econômico. Neste sentido, faz-se necessário o desenvolvimento de estudos voltados para a geração de sistemas de coleta e transporte de resíduos no território brasileiro, não apenas analisando o lado econômico, mas também o impacto ambiental.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

Neste trabalho foi utilizada a cidade de Sapucaia como área de estudo (Figura 3). O município possui uma área de $541,2\text{km}^2$ e está localizado na Região Centro-Sul do Estado do Rio de Janeiro, no Brasil (42). O município é composto por 5 distritos: Sapucaia, Anta, Nossa Senhora Aparecida, Jamapar e Vila do Pião (43). Entretanto, o estudo compreende apenas os 3 primeiros, uma vez que foram obtidos dados apenas destas tres localidades. As informações sobre as ruas onde ocorrem a coleta, a quantidade de caminhões e os locais do aterro onde são descartados os resíduos e da garagem onde ficam os caminhões foram obtidas com a Secretaria do Meio Ambiente do Município.

Figura 3 - Localização do Município de Sapucaia, RJ



Fonte: Elaborado pela autora (2024)

De acordo com as informações obtidas, a cidade dispõe de um total de quatro

caminhões responsáveis pela coleta de resíduos em todo o município. Nos três distritos analisados neste trabalho, a coleta é realizada três vezes por semana em Aparecida, e seis vezes por semana em Anta e Sapucaia. Além disso, o município conta com apenas um aterro para o descarte dos resíduos e uma garagem onde os caminhões são armazenados quando não estão em operação.

3.2 OBTENÇÃO DAS ROTAS

A partir da listagem com as ruas onde ocorre a coleta em cada um dos distritos foi possível obter as coordenadas de cada uma destas ruas. Tais coordenadas foram coletadas com o auxílio do *OpenstreetMaps* e do *Google Maps*. A partir de então, os dados coletados foram utilizados para obter a distância percorrida para coletar os resíduos. As Seção **3.2.1** mostra a ferramenta utilizada para calcular a distância percorrida considerando o cenário atual. Enquanto a Seção **3.2.2** apresenta a ferramenta utilizada para realizar a otimização das rotas.

3.2.1 Obtendo as rotas atuais com o auxílio do OSRM

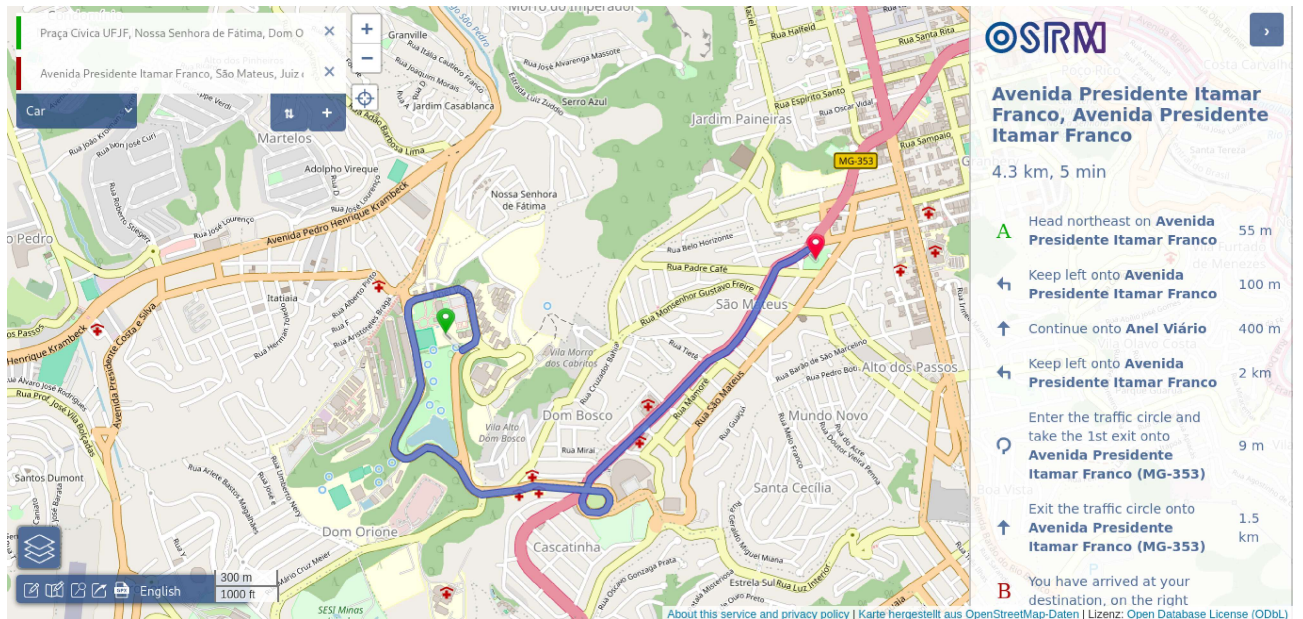
A distância percorrida no cenário atual foi calculada com o auxílio de uma API (*Application Programming Interface*) fornecida pelo *Open Source Routing Machine (OSRM)*¹. O *OSRM* é um projeto que permite calcular a rota mais curta entre dois ou mais pontos. A primeira versão do projeto foi lançada em julho de 2010 por Dennis Luxen e nesta versão já era prometido ser possível obter um roteamento de alto desempenho, com capacidade de tratar milhares de requisições por minuto (44).

O *OSRM* é um programa de código aberto escrito em C++ que usa dados do *OpenStreetMap* para calcular a distância e o tempo de viagem, que emprega por padrão, o algoritmo de Dijkstra para determinar o caminho mais curto entre vários pontos. O software é altamente eficiente, conseguindo calcular rotas extensas em questão de segundos (45). Além disso, a ferramenta permite que seja calculada a distância percorrida utilizando carro ou bicicleta, e também realizando a viagem a pé.

No *OSRM*, as rotas são geradas levando em consideração a ordem em que os pontos são selecionados. Este fato foi fundamental para a escolha da utilização do programa para calcular a distância atual percorrida durante o processo de coleta e transporte dos resíduos. Considerando que foram disponibilizados os nomes das ruas e a ordem em que tais ruas são visitadas, a ideia era usar o *OSRM* para reproduzir as rotas do cenário atual o mais próximo possível do percurso real de coleta.

A Figura 4 mostra um exemplo simples de uma rota gerada com o *OSRM* a partir de 2 pontos, utilizando um carro como veículo. Um exemplo mais completo sobre a

¹ Os detalhes sobre a utilização da API empregada neste estudo podem ser acessados no site oficial, disponível em: <<http://project-osrm.org/docs/v5.5.1/api/#general-options>>

Figura 4 - Rota Gerada Através do *OSRM*

Fonte: Elaborado pela autora (2024)

utilização da API do *OSRM* pode ser encontrado no **Apêndice A**.

3.2.2 Otimizando as rotas através do *Vroom*

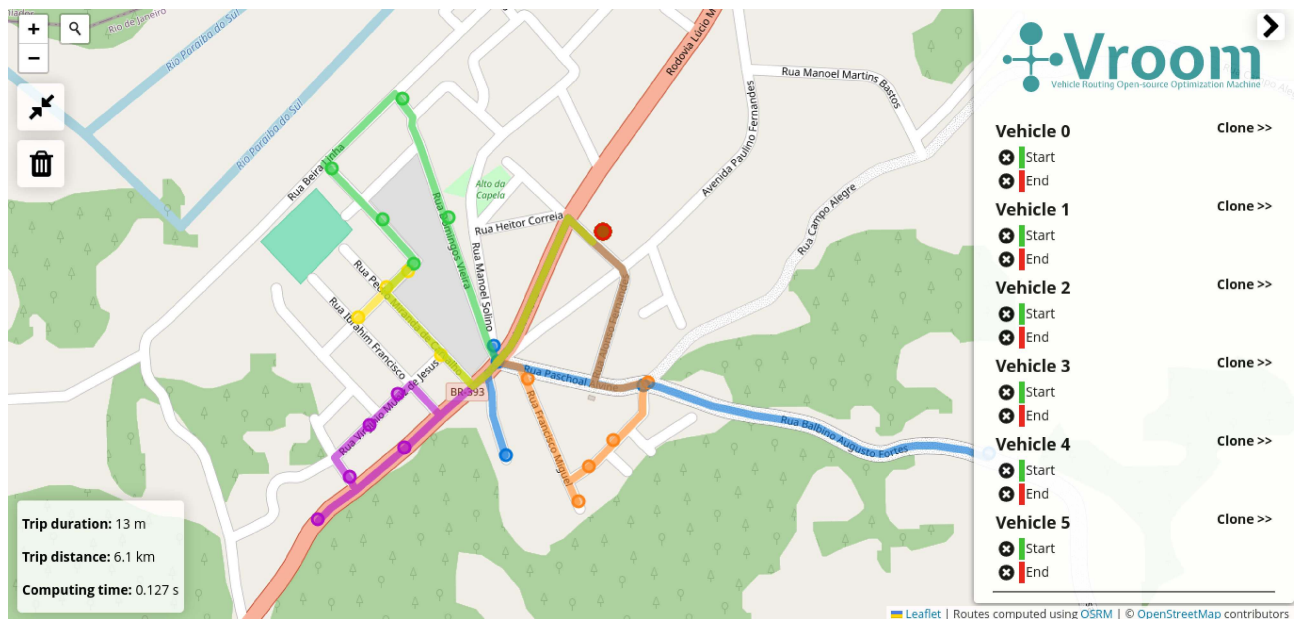
Neste trabalho, será utilizado o *software Vehicle Routing Open-source Optimization Machine (Vroom)*. Assim como o *OSRM*, também é um *software* de código aberto desenvolvido em C++ que utiliza dados do *OpenStreetMap*. O *Vroom* consiste em uma ferramenta capaz de fornecer boas soluções para várias aplicações reais de problemas de roteamento de veículos (VRP) em tempo computacional relativamente pequeno (46).

O *Vroom* oferece diversas configurações personalizadas que podem ser ajustadas de acordo com as necessidades específicas de cada problema. Essas configurações podem ser realizadas de duas maneiras: diretamente via linha de comando ou através da interface web disponível no site oficial (<http://vroom-project.org>). Em ambos os casos, o arquivo JSON é utilizado para fornecer os dados de entrada, como as localizações dos pontos de atendimento, a capacidade dos veículos e outras restrições do problema. Dentre as possibilidades de configuração, destacam-se: a definição da capacidade de carga dos veículos, horários dos turnos de trabalho, janelas de tempo para execução do serviço, definição de atendimentos prioritários, custos operacionais (fixos e variáveis), tempos de serviço em cada parada e restrições específicas de compatibilidade entre veículos e tarefas.

A Figura 5 apresenta um exemplo de rota gerada através do *Vroom*. O exemplo

considera um conjunto de 24 pontos a serem atendidos por um total de 6 veículos, onde cada veículo é representado por uma cor distinta na imagem. Para uma explicação mais detalhada sobre a configuração e a execução do programa, incluindo o passo a passo da geração de rotas, consulte o **Apêndice B**.

Figura 5 - Rota Gerada Através do *Vroom*



Fonte: Elaborado pela autora (2024)

3.3 GASTOS COM COMBUSTÍVEL

A estimativa do gasto necessário com combustível durante o processo de coleta e transporte de RSU pode ser obtida por meio da Equação 3.1:

$$G = Q \times P \quad (3.1)$$

Onde: G representa o gasto total com combustível, Q é a quantidade de combustível consumida, e P é o preço por litro de combustível. Neste estudo, foi considerado o diesel como combustível, adotando-se o preço de R\$ 5,90 por litro ² (47)

A quantidade de combustível consumida (Q) é calculada com base na Equação 3.2:

$$Q = \frac{D}{E} \quad (3.2)$$

² Preço médio de revenda do litro do diesel em 01/02/2024

onde: D corresponde à distância percorrida em km e E representa a eficiência do veículo, que pode ser entendida como a medida que expressa a quantidade de quilômetros que um veículo é capaz de percorrer a partir do consumo de 1 litro de combustível.

3.4 GERAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO VEÍCULO E DA PROPORÇÃO DE BIODIESEL UTILIZANDO O MÉTODO DE MONTE CARLO

A Simulação de Monte Carlo, ou Método de Monte Carlo (MMC), é uma abordagem matemática que utiliza uma sequência de cálculos para estimar a probabilidade de ocorrência de eventos incertos, permitindo assim “antecipar o futuro” ou medir o grau de incerteza presente em diferentes cenários. Amplamente utilizado em diversas áreas, o MMC é eficaz para modelar resultados em sistemas dinâmicos e ajudar na tomada de decisões informadas. Ele permite que analistas explorem vários resultados possíveis e entendam as probabilidades associadas a situações de incerteza, como variações na demanda de mercado, custos imprevisíveis e comportamentos desconhecidos dos concorrentes (48).

Ao simular diversos cenários, o método fornece uma distribuição de probabilidade dos resultados possíveis, permitindo identificar riscos, otimizar estratégias e alocar recursos de forma mais eficaz. Além disso, o MMC é essencial para o planejamento orçamentário, controle de custos e avaliação de riscos ao longo de um projeto, oferecendo informações cruciais para decisões mais precisas e fundamentadas (48).

Neste trabalho, o método foi utilizado para simular os valores da eficiência do veículo e da proporção de biodiesel. A escolha por gerar a eficiência do veículo através de processos aleatórios se deve à variação dos seus valores reais, que podem ser influenciados por diversos fatores, como o tipo de veículo, o combustível utilizado, as condições de trânsito, entre outros.

Além disso, o diesel comercializado no Brasil possui 14% de biodiesel em sua composição (49). Essa separação impacta diretamente as emissões de GEE, pois o biodiesel é menos poluente do que o diesel puro. Diante disso, optou-se por simular a proporção de biodiesel adicionada ao litro de diesel, também através do MMC, com o objetivo de avaliar os impactos dessa variação nas emissões de GEE.

Para simular a eficiência do veículo, foi utilizada uma distribuição uniforme com intervalo de variação de 1 a 5 km/L. Esse intervalo foi definido para capturar uma ampla gama de eficiências observadas em veículos sob diferentes condições. A proporção de biodiesel também foi simulada usando uma distribuição uniforme, variando entre 7% e 21%, o que abrange uma faixa significativa de possíveis valores. Para cada uma dessas variáveis foram simulados 100.000 valores, que combinados geram 100.000 cenários para análise. Ou seja, cada cenário foi gerado através de uma combinação de 1 valor de eficiência e 1 valor de proporção de biodiesel.

3.5 ESTIMATIVAS DAS EMISSÕES

3.5.1 *GHG Protocol*

Dentre as metodologias existentes para a realização de inventários corporativos dos GEE, o *GHG Protocol* ou Protocolo GHG (GHG significa gás de efeito estufa em inglês - *Greenhouse Gas*) é um dos mais utilizados pelos governos e empresas no mundo para fazer a quantificação e gerenciamento das suas emissões (50). O Protocolo GHG foi criado através de uma parceria entre o *WRI* (*World Resource Institute*) e o *WBCSD* (*World Business Council for Sustainable Development*). O programa representa um conjunto de padrões, orientações e treinamentos que as empresas e governos podem utilizar para medir e gerenciar as emissões dos GEE geradas a partir da execução das suas atividades. Embora sejam desenvolvidos de forma abrangente, os protocolos para contabilização de emissões podem ser adaptados por cada país para atender as especificidades de cada um (51).

Para atender as particularidades do cenário brasileiro, foi desenvolvido o Programa Brasileiro do *GHG Protocol*. A versão brasileira foi criada em 2008 em uma parceria entre o FGVces (Centro de Estudos em Sustentabilidade da Fundação Getúlio Vargas), o *WRI*, o Ministério do Meio Ambiente, o *WBCSD* e o CEBDS (Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável) (50). O programa tem como objetivo geral

promover, por meio de engajamento e capacitação técnica e institucional, uma cultura corporativa de caráter voluntário para a identificação, o cálculo e a elaboração de inventários de emissões de GEE (50, p. 10).

A FGVces, através do Programa Brasileiro *GHG Protocol*, fornece uma ferramenta para auxiliar as instituições na realização dos inventários das suas emissões. Além disso, também são disponibilizadas as normas e diretrizes que regem o programa. Essas ferramentas foram utilizadas para auxiliar na execução deste trabalho. Neste sentido, a contabilização das emissões realizadas neste trabalho seguirão as recomendações do Programa Brasileiro *GHG Protocol*.

3.5.1.1 *Gases de efeito estufa considerados nos inventários*

Os gases a serem considerados nos inventários são os conhecidos internacionalmente como gases de efeito estufa regulados pelo Protocolo de Kyoto, que são: o Dióxido de carbono (CO_2); o Metano (CH_4); o Óxido nitroso (N_2O); o Hexafluoreto de enxofre (SF_6); os Hidrofluorcarbonos (HFCs); e, os Perfluorcarbonos (PFCs) (50).

Cada um desses gases possui um fator de emissão, que significa “a medida que indica quanto de GEE é liberado na atmosfera para cada unidade de uma determinada atividade ou produção” (52, p. 31). Os GEEs gerados no processo de combustão são: o CO_2 (dióxido de carbono), o CH_4 (Metano) e o N_2O (Óxido nitroso). As Tabelas 4 e

5 mostram os fatores de emissão para o consumo de combustíveis de origem fóssil e de biocombustíveis, respectivamente. Os valores foram obtidos na *Planilha da Ferramenta GHG*, na aba de *Fatores de Emissão, Seção 3 - Fatores de emissão para transporte*, no item *3.1 Fatores para combustão móvel*.

Tabela 4 – Fatores de emissão por utilização de combustíveis fósseis em fontes móveis

| Combustível | Unidade | Fatores de Emissão (kg GEE/un.) | | |
|----------------------------------|----------------|---------------------------------|--------|---------|
| | | CO_2 | CH_4 | N_2O |
| Gasolina Automotiva (pura) | litros | 2,212 | 0,0008 | 0,00026 |
| Óleo Diesel (puro) | litros | 2,603 | 0,0001 | 0,0001 |
| Gás Natural Veicular (GNV) | m ³ | 1,999 | 0,0034 | 0,00011 |
| Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) | kg | 2,932 | 0,0029 | 0,00001 |
| Querosene de Aviação | litros | 2,517 | 0,0000 | 0,00007 |
| Gasolina de Aviação | litros | 2,251 | 0,0000 | 0,00006 |
| Lubrificantes | litros | 2,718 | 0,0001 | 0,00014 |
| Óleo Combustível | litros | 3,106 | 0,0004 | 0,00002 |

Fonte: Adaptado a partir da Planilha da Ferramenta do *GHG Protocol* (2024).

Tabela 5 – Fatores de emissão por utilização biocombustível em fontes móveis

| Combustível | Unidade | Fatores de Emissão (kg GEE/un.) | | |
|------------------|---------|---------------------------------|---------|---------|
| | | CO_2 | CH_4 | N_2O |
| Etanol Hidratado | litros | 1,457 | 0,0004 | 0,00001 |
| Biodiesel (B100) | litros | 2,431 | 0,00033 | 0,00002 |
| Etanol Anidro | litros | 1,526 | 0,0002 | 0,00001 |

Fonte: Adaptado a partir da Planilha da Ferramenta do *GHG Protocol* (2024).

Cada GEE possui uma capacidade de reter calor. Sobre essa questão, o Centro de Estudos em Sustentabilidade - FGVces(53) afirma que:

Cada gás de efeito estufa é capaz de reter calor em determinada intensidade, sendo que tal capacidade pode ser comparada à capacidade do dióxido de carbono (CO_2) de realizar a mesma função. Essa relação pode ser expressa através do potencial de aquecimento global de cada gás, ou *GWP* (*Global Warming Potential*, em inglês). Tais valores de referência são apresentados nos relatórios do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas – IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, em inglês) (53, p. 1)

A Tabela 6 mostra os valores de *GWP* para os gases CO_2 , CH_4 e N_2O . Os valores foram retirados da planilha da ferramenta *GHG Protocol*, na aba *Fatores de Emissão*, na *Seção 5 - Potencial de Aquecimento Global (GWP) dos Gases de Efeito Estufa*. Os valores presentes na planilha são os mais atualizados para cada gás.

Tabela 6 – Potencial de Aquecimento Global (*GWP*) dos Gases Emitidos no Consumo de Combustíveis

| Gás | Família / Tipo | GWP | Referência |
|-------------------------------|----------------|-----|------------|
| Dióxido de carbono (CO_2) | - | 1 | |
| Metano (CH_4) | - | 28 | IPCC 2013 |
| Óxido nitroso (N_2O) | - | 265 | |

Fonte: Adaptado a partir da Planilha da Ferramenta do *GHG Protocol* (2024).

A partir do *GWP*, cada GEE pode ser representado na forma de CO_2 , formando assim o que é chamado de carbono equivalente (CO_2e) (54).

3.5.1.2 Cálculo das emissões

A partir do material fornecido pela FGVces, foi possível obter as seguintes equações para estimar as emissões de CO_2e associadas ao processo de combustão:

$$E_{total} = \sum_{i=1}^n (E_i \times G_i) \quad (3.3)$$

$$E_{total} = (E_{CO_2} \times G_{CO_2}) + (E_{CH_4} \times G_{CH_4}) + (E_{N_2O} \times G_{N_2O}) \quad (3.4)$$

A Equação 3.3 calcula a emissão total de CO_2e gerada no processo da queima de combustíveis. Os termos i e n correspondem ao tipo de gás de efeito estufa e a quantidade de gases que estão sendo considerados. Como dito anteriormente, o processo de combustão gera a emissão de CO_2 , CH_4 e N_2O . Assim, $n = 3$ ([1] CO_2 , [2] CH_4 e [3] N_2O). E_i representa a emissão do gás i e G_i é o potencial de aquecimento global do gás i . A Equação 3.4 é uma versão estendida da Equação 3.3, onde i é substituído pelo gás que está sendo calculado. Pode-se então calcular a emissão de cada gás a partir das equações que se seguem.

$$E_{CH_4} = \sum_{j=1}^m (Q_j \times F_{(CH_4)_j}) \quad (3.5)$$

$$E_{N_2O} = \sum_{j=1}^m (Q_j \times F_{(N_2O)_j}) \quad (3.6)$$

As Equações 3.5 e 3.6 calculam as emissões de CH_4 e N_2O , respectivamente. Os termos j e m representam o tipo e a quantidade de tipos de combustíveis estão sendo utilizadas. Essa divisão é necessária porque o diesel comercializado no Brasil possui uma parcela de biodiesel na sua composição, o que acaba impactando nos resultados dos cálculos. Atualmente, o diesel comercializado no Brasil possui 14% de biodiesel na sua composição (49). Assim, $m = 2$, onde [1] Diesel (D) e [2] Biodiesel (B).

$$E_{CH_4} = (Q_D \times F_{(CH_4)_D}) + (Q_B \times F_{(CH_4)_B}) \quad (3.7)$$

$$E_{N_2O} = (Q_D \times F_{(N_2O)_D}) + (Q_B \times F_{(N_2O)_B}) \quad (3.8)$$

As Equações 3.5, 3.6 podem ser reescritas nas equações 3.7 e 3.8. Os termos Q_D e Q_B são as quantidades (em Litros) consumidas de diesel e biodiesel, respectivamente. $F_{(CH_4)_D}$ e $F_{(N_2O)_D}$ são os fatores de emissão do CH_4 e N_2O para o Diesel, respectivamente. Enquanto $F_{(CH_4)_B}$ e $F_{(N_2O)_B}$ são os fatores de emissão de CH_4 e N_2O para o Biodiesel.

No caso do CO_2 , o processo de cálculo é um pouco diferente, pois as emissões provenientes do diesel e do biodiesel não podem ser somadas diretamente, como acontece com o CH_4 e o N_2O . O óleo diesel é um combustível fóssil, enquanto o biodiesel é de origem renovável. Embora ambos os combustíveis liberem gases de efeito estufa durante a queima, o biodiesel é considerado mais sustentável, pois sua produção e uso resultam em um ciclo de carbono mais equilibrado em comparação ao diesel, que contribui para um aumento líquido de CO_2 na atmosfera.

A parcela de emissões geradas pelo uso do biodiesel não entra no total das emissões de CO_2 geradas, porque são consideradas emissões biogênicas. Sobre as emissões de CO_2 biogênico, cabe destacar o seguinte trecho:

algumas atividades antrópicas emitem CO_2 por conta da transformação de estoques biológicos de carbono (vegetais, animais, algas, entre outros). O carbono presente em tais estoques biológicos foi removido da atmosfera através da fotossíntese, logo estas emissões não possuem impacto adicional na concentração deste GEE na atmosfera. Por este motivo, as emissões de CO_2 biogênico devem ser contabilizadas de maneira separada em relação às outras emissões de GEE, pois estas possuem impacto adicional nas concentrações de GEE na atmosfera (55).

As equações abaixo podem ser usadas para calcular as emissões de CO_2 .

$$E_{CO_2} = Q_D \times F_{(CO_2)_D} \quad (3.9)$$

$$E_{CO_2}^* = Q_B \times F_{(CO_2)_B} \quad (3.10)$$

Nas Equações 3.9 e 3.10 os termos E_{CO_2} e $E_{CO_2}^*$ são usados para calcular as emissões de CO_2 e CO_2 biogênico, respectivamente. $F_{(CO_2)_D}$ e $F_{(CO_2)_B}$ são os fatores de emissão de CO_2 do diesel e do biodiesel, respectivamente.

A utilização deste conjunto de equações permite compreender a contribuição de cada gás no total de CO_2e calculado ao final do processo, uma vez que a parcela associada a cada um dos gases é calculada de forma separada. E também será possível verificar as emissões do CO_2 biogênico.

3.6 COMPENSAÇÃO DAS EMISSÕES

A compensação das emissões de carbono pode ser realizada através do plantio de árvores (que também é conhecido como sequestro de carbono). Segundo o Instituto Brasileiro de Florestas (IBF),

O sequestro de carbono é um método que consiste na sua neutralização por parte do plantio de árvores. O CO_2 é removido da atmosfera e fixado na biomassa da planta, porém, sua captura é feita somente na fase de crescimento das árvores. (IBF, 2020 *apud* Bachini(56), 2020, p. 29).

Para compensar 1 tonelada de GEE é necessário plantar cerca de 7,14 árvores. O processo de compensação ocorre em um período de até 20 anos, que corresponde ao período de crescimento das árvores (Plante uma árvore). Isso significa que cada árvore pode compensar aproximadamente 140k kg de CO_2 .

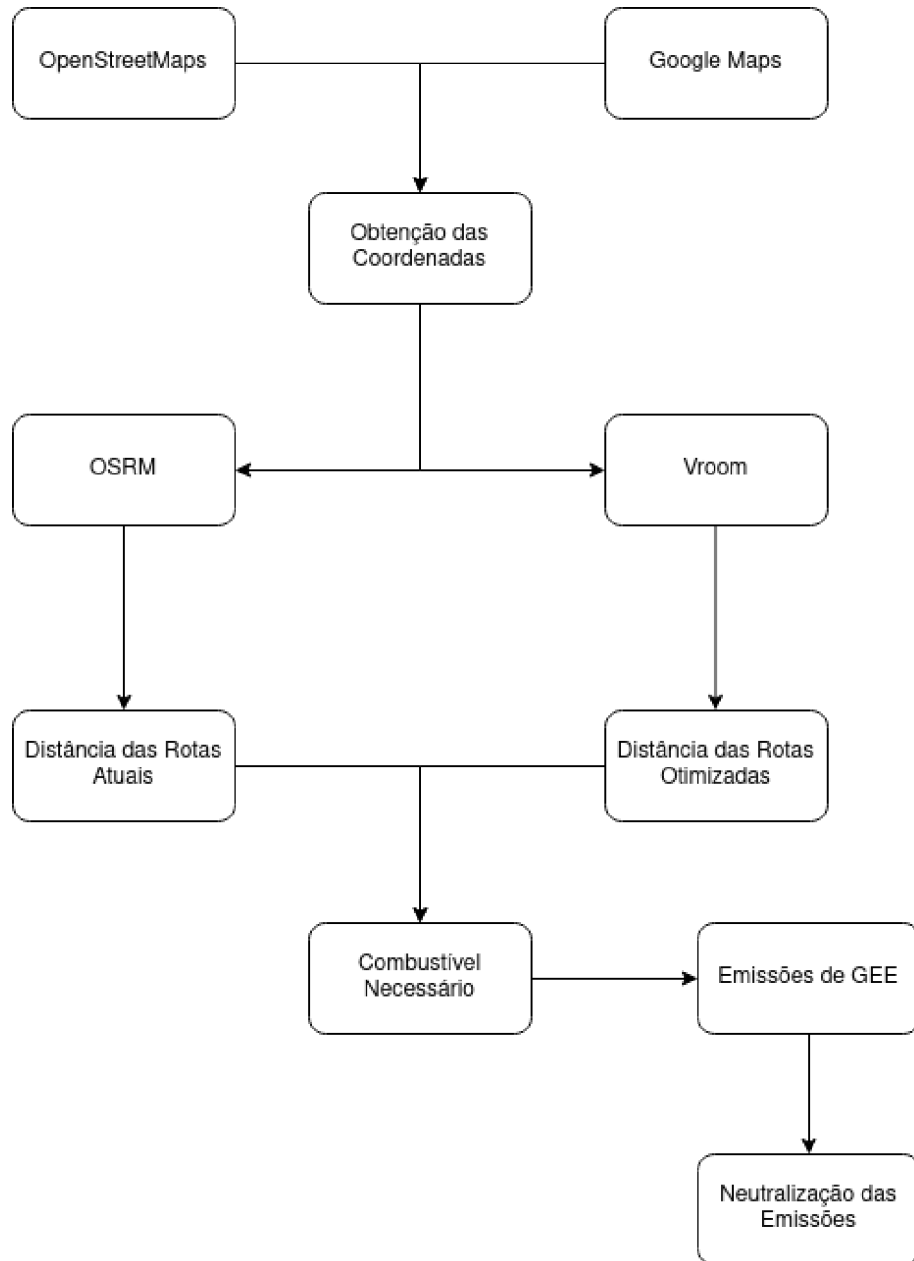
A partir desta informação, chega-se a seguinte equação para calcular a quantidade total de árvores que devem ser plantadas para compensar as emissões de CO_2e :

$$Q_A = \frac{E_{Total}}{A} \quad (3.11)$$

onde: Q_A é a quantidade total de árvores a serem plantadas; E_{Total} é a quantidade total de CO_2e , calculada a partir da Equação 3.3; e, A é a quantidade de CO_2e que uma única árvore é capaz de absorver ($A = \frac{1000}{7,14}$).

A Figura 6 mostra o fluxograma das etapas seguidas no desenvolvida do trabalho.

Figura 6 - Fluxograma das Etapas Seguidas no Trabalho



Fonte: Elaborado pela autora (2024)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados os principais resultados obtidos durante o desenvolvimento desta pesquisa. Inicialmente, serão apresentados os resultados considerando os distritos individuais. Na sequência serão considerados os distritos em conjunto.

4.1 EFICIÊNCIA DO VEÍCULO E PROPORÇÃO DO BIODIESEL NO DIESEL

A Tabela 7 apresenta as principais estatísticas descritivas obtidas para a eficiência veicular e a proporção de biodiesel adicionada ao diesel. Essas estatísticas foram derivadas dos dados gerados pelo Método de Monte Carlo, que permitiu a simulação de diferentes cenários e a análise das variáveis em questão. Vale ressaltar que os cenários foram gerados a partir da combinação de um valor de eficiência e um valor de proporção de biodiesel. Dessa forma, os resultados são apresentados em intervalos de valores, refletindo a diversidade das condições simuladas.

Tabela 7 – Estatísticas da Proporção do Biodiesel no Diesel e da Eficiência do Veículo

| | Proporção de Biodiesel | Eficiência |
|--------------|-------------------------------|-------------------|
| count | 100.000 | 100.000 |
| mean | 0,14 | 3,00 |
| std | 0,04 | 1,15 |
| min | 0,07 | 1,00 |
| max | 0,21 | 5,00 |

Fonte: Elaborado pela autora

Os resultados mostrados na Tabela 7 estão em conformidade com o estabelecido na Seção 3.4, onde foi definido que a proporção de biodiesel iria variar entre 7% e 21%, e a eficiência entre 1 e 5 km/L. Dessa forma, a proporção média de biodiesel encontrada foi de 14%, e a eficiência média foi de 3 km/L.

4.2 CENÁRIO ATUAL

Inicialmente, a distância percorrida é calculada com base nas rotas atualmente praticadas no município. Para determinar a distância total percorrida, é necessário primeiro calcular a distância coberta em cada um dos distritos. Esse cálculo é realizado considerando as seguintes suposições:

- Um caminhão de coleta é designado para cada distrito analisado;
- Os caminhões ficam estacionados em uma garagem, de onde partem diariamente para realizar a coleta;

- Cada caminhão sai da garagem com destino ao seu respectivo distrito, percorrendo as ruas da rota para coletar os resíduos;
- Após finalizar a coleta, o caminhão se desloca até o aterro para descartar os resíduos coletados;
- Por fim, o caminhão retorna à garagem.

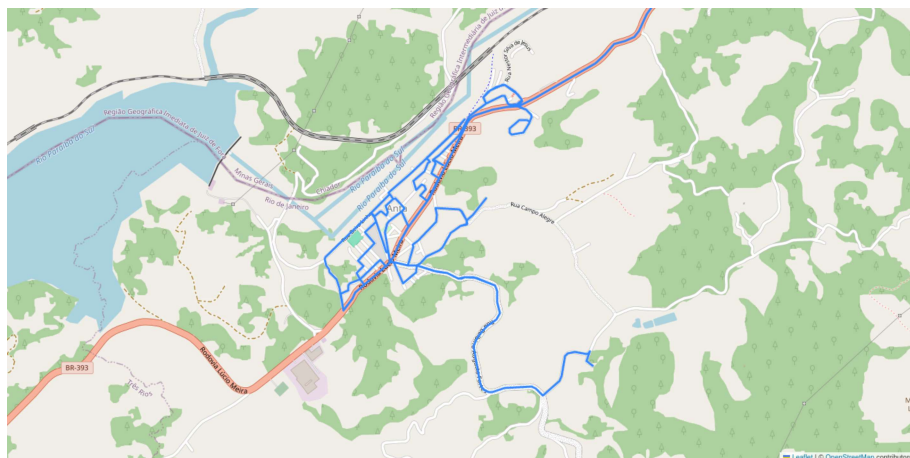
As Figuras 7, 8 e 9 mostram o desenho das rotas de coleta para os distritos de Sapucaia, Anta e Aparecida, respectivamente.

Figura 7 - Desenho da Rota Atual do Distrito de Sapucaia



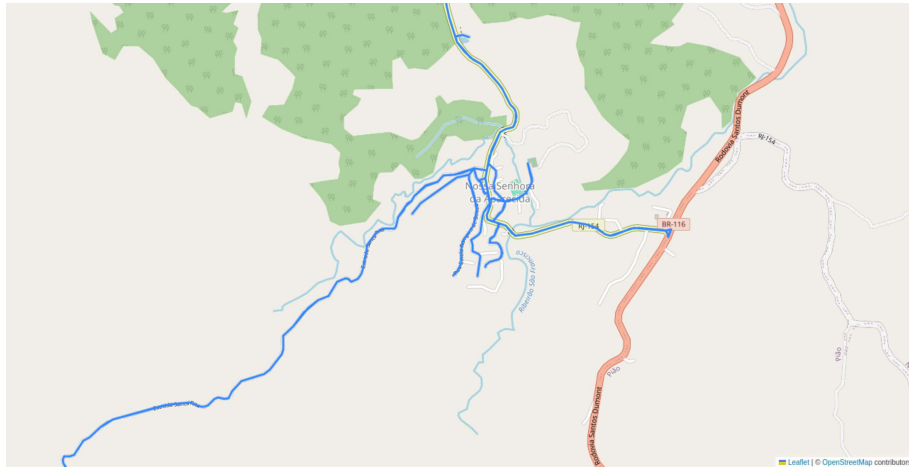
Fonte: Elaborado pela autora (2024)

Figura 8 - Desenho da Rota Atual do Distrito de Anta



Fonte: Elaborado pela autora (2024)

Figura 9 - Desenho da Rota Atual do Distrito de Aparecida



Fonte: Elaborado pela autora (2024)

Com o auxílio do OSRM foram obtidas as distâncias percorridas em cada um dos distritos, em um único dia e utilizando apenas um veículo. A partir de então pode-se estimar qual quilometragem será percorrida por semana, mês e ano. Os resultados semanais foram calculados com base nas informações obtidas de que a coleta ocorre 6 dias da semana em Sapucaia e em Anta, enquanto em Aparecida ocorre apenas 3 dias. Para os resultados mensais, considerou-se que os meses possuem em média 4,345 semanas. Por fim, os resultados anuais consideraram os 12 meses do ano.

A Tabela 8 mostra a distância total percorrida em km em cada um dos distritos analisados, considerando os seguintes períodos: diário, semanal, mensal e anual. Pode-se perceber que o caminhão percorre quase 35 km por dia para coletar e transportar os resíduos no distrito de Sapucaia. Isso significa que serão percorridos cerca de 208 km por semana, 904 km por mês e 10.840 km por ano. Em relação ao distrito de Anta, verifica-se que a distância diária percorrida é de quase 53 km, o que resulta em pouco mais de 316 km por semana, 1.375 km por mês e 16.501 por ano. A região de Aparecida é a que apresenta a maior distância diária a ser percorrida, que corresponde a pouco mais de 81 km. Isso representa cerca de 243 km por semana, mais de 1.056 km por mês e quase 12.682 km por ano.

Tabela 8 – Distância Percorrida (km) em Cada Distrito

| Distrito | Período | | | |
|-----------|---------|---------|----------|-----------|
| | Diário | Semanal | Mensal | Anual |
| Sapucaia | 34,65 | 207,90 | 903,33 | 10.839,96 |
| Anta | 52,75 | 316,47 | 1.375,07 | 16.500,84 |
| Aparecida | 81,07 | 243,22 | 1.056,80 | 12.681,60 |

Fonte: Elaborado pela autora

Sendo assim, a distância total percorrida no município pode ser obtida através do somatório dos resultados individuais. Os resultados diários se referem aos dias onde a coleta ocorre nos três distritos em conjunto, não sendo analisado assim os casos onde só ocorre coleta em Anta e Sapucaia. Sendo assim, a Tabela 9 apresenta os resultados da quilometragem total percorrida em todo o distrito, considerando os períodos: diário, semanal, mensal e anual. Tais resultados consideram a utilização de um veículo de coleta para cada distrito.

Tabela 9 – Distância Total Percorrida no Município - Cenário Atual

| Período | Veículos Utilizados | Distância Total Percorrida (km) |
|---------|---------------------|---------------------------------|
| Diário | 3 | 168,47 |
| Semanal | 3 | 767,59 |
| Mensal | 3 | 3.335,20 |
| Anual | 3 | 40.022,40 |

Fonte: Elaborado pela autora

Para evitar que o trabalho se torne redundante e cansativo, são apresentados apenas os resultados relacionados às distâncias percorridas por dia e por ano, evitando assim sobrecarregar o leitor com informações excessivas. Entretanto, as distâncias semanais e mensais foram explicadas para trazer mais clareza ao trabalho. A escolha por apresentar apenas os resultados relacionados às distâncias percorridas por dia e por ano foi motivada pela necessidade de fornecer uma visão clara e concisa do desempenho do sistema de coleta. Os resultados diários fornecem uma análise detalhada da operação cotidiana, enquanto os anuais oferecem uma visão de longo prazo, essencial para o planejamento e a avaliação geral.

4.2.1 Consumo e Gastos com Combustível

A partir da distância percorrida e da eficiência do veículo, pode-se calcular a quantidade de diesel necessária em cada um dos cenários analisados. Depois disso, foram calculadas as estimativas de gastos para adquirir o combustível necessário. Cabe lembrar que o combustível assumido neste trabalho é o diesel, e que o preço adotado foi de R\$ 5,90.

A Tabela 10 apresenta um resumo dos resultados obtidos para o cálculo do consumo de combustível e das despesas diárias. O consumo diário de diesel varia entre 33,73 e 168,63 litros, com uma média aproximada de 67,80 litros. Os gastos diários com combustível variam de R\$ 199,00 a R\$ 994,92, sendo o gasto médio de R\$ 400,00.

Tabela 10 – Consumo e Custo de Combustível Diário - Cenário Atual

| | Consumo de Combustível | Custo do Combustível (R\$) |
|--------------|------------------------|----------------------------|
| count | 100.000 | 100.000 |
| mean | 67,80 | 400,00 |
| std | 32,83 | 193,70 |
| min | 33,73 | 199,00 |
| max | 168,63 | 994,92 |

Fonte: Elaborado pela autora

O resumo estatístico dos resultados anuais está apresentado na Tabela 11. Observa-se que o consumo médio anual de diesel é de aproximadamente 16.090 litros, com um consumo mínimo pouco acima de 8.000 litros e um consumo máximo em torno de 40.020 litros. Além disso, o gasto médio com combustível é de cerca de R\$ 94.930,00, enquanto o valor máximo registrado supera R\$ 230.000,00.

Tabela 11 – Consumo e Custo de Combustível Anual- Cenário Atual

| | Consumo de Combustível | Custo do Combustível (R\$) |
|--------------|------------------------|----------------------------|
| count | 100.000 | 100.000 |
| mean | 16.089,82 | 94.929,96 |
| std | 7.791,67 | 45.970,84 |
| min | 8.004,49 | 47.226,47 |
| max | 40.020,22 | 236.119,28 |

Fonte: Elaborado pela autora

4.2.2 Contabilização das Emissões

Após calcular os possíveis valores para a quantidade de combustível consumida, é possível estimar as emissões de GEE associadas ao processo de coleta e transporte de RSU. A Tabela 12 apresenta um resumo das principais estatísticas das emissões de GEE geradas em um único dia. Observa-se que a emissão média de CO_2 é de aproximadamente 152 kg, enquanto a emissão média de CH_4 é cerca de 0,01 kg e a de N_2O é de aproximadamente 0,08 kg. Assim, a emissão total média de CO_2e por dia é de cerca de 154 kg. Além disso, a emissão média de CO_2 biogênico é de pouco mais de 23 kg por dia. Cabe destacar ainda que a emissão de CO_2e pode chegar a quase 415 kg diários.

Tabela 12 – Estimativas das Emissões Diárias de GEE (em kg) -
Cenário Atual

| | CO_2 | CO_2e | CO_2 Biogênico | CH_4 | N_2O |
|--------------|---------|---------|------------------|---------|---------|
| count | 100.000 | 100.000 | 100.000 | 100.000 | 100.000 |
| mean | 151,74 | 154,25 | 23,10 | 0,01 | 0,008 |
| std | 73,93 | 75,15 | 13,40 | 0,005 | 0,004 |
| min | 69,54 | 70,73 | 5,78 | 0,005 | 0,004 |
| max | 407,94 | 414,48 | 85,80 | 0,03 | 0,02 |

Fonte: Elaborado pela autora

O resumo dos resultados anuais é apresentado na Tabela 13. Percebe-se que a emissão média de CO_2 biogênico é de quase 5.500 kg por ano. Enquanto a geração média anual de CH_4 é de 2,66 kg, a de N_2O é de quase 2 kg e a de CO_2 é de pouco mais de 36.000 kg. Contribuindo assim para uma geração anual média de mais de 36.600 kg de CO_2e . Vale destacar ainda que podem ser gerados entre 16.700 e 96.800 kg de CO_2e por ano.

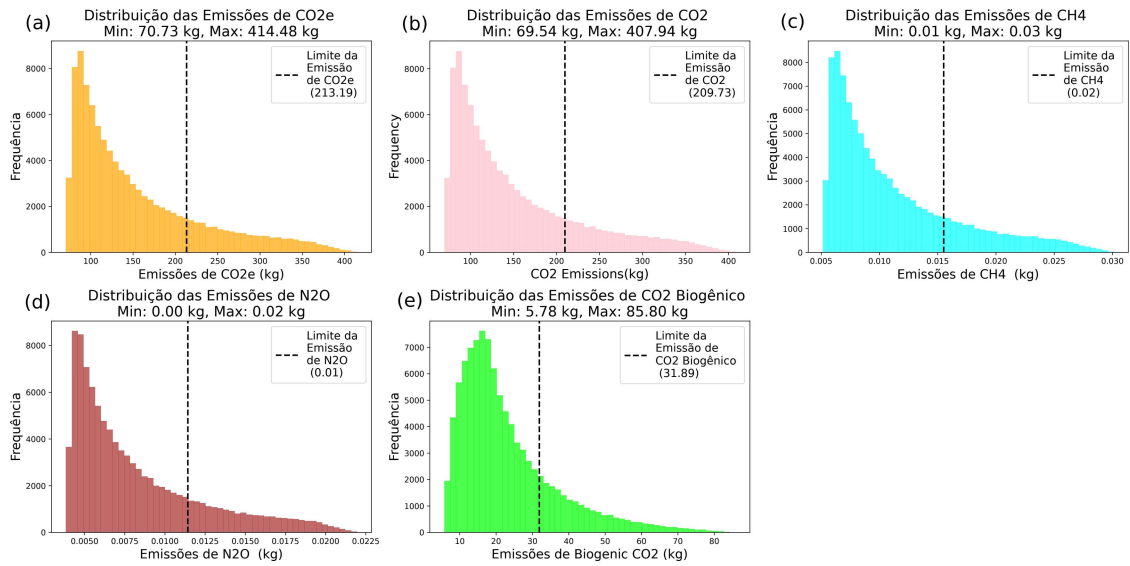
Tabela 13 – Estimativas das Emissões Anuais de GEE (em kg) -
Cenário Atual

| | CO_2 | CO_2e | CO_2 Biogênico | CH_4 | N_2O |
|--------------|-----------|-----------|------------------|---------|---------|
| count | 100.000 | 100.000 | 100.000 | 100.000 | 100.000 |
| mean | 36.012,68 | 36.607,07 | 5.481,31 | 2,66 | 1,96 |
| std | 17.546,14 | 17.834,39 | 3.179,36 | 1,30 | 0,95 |
| min | 16.504,70 | 16.786,33 | 1.371,07 | 1,22 | 0,91 |
| max | 96.815,25 | 98.366,02 | 20.362,28 | 7,15 | 5,21 |

Fonte: Elaborado pela autora

As estimativas das emissões também podem ser representadas graficamente. As Figuras 10 e 11 ilustram resultados obtidos para as emissões de CO_2 , CO_2e , CO_2 biogênico, CH_4 e N_2O para um único dia e para um ano, respectivamente. Cada gráfico inclui uma linha vertical que indica o limite máximo de emissão para cada GEE, com base no consumo de combustível necessário para percorrer a distância total diária. Esse valor limite é calculado considerando uma eficiência de 1,8 km/L e uma proporção fixa de 14% de biodiesel no diesel.

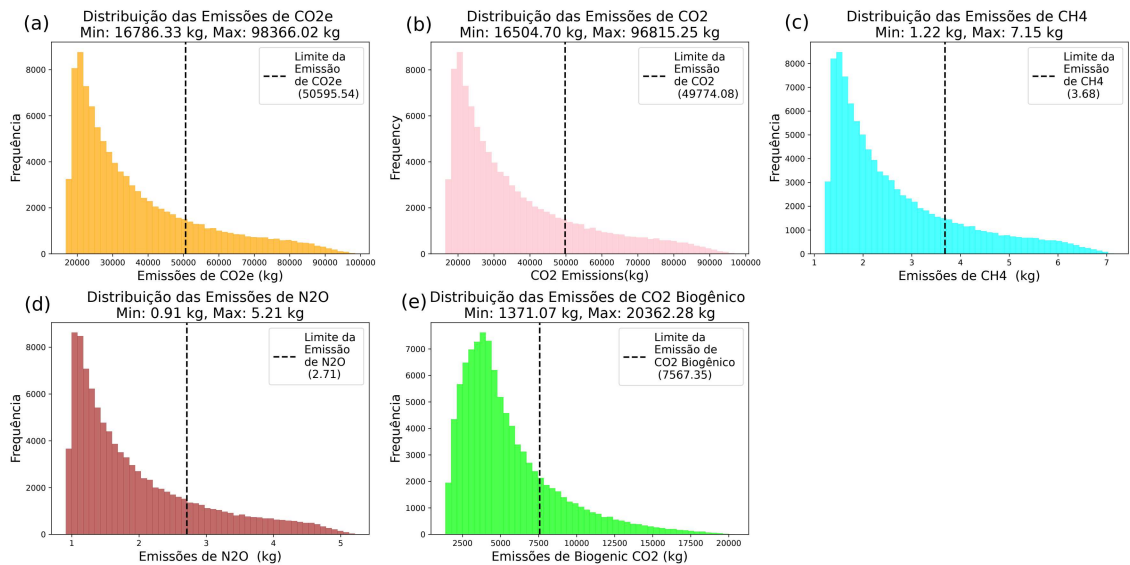
Figura 10 - Estimativa das Emissões de GEE Diárias - Cenário Atual



Fonte: Elaborado pela autora (2024)

Nota: Distribuição das emissões de: (a) CO₂e, (b) CO₂ e (c) CH₄, (d) N₂O e (e) CO₂ biogênico

Figura 11 - Estimativa das Emissões de GEE Anuais - Cenário Atual



Fonte: Elaborado pela autora (2024)

Nota: Distribuição das emissões de: (a) CO₂e, (b) CO₂ e (c) CH₄, (d) N₂O e (e) CO₂ biogênico

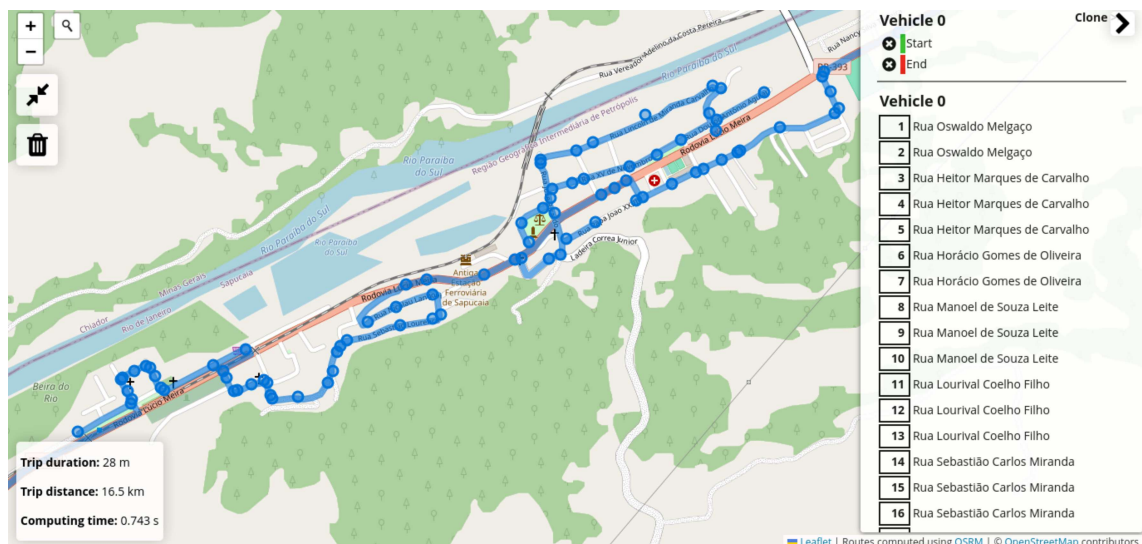
4.3 ROTAS OTIMIZADAS

Como mencionado na Seção **3.2.2**, a otimização das rotas foi realizada utilizando o *software Vroom*. De acordo com as configurações do programa, deve-se informar os pontos onde os veículos começam e terminam a rota. Como descrito anteriormente, os caminhões partem da garagem, realizam todo o processo de coleta, vão para o aterro fazer o descarte do material, e por fim retornam para a garagem. Entretanto, devido as configurações do programa, algumas alterações precisaram ser feitas para que os melhores resultados fossem obtidos.

Para realizar a otimização, o ponto de partida dos caminhões permaneceu na garagem onde os veículos são armazenados, enquanto o ponto final foi alterado para o aterro do município. Essa modificação foi necessária porque, em alguns casos, o caminhão estava visitando o aterro antes de completar todas as coletas, o que significaria que ele retornaria ao depósito ainda carregado, em vez de vazio. Assim, a distância do aterro até a garagem foi adicionada aos resultados posteriormente.

As Figuras 12, 13 e 14 mostram os resultados obtidas junto ao *Vroom* para os distritos de Sapucaia, Aparecida e Anta, respectivamente, sem considerar a viagem de volta do aterro até a garagem. Foram obtidas as distâncias de 16,5, 51,9 e 32 km para Sapucaia, Aparecida e Anta, respectivamente. A estes resultados, acrescenta-se então a distância da viagem entre o aterro e o depósito, que é de cerca de 12,19 km.

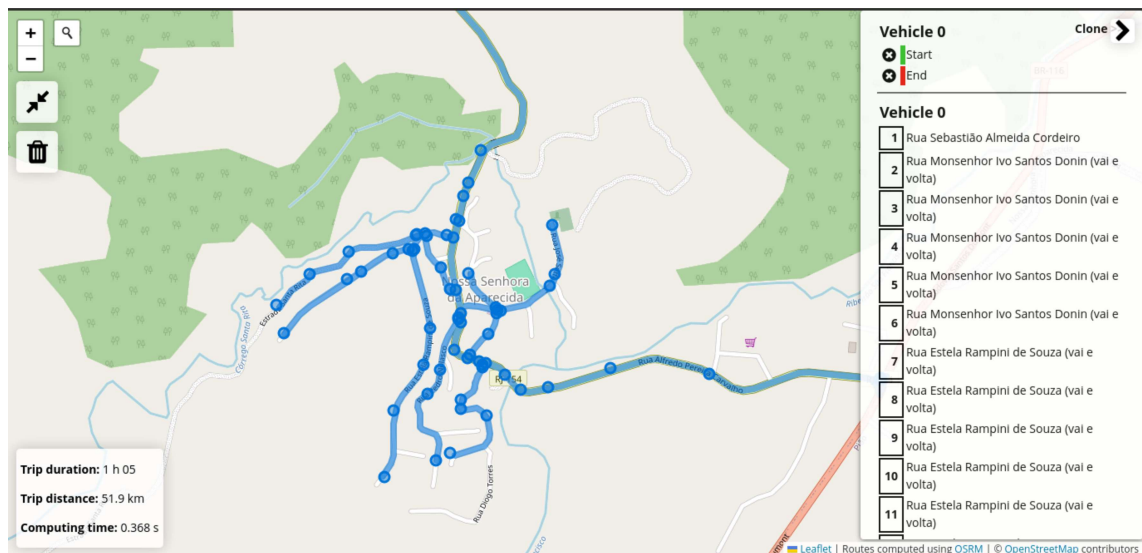
Figura 12 - Resultado *Vroom* para o Distrito de Sapucaia



Fonte: Elaborado pela autora (2024)

Figura 13 - Resultado *Vroom* para o Distrito de Anta

Fonte: Elaborado pela autora (2024)

Figura 14 - Resultado *Vroom* para o Distrito de Aparecida

Fonte: Elaborado pela autora (2024)

Assim, a Tabela 14 apresenta os resultados finais para a distância total percorrida após a otimização em cada distrito nos períodos de um dia, uma semana, um mês e um ano. Os cálculos de tais resultados foram realizados da mesma forma que ocorreu na Seção 4.2. Ou seja, nos distritos de Anta e Sapucaia a coleta ocorre 6 dias por semana, enquanto

em Aparecida ocorre apenas 3 dias. Os meses possuem uma média de 4,345 semanas e um ano tem 12 meses.

Tabela 14 – Distância Percorrida (km) em Cada Distrito

| Distrito | Período | | | |
|-----------|---------|---------|---------|-----------|
| | Diário | Semanal | Mensal | Anual |
| Sapucaia | 28,69 | 172,14 | 747,95 | 8.975,40 |
| Anta | 44,19 | 265,14 | 1152,03 | 13.824,36 |
| Aparecida | 64,09 | 192,27 | 835,41 | 10.024,96 |

Fonte: Elaborado pela autora

A Tabela 14 mostra que a distância total percorrida em Sapucaia é de 28,69 km, em Anta é 44,19 km e em Aparecida é 64,09 km. Isso corresponde a 172, 265 e 192 km viajados semanalmente em Sapucaia, Anta e Aparecida, respectivamente. As distâncias mensais são de quase 745 km em Sapucaia, 1.152 km em Anta e 835 km em Aparecida, resultando em 8.975, 13.824 e 10.025 km percorridos anualmente em Sapucaia, Anta e Aparecida, respectivamente.

A partir de então, pode-se calcular a distância total percorrida em todo o município, assim como feito na Seção 4.2. A Tabela 15 mostra a quilometragem total percorrida no município considerando a adoção das rotas otimizadas pelo *Vroom*.

Tabela 15 – Distância Total Percorrida no Município - Rotas Otimizadas

| Período | Veículos Utilizados | Distância Total Percorrida (km) |
|---------|---------------------|---------------------------------|
| Diário | 3 | 139,97 |
| Semanal | 3 | 629,55 |
| Mensal | 3 | 2.735,39 |
| Anual | 3 | 32.824,72 |

Fonte: Elaborado pela autora

Assim como foi feito no caso do cenário atual, serão apresentados os resultados diários e anuais apenas, como uma forma de evitar que o trabalho se torne redundante e cansativo.

4.3.1 Consumo e gastos com combustível

Após a otimização das rotas e a obtenção da nova distância percorrida, é possível calcular a quantidade de diesel necessária para o trajeto otimizado, bem como o custo correspondente para a aquisição do combustível. A Tabela 16 apresenta as principais estatísticas descritivas obtidas para o consumo do combustível e o valor total gasto em um dia.

Tabela 16 – Consumo e Custo de Combustível Diário - Rotas Otimizadas

| | Consumo de Combustível | Custo do Combustível (R\$) |
|--------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| count | 100.000 | 100.000 |
| mean | 55,06 | 324,88 |
| std | 26,67 | 157,33 |
| min | 27,39 | 161,62 |
| max | 136,96 | 808,08 |

Fonte: Elaborado pela autora

A partir da tabela, verifica-se que o consumo médio diário de diesel utilizando as rotas otimizadas é de 55 litros, o que representa um gasto médio de quase R\$325,00. O valor mínimo estimado é de aproximadamente R\$161,00, considerando um consumo mínimo de cerca de 28 litros de combustível. No entanto, o consumo de diesel pode alcançar até 137 litros por dia, resultando em um gasto máximo de mais de R\$800,00

As estatísticas anuais são mostradas na Tabela 17. Pode-se perceber que o consumo médio anual de diesel é de mais de 13.000 litros, o que representa um gasto médio anual encontrado é de quase de R\$ 78.000,00. A quantidade de combustível varia entre pouco mais de 6.500 e quase 33.000 litros. Isso significa que o total gasto para adquirir o diesel pode variar entre um pouco mais de R\$ 38.000,00 e quase R\$ 194.000,00.

Tabela 17 – Consumo e Gasto com Combustível Anual - Rotas Otimizadas

| | Consumo de Combustível | Gasto com Combustível (R\$) |
|--------------|-------------------------------|------------------------------------|
| count | 100.000 | 100.000 |
| mean | 13.196,21 | 77.857,64 |
| std | 6.390,40 | 37.703,39 |
| min | 6.564,95 | 38.733,20 |
| max | 32.822,93 | 193.655,28 |

Fonte: Elaborado pela autora

4.3.2 Contabilização das emissões de GEE

A Tabela 18 apresenta um resumo das principais estatísticas das emissões de GEE em um dia, considerando as rotas otimizadas. Observa-se que a emissão média de CO_2e é de aproximadamente 125 kg, enquanto a emissão de CO_2 biogênico é de cerca de 19 kg.

Tabela 18 – Estimativas das Emissões Diárias de GEE (em kg) -
Rotas Otimizadas

| | CO_2 | CO_2e | CO_2 Biogênico | CH_4 | N_2O |
|--------------|---------|---------|------------------|---------|---------|
| count | 100.000 | 100.000 | 100.000 | 100.000 | 100.000 |
| mean | 123,25 | 125,28 | 18,76 | 0,009 | 0,007 |
| std | 60,05 | 61,04 | 10,88 | 0,004 | 0,003 |
| min | 56,48 | 57,45 | 4,69 | 0,004 | 0,003 |
| max | 331,33 | 336,64 | 69,69 | 0,02 | 0,02 |

Fonte: Elaborado pela autora

A Tabela 19 mostra os resultados encontrados para as emissões anuais dos GEE. Verifica-se que nas rotas otimizadas a geração anual média de N_2O é de 1,61 kg, a de CH_4 é de 2,2 kg e a de CO_2 é de 29.536,12 kg, contribuindo assim, para a geração anual média de mais de 30.000 kg de CO_2e . Além disso, o CO_2 biogênico foi de quase 4.500 kg.

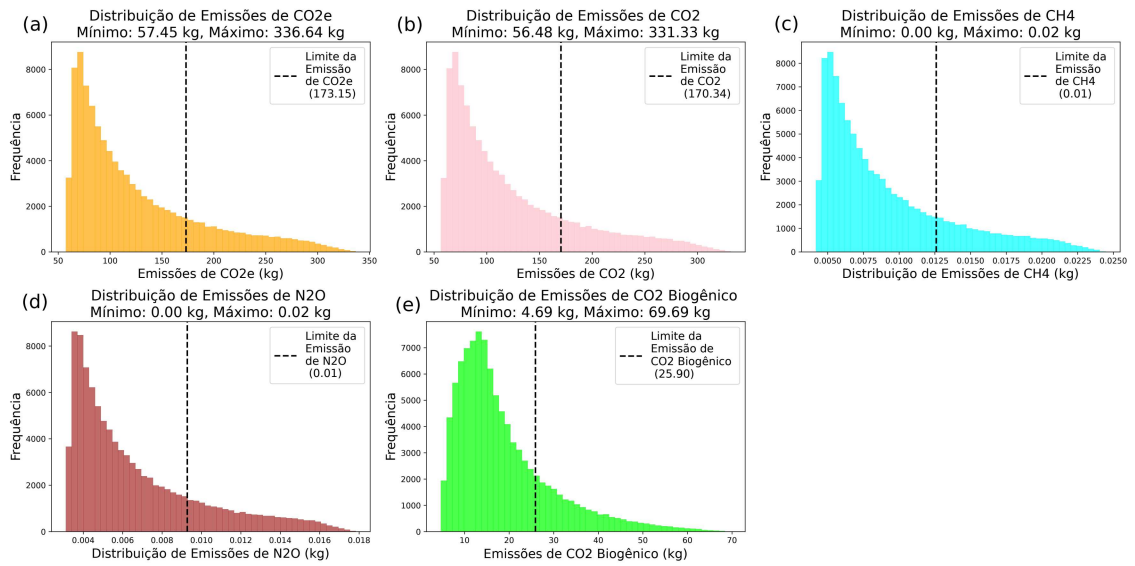
Tabela 19 – Estimativas das Emissões Anuais de GEE (em kg) -
Rotas Otimizadas

| | CO_2 | CO_2e | CO_2 Biogênico | CH_4 | N_2O |
|--------------|-----------|-----------|------------------|---------|---------|
| count | 100.000 | 100.000 | 100.000 | 100.000 | 100.000 |
| mean | 29.536,12 | 30.023,60 | 4.495,55 | 2,19 | 1,61 |
| std | 14.390,62 | 14.627,03 | 2.607,58 | 1,06 | 0,78 |
| min | 13.536,48 | 13.767,45 | 1.124,49 | 1,00 | 0,75 |
| max | 79.403,87 | 80.675,75 | 16.700,30 | 5,86 | 4,27 |

Fonte: Elaborado pela autora

Os resultados das emissões também podem ser representados graficamente. As Figuras 15 e 16 ilustram as emissões diárias e anuais de CO_2 , CO_2e , CO_2 biogênico, CH_4 e N_2O , respectivamente. Assim como no cenário atual, os gráficos incluem uma linha vertical que indica o limite máximo de emissão para cada GEE, baseado no consumo de combustível necessário para percorrer a distância total diária. É importante observar que esse valor limite é calculado considerando uma eficiência de 1,8 km/L e uma proporção fixa de 14% de biodiesel no diesel.

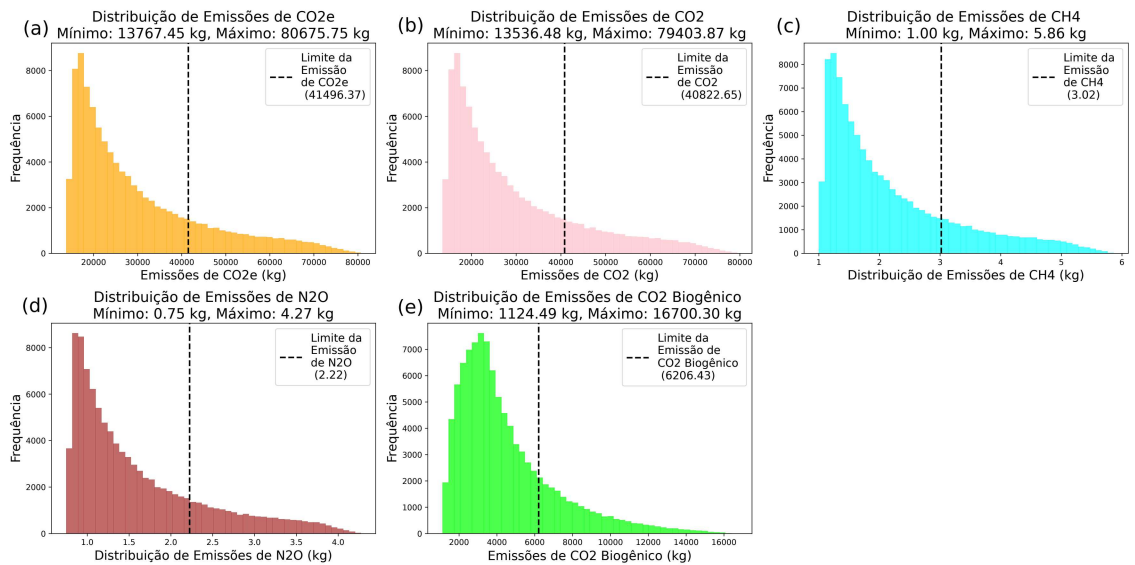
Figura 15 - Estimativa das Emissões de GEE Diárias - Rotas Otimizadas



Fonte: Elaborado pela autora (2024)

Nota: Distribuição das emissões de: (a) CO_2e , (b) CO_2 e (c) CH_4 , (d) N_2O e (e) CO_2 biogênico

Figura 16 - Estimativa das Emissões de GEE Anuais - Rotas Otimizadas



Fonte: Elaborado pela autora (2024)

Nota: Distribuição das emissões de: (a) CO_2e , (b) CO_2 e (c) CH_4 , (d) N_2O e (e) CO_2 biogênico

4.4 CENÁRIO ATUAL × ROTAS OTIMIZADAS

Anteriormente, foram apresentados os principais resultados obtidos ao se considerar tanto o cenário praticado atualmente quanto o cenário em que foi realizada a otimização das rotas. No cenário atual, são percorridos diariamente 34,65 km em Sapucaia, 52,75 km em Anta e 81,07 km em Aparecida, totalizando pouco mais de 168 km em todo o município. Isso se traduz em mais de 40.000 km percorridos anualmente. A otimização das rotas mostrou que essas distâncias podem ser reduzidas para 28,69 km em Sapucaia, 44,19 km em Anta e 64,09 km em Aparecida, resultando em cerca de 137 km por dia e aproximadamente 32.825 km por ano. Essa redução representa cerca de 17% em Sapucaia, 16% em Anta e 21% em Aparecida. Nesse sentido, a distância anual total percorrida para coletar e transportar os resíduos no município pode ser reduzida em aproximadamente 18%.

A redução na distância percorrida reduz a quantidade de combustível necessária para realizar a coleta e transporte dos resíduos. Isso significa que o total gasto ao adquirir combustível nas rotas otimizadas também será menor, podendo chegar a mais de R\$ 17.000 de economia no ano, considerando o gasto total médio. A utilização de menos combustível nas rotas otimizadas se traduz em emissões de GEE menores em comparação com o cenário praticado atualmente, resultando em aproximadamente 18% de redução nas emissões anuais de CO_2e e CO_2 biogênico.

Cada um dos gráficos apresentados nas Figuras 10, 11, 15 e 16 é cortado por uma linha vertical que representa o valor máximo de emissão que seria gerado para cada GEE se a eficiência do veículo e a proporção do biodiesel presente no diesel fossem fixas e não variáveis. Assim, cada gráfico pode ser dividido em duas partes: à esquerda do valor máximo, estão os cenários onde a combinação entre eficiência do veículo e a proporção de biodiesel gera emissões menores do que esse limite; à direita do limite, encontram-se os valores cujos cenários geram emissões maiores do que o valor ideal máximo.

De acordo com as auditorias realizadas pelo Tribunal de Contas de Minas Gerais, o consumo de combustível durante o processo de coleta e transporte de resíduos varia entre 1,8 e 4,5 km/L (57). Neste sentido, ao se adotar o valor de 1,8 km/L, pode-se encontrar o valor máximo para as emissões dos GEE analisados. Assim, os valores localizados à esquerda da linha do valor limite correspondem aos cenários onde as emissões geradas são menores do que a emissão máxima definida. Enquanto os resultados à direita representam os cenários que emitem mais GEE do que o máximo definido.

Nesse contexto, é fundamental analisar as características comuns dos cenários que geram emissões superiores ao valor máximo adotado. As Tabelas 20 e 21 apresentam o resumo estatístico da eficiência do veículo e da proporção de biodiesel no diesel nesses cenários, considerando as emissões de CO_2e e de CO_2 biogênico. De todos os 100.000 cenários simulados, a Tabela 20 mostra que 19.838 obtiveram emissões de CO_2e superiores

ao limite, enquanto a Tabela 21 mostra que foram encontrados 20.077 cenários que geraram emissões de CO_2 biogênico maiores. Sendo assim, é possível observar que, utilizando a Simulação de Monte Carlo, a probabilidade de que as emissões ultrapassem o limite estabelecido é de cerca de 20%.

Tabela 20 – Estatísticas da Eficiência do Veículo e da Proporção de Biodiesel no Diesel - Valores superiores ao limite - Emissões de CO_2e

| | Eficiência | Proporção de Biodiesel |
|--------------|-------------------|-------------------------------|
| count | 19.838 | 19.838 |
| mean | 1,41 | 0,14 |
| std | 0,24 | 0,04 |
| min | 1,00 | 0,07 |
| max | 1,94 | 0,21 |

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 21 – Estatísticas da Eficiência do Veículo e da Proporção de Biodiesel no Diesel - Valores superiores ao limite - Emissões de CO_2 Biogênico

| | Eficiência | Proporção de Biodiesel |
|--------------|-------------------|-------------------------------|
| count | 20.077 | 20.077 |
| mean | 1,57 | 0,17 |
| std | 0,40 | 0,03 |
| min | 1,00 | 0,08 |
| max | 2,70 | 0,21 |

Fonte: Elaborado pela autora

Em relação a Tabela 20, cabe destacar também que a eficiência máxima nestes cenários foi de 1,94 km/L. Isso significa que veículos cuja eficiência seja de menor do que 2 km/L devem ser evitados para realizar a coleta e o transporte de resíduos. No que se refere à proporção do biodiesel, observa-se que essa variável não teve grande influência na geração total de CO_2e nos quase 20.000 cenários considerados, uma vez que seu intervalo de variação esteve entre 7 e 21%, que foi o intervalo definido previamente.

Em relação ao CO_2 biogênico, a Tabela 21 mostra que a eficiência veicular máxima nos cenários onde as emissões são superiores ao limite é de 2,70 km/L, um valor maior do que no caso das emissões de CO_2e . Nota-se também que a quantidade de cenários em que as emissões biogênicas ultrapassam o limite definido é um pouco maior do que nas emissões de CO_2e . Isso pode ser explicado pelo fato de que esse tipo de emissão é gerado a partir da queima de biodiesel.

A Tabela 22 apresenta o resumo estatístico dos cenários em que as emissões de CO_2e ultrapassaram seus respectivos limites, considerando tanto as rotas atuais quanto as otimizadas, no período diário. No cenário atual, são gerados em média 282 kg de CO_2e por dia, com a emissão máxima podendo chegar a 414 kg. Já no cenário otimizado, o valor médio seria de 229 kg, com um máximo de 336 kg.

Tabela 22 – Estatísticas de Emissões de CO_2e - Valores Maiores que o Limite Definido - Cenário Atual e Otimizado - Diário

| | Cenário Atual | | Rotas Otimizadas | |
|--------------|------------------------|--------------|------------------------|--------------|
| | Consumo de Combustível | CO_2e (kg) | Consumo de Combustível | CO_2e (kg) |
| count | 19.838 | 19.838 | 19.838 | 19.838 |
| mean | 123,64 | 282,40 | 100,42 | 229,36 |
| std | 21,57 | 49,46 | 17,52 | 40,17 |
| min | 86,76 | 213,19 | 70,47 | 173,16 |
| max | 168,63 | 414,48 | 136,96 | 336,64 |

Fonte: Elaborado pela autora

A Tabela 23 mostra as estatísticas encontradas para os cenários onde as emissões de CO_2e anuais ultrapassaram o limite máximo calculado, considerando tanto as rotas atuais quanto as otimizadas. Se considerado o cenário atual, são gerados mais de 67.000 kg de CO_2e por ano, com a emissão máxima podendo chegar a mais de 98.000 kg. Por outro lado, no cenário otimizado o valor médio encontrado foi de quase 55.000 kg e o máximo seria de pouco mais de 80.600 kg.

Tabela 23 – Estatísticas de Emissões de CO_2e - Valores Maiores que o Limite Definido - Cenário Atual e Otimizado - Anual

| | Cenário Atual | | Rotas Otimizadas | |
|--------------|------------------------|--------------|------------------------|--------------|
| | Consumo de Combustível | CO_2e (kg) | Consumo de Combustível | CO_2e (kg) |
| count | 19.838 | 19.838 | 19.838 | 19.838 |
| mean | 29.342,70 | 67.019,62 | 24.065,67 | 54.966,72 |
| std | 5.120,03 | 11.738,29 | 4.199,24 | 9.627,26 |
| min | 20.590,24 | 50.596,12 | 16.887,26 | 41.496,85 |
| max | 40.020,22 | 98.366,02 | 32.822,93 | 80.675,75 |

Fonte: Elaborado pela autora

Na Tabela 24 são apresentadas as estatísticas encontradas para os cenários onde as emissões de CO_2 biogênicos foram maiores do que o limite máximo calculado, considerando as rotas atuais e as otimizadas em um dia. Ao analisar o cenário atual, percebe-se que a geração média de 45 kg de CO_2 biogênico, com a emissão máxima chegando a quase 86

kg. Por outro lado, no caso das rotas otimizadas, o valor médio encontrado foi de pouco mais de 36 kg, enquanto o máximo foi de quase 70 kg.

Tabela 24 – Estatísticas de Emissões de CO_2 Biogênico- Valores Maiores que o Limite Definido - Cenário Atual e Otimizado - Diário

| | Cenário Atual | | Rotas Otimizadas | |
|--------------|------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
| | Consumo de Combustível | CO_2 Biogênico (kg) | Consumo de Combustível | CO_2 Biogênico (kg) |
| count | 20.077 | 20.077 | 20.077 | 20.077 |
| mean | 114,33 | 45,12 | 92,86 | 36,65 |
| std | 28,03 | 11,25 | 22,76 | 9,14 |
| min | 62,50 | 31,89 | 50,76 | 25,90 |
| max | 168,63 | 85,80 | 136,96 | 69,69 |

Fonte: Elaborado pela autora

Por fim, a Tabela 25 apresentada as estatísticas anuais para os cenários onde as emissões de CO_2 biogênicos foram maiores do que o limite máximo calculado, considerando as rotas atuais e as otimizadas. No que se refere as rotas praticadas atualmente, percebe-se que a emissão média de CO_2 biogênico é de mais de 10.000 kg, e a emissão máxima sendo de mais de 20.000 kg. Já no caso das rotas otimizadas, o valor médio das emissões foi de quase 9.000 kg, já o valor máximo foi de 16.700 kg.

Tabela 25 – Estatísticas de Emissões de CO_2 Biogênico- Valores Maiores que o Limite Definido - Cenário Atual e Otimizado - Anual

| | Cenário Atual | | Rotas Otimizadas | |
|--------------|------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
| | Consumo de Combustível | CO_2 Biogênico (kg) | Consumo de Combustível | CO_2 Biogênico (kg) |
| count | 20.077 | 20.077 | 20.077 | 20.077 |
| mean | 27.133,79 | 10.707,75 | 22.254,02 | 8.782,05 |
| std | 6.651,53 | 2.670,28 | 5.455,31 | 2.190,05 |
| min | 14.831,93 | 7.567,47 | 12.164,53 | 6.206,53 |
| max | 40.020,22 | 20.362,28 | 32.822,93 | 16.700,30 |

Fonte: Elaborado pela autora

Embora este trabalho também tenha calculado as emissões de CO_2 , CH_4 e N_2O , a decisão foi de dar maior ênfase às emissões de CO_2e e CO_2 biogênico. Essa escolha se justifica pelo fato de que, conforme a metodologia adotada, tanto o CH_4 quanto o N_2O foram convertidos em CO_2e . Já o CO_2 biogênico foi destacado porque representa a parte do CO_2 emitido que não necessita de compensação posterior.

4.5 COMPENSAÇÃO DAS EMISSÕES

O cálculo da quantidade de árvores a serem plantadas foi realizado apenas considerando os resultados anuais, considerando tanto o cenário de coleta atual quanto o cenário das rotas otimizadas. Como mencionado na Seção 3.6, a capacidade do CH_4 e do N_2O podem ser equiparadas à capacidade que o CO_2 possui para executar tal função, obtendo assim a quantidade de CO_2e gerada em determinada atividade. Neste sentido, a quantidade total de árvores necessárias para compensar as emissões geradas pelo processo de queima de combustíveis foi calculada com base na quantidade de CO_2e emitida.

A Tabela 26 apresenta os resultados para ambos os cenários de coleta. No cenário atual, a quantidade de árvores varia entre 120 e 702 unidades por ano. Para as rotas otimizadas, o intervalo varia entre 98 e 576 unidades por ano.

Tabela 26 – Quantidade de Árvores Necessárias para Compensar as Emissões de CO_2e

| | Cenário Atual | | Rotas Otimizadas | |
|---------------|--|------------------------------|--|------------------------------|
| | Emissões de CO_2e (kg) | Quantidade de Árvores | Emissões de CO_2e (kg) | Quantidade de Árvores |
| Média | 36.607,07 | 261 | 30.023,60 | 214 |
| Mínimo | 16.786,33 | 120 | 13.767,45 | 98 |
| Máximo | 98.366,02 | 702 | 80.675,75 | 576 |

Fonte: Elaborado pela autora

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo desenvolver um modelo computacional para auxiliar no planejamento das rotas de coleta e transporte de resíduos, incluindo o cálculo dos custos financeiros e das emissões de GEE, considerando três dos cinco distritos do município de Sapucaia, localizado no interior do estado do Rio de Janeiro, no Brasil. Ao longo da pesquisa, foram definidos três objetivos específicos que serviram para orientar o desenvolvimento do modelo e a análise dos resultados.

O primeiro objetivo era calcular os custos associados ao processo de coleta e transporte de resíduos. Esses custos consideraram apenas o valor gasto com combustível. Para determiná-los, foi necessário calcular a distância percorrida e a quantidade de diesel utilizado durante o percurso. Para isso, foram utilizadas duas ferramentas de código aberto: o *OSRM*, para obter a distância percorrida atualmente e o *Vroom*, para otimizar a rota de coleta.

O segundo objetivo consistia em calcular as emissões de GEE geradas durante o processo de coleta e transporte dos RSU. Essa estimativa foi realizada após a obtenção a quantidade de diesel utilizada. Para atingir esse objetivo, foi adotada uma metodologia baseada no Programa Brasileiro *GHG Protocol*.

O terceiro objetivo foi estimar quantas árvores deveriam ser plantadas para neutralizar as emissões de GEE. Esse cálculo foi realizado após a obtenção da quantidade de CO_2e gerada, considerando tanto o cenário atual quanto o otimizado.

Os resultados encontrados mostraram que a otimização gera rotas com distâncias menores para os três distritos analisados, fazendo com que a distância total percorrida no município seja aproximadamente 18% menor do que as rotas praticadas atualmente. A distância menor provoca reduções no consumo de combustível, que faz com que o gasto total com diesel seja menor, chegando a uma economia anual média de mais de R\$ 17.000.

A redução na quantidade de diesel consumida também impacta as emissões de GEE geradas ao longo do processo. Foi possível verificar que as emissões de CO_2e e de CO_2 biogênicos são cerca de 18% menores nas rotas otimizadas, quando comparado com as rotas praticadas atualmente. Além disso, o estudo também mostrou que seria necessário plantar cerca de 214 unidades de árvores por ano, para compensar as emissões médias anuais geradas.

Diante do exposto, pode-se concluir que todos os objetivos propostos foram alcançados. A adoção do planejamento de rotas demonstrou ser um instrumento eficaz para reduzir tanto os custos quanto as emissões de CO_2 . No entanto, é importante destacar que este trabalho se limitou a considerar apenas os gastos com combustível, deixando de incluir outros aspectos econômicos relevantes, como despesas com pneus, lubrificantes, depreciação dos veículos, salários, equipamentos de segurança, entre outros.

Assim, pesquisas futuras ainda podem ser realizadas ao incluir uma análise mais detalhada a respeito dos custos envolvidos no processo, que considere outros componentes dos custos operacionais além do gasto com combustível. Do lado ambiental, pode-se analisar a possibilidade de utilização de combustíveis de origem renovável, em substituição ao óleo diesel considerado neste estudo, como uma forma de tentar amenizar os impactos ambientais causados no processo. Ou ainda, pode-se realizar uma análise sobre a possibilidade de se adotar uma frota de veículos elétricos em substituição aos veículos movidos a diesel. Outra possibilidade de estudo seria fazer uma variação na quantidade de distritos atendidos por um único veículo.

REFERÊNCIAS

- 1 VOUKKALI, I. et al. Urbanization and solid waste production: Prospects and challenges. *Environmental Science and Pollution Research*, Springer, v. 31, n. 12, p. 17678–17689, 2024.
- 2 OLUWAGBAYIDE, S. D. et al. The relationship between waste management practices and human health: New perspective and consequences. *Indonesian Journal of Innovation and Applied Sciences (IJIAS)*, v. 4, n. 1, p. 19–34, 2024.
- 3 Brasil. *Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010*. 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>.
- 4 HANNAN, M. et al. Waste collection route optimisation model for linking cost saving and emission reduction to achieve sustainable development goals. *Sustainable Cities and Society*, Elsevier, v. 62, p. 102393, 2020.
- 5 AKHTAR, M. et al. Backtracking search algorithm in cvrp models for efficient solid waste collection and route optimization. *Waste Management*, Elsevier, v. 61, p. 117–128, 2017.
- 6 ABDALLAH, M. et al. Simulation and optimization of dynamic waste collection routes. *Waste Management & Research*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 37, n. 8, p. 793–802, 2019.
- 7 HEMIDAT, S. et al. Evaluation of key indicators of waste collection using gis techniques as a planning and control tool for route optimization. *Waste and biomass valorization*, Springer, v. 8, p. 1533–1554, 2017.
- 8 LIU, L.; LIAO, W. Optimization and profit distribution in a two-echelon collaborative waste collection routing problem from economic and environmental perspective. *Waste Management*, Elsevier, v. 120, p. 400–414, 2021.
- 9 CAO, S.; LIAO, W.; HUANG, Y. Heterogeneous fleet recyclables collection routing optimization in a two-echelon collaborative reverse logistics network from circular economic and environmental perspective. *Science of the Total Environment*, Elsevier, v. 758, p. 144062, 2021.
- 10 BOWAN, P. A. Solid waste management contribution to the attainment of the sustainable development goals. *Journal of Sustainable Development Studies*, v. 16, 2023.
- 11 Organização das Nações Unidas. *Transformando nosso mundo: a agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável*. [s.n.], 2016. 59 p. Disponível em: <http://www.mds.gov.br/webarquivos/publicacao/Brasil_Amigo_Pesso_Idosa/Agenda2030.pdf>.
- 12 ROMA, J. C. Os objetivos de desenvolvimento do milênio e sua transição para os objetivos de desenvolvimento sustentável. *Ciência e cultura*, Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência, v. 71, n. 1, p. 33–39, 2019.
- 13 FARIAS, E. A. de O. et al. Objetivos de desenvolvimento sustentável e o plano de gestão integrada de resíduos sólidos da cidade do rio de janeiro. *Sustentabilidade: Diálogos Interdisciplinares*, v. 3, p. 1–20, 2022.

- 14 GALVÃO, M. C. B.; RICARTE, I. L. M. Revisão sistemática da literatura: conceituação, produção e publicação. *Logeion: Filosofia da informação*, v. 6, n. 1, p. 57–73, 2019.
- 15 KHAN, D.; SAMADDER, S. Allocation of solid waste collection bins and route optimisation using geographical information system: A case study of dhanbad city, india. *Waste Management & Research*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 34, n. 7, p. 666–676, 2016.
- 16 GILARDINO, A. et al. Combining operational research and life cycle assessment to optimize municipal solid waste collection in a district in lima (peru). *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, v. 156, p. 589–603, 2017.
- 17 RIZVANOĞLU, O. et al. Optimization of municipal solid waste collection and transportation routes, through linear programming and geographic information system: a case study from şanlıurfa, turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, Springer, v. 192, p. 1–12, 2020.
- 18 SULEMANA, A. et al. Optimized routing of trucks for institutional solid waste collection in kumasi, ghana. *Detritus (9)*, v. 50, 2020.
- 19 SANTOS, A. G. *Uma meta-heurística adaptativa aplicada ao problema de roteamento de veículos capacitados: estudo de caso de uma transportadora de pacotes*. Universidade Federal de São Paulo-Instituto de Ciência e Tecnologia, 2022. Disponível em: <<https://hdl.handle.net/11600/63539>>.
- 20 KRAMER, R. H. F. R.; SUBRAMANIAN, A.; PENNA, P. H. V. Problema de roteamento de veículos assimétrico com frota heterogênea limitada: um estudo de caso em uma indústria de bebidas. *Gestão e Produção*, 2016.
- 21 REINA, C. D. *Roteirização de veículos com janelas de tempo utilizando algoritmo genético*. Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.11606/D.3.2012.tde-06062013-162636>>.
- 22 ALARCON-GERBIER, E.; LINSS, F.; BUSCHER, U. Waste recycling through a decentralized network of mobile facilities. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, v. 415, p. 137773, 2023.
- 23 ALIAHMADI, S. Z.; BARZINPOUR, F.; PISHVAEE, M. S. A fuzzy optimization approach to the capacitated node-routing problem for municipal solid waste collection with multiple tours: A case study. *Waste Management & Research*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 38, n. 3, p. 279–290, 2020.
- 24 KALA, K.; SODHI, M. S. Note: Demonstrating analytics in a low-tech context—truck-routing for solid-waste collection in an indian metropolis. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Elsevier, v. 176, p. 103219, 2023.
- 25 MAHDAVI, L.; MANSOUR, S.; SAJADIEH, M. S. Sustainable multi-trip periodic redesign-routing model for municipal solid waste collection network: the case study of tehran. *Environmental Science and Pollution Research*, Springer, v. 29, n. 24, p. 35944–35963, 2022.

- 26 MES, M.; SCHUTTEN, M.; RIVERA, A. P. Inventory routing for dynamic waste collection. *Waste management*, Elsevier, v. 34, n. 9, p. 1564–1576, 2014.
- 27 ZAEIMI, M. B.; RASSAFI, A. A. Optimization model for integrated municipal solid waste system using stochastic chance-constraint programming under uncertainty: A case study in qazvin, iran. *Journal of Advanced Transportation*, Hindawi Limited, v. 2021, p. 1–16, 2021.
- 28 ABDELLI, I. et al. Gis-based approach for optimised collection of household waste in mostaganem city (western algeria). *Waste Management & Research*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 34, n. 5, p. 417–426, 2016.
- 29 JAMMELI, H.; ARGOUBI, M.; MASRI, H. A bi-objective stochastic programming model for the household waste collection and transportation problem: case of the city of sousse. *Operational Research*, Springer, v. 21, n. 3, p. 1613–1639, 2021.
- 30 ARMINGTON, W. R.; CHEN, R. B. Household food waste collection: Building service networks through neighborhood expansion. *Waste management*, Elsevier, v. 77, p. 304–311, 2018.
- 31 FUJII, M. et al. Regional and temporal simulation of a smart recycling system for municipal organic solid wastes. *Journal of cleaner production*, Elsevier, v. 78, p. 208–215, 2014.
- 32 LAVIGNE, C.; BELIËN, J.; DEWIL, R. An exact routing optimization model for bio-waste collection in the brussels capital region. *Expert Systems with Applications*, Elsevier, v. 183, p. 115392, 2021.
- 33 RABBANI, M.; SADATI, S. A.; FARROKHI-ASL, H. Incorporating location routing model and decision making techniques in industrial waste management: Application in the automotive industry. *Computers & Industrial Engineering*, Elsevier, v. 148, p. 106692, 2020.
- 34 CHARI, N.; VENKATADRI, U.; DIALLO, C. Design of a reverse logistics network for recyclable collection in nova scotia using compaction trailers. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, Taylor & Francis, v. 54, n. 1, p. 1–18, 2016.
- 35 FRANCA, L. S.; RIBEIRO, G. M.; CHAVES, G. d. L. D. The planning of selective collection in a real-life vehicle routing problem: A case in rio de janeiro. *Sustainable Cities and Society*, Elsevier, v. 47, p. 101488, 2019.
- 36 ZSIGRAIOVA, Z.; SEMIAO, V.; BEIJOCO, F. Operation costs and pollutant emissions reduction by definition of new collection scheduling and optimization of msw collection routes using gis. the case study of barreiro, portugal. *Waste management*, Elsevier, v. 33, n. 4, p. 793–806, 2013.
- 37 MARAMPOUTIS, I.; VINOT, M.; TRILLING, L. Multi-objective vehicle routing problem with flexible scheduling for the collection of refillable glass bottles: A case study. *EURO journal on decision processes*, Elsevier, v. 10, p. 100011, 2022.
- 38 NOWAKOWSKI, P.; MRÓWCZYŃSKA, B. Towards sustainable weee collection and transportation methods in circular economy-comparative study for rural and urban settlements. *Resources, Conservation and Recycling*, Elsevier, v. 135, p. 93–107, 2018.

- 39 NOWAKOWSKI, P.; SZWARC, K.; BORYCZKA, U. Vehicle route planning in e-waste mobile collection on demand supported by artificial intelligence algorithms. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Elsevier, v. 63, p. 1–22, 2018.
- 40 RODRÍGUEZ, J. S.; ORJUELA, A.; CADAVID, J. G. Characterization and optimization of a used cooking oils collection chain—study case bogotá, colombia. *Chemical Engineering Research and Design*, Elsevier, v. 184, p. 59–71, 2022.
- 41 GUARIEIRO, L. L.; VASCONCELLOS, P. C.; SOLCI, M. C. Poluentes atmosféricos provenientes da queima de combustíveis fósseis e biocombustíveis: uma breve revisão. *Revista Virtual de Química*, 2011.
- 42 Tribunal de Contas do Estado do Rio de Janeiro. *Estudos Socioeconômicos dos Municípios do Estado do Rio de Janeiro*. 2018.
- 43 Prefeitura Municipal de Sapucaia. *Prefeitura Municipal de Sapucaia*. 2024. <<https://sapucaia.rj.gov.br/a-cidade>>.
- 44 LUXEN, D. [osm-dev] announcing the immediate availability of the open source routing machine. *OSM-dev] Announcing the immediate availability of the Open Source Routing Machine*, 2010.
- 45 LUXEN, D.; VETTER, C. Real-time routing with openstreetmap data. In: *Proceedings of the 19th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems*. New York, NY, USA: ACM, 2011. (GIS '11), p. 513–516. ISBN 978-1-4503-1031-4. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/2093973.2094062>>.
- 46 COUPEY, J.; NICOD, J.-M.; VARNIER, C. *VROOM v1.14, Vehicle Routing Open-source Optimization Machine*. Besançon, France, 2024. <<http://vroom-project.org/>>.
- 47 Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. *Painel Dinâmico - Preços de Revenda e Distribuição de Combustíveis*. 2024. <<https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/paineis-dinamicos-da-anp/painel-dinamico-de-precos-de-combustiveis-e-derivados-do-petroleo>>.
- 48 CAMARGO, R. F. d. *Simulação de Monte Carlo: o que é, seus benefícios e como o método funciona*. Treasy, 2024. Disponível em: <<https://www.treasy.com.br/blog/simulacao-de-montecarlo/>>.
- 49 CARREGOSA, L. *Mistura de biodiesel no diesel dos postos sobe nesta sexta-feira para maior patamar já praticado no Brasil*. 2024. Disponível em: <<https://g1.globo.com/carros/noticia/2024/03/01/mistura-de-biodiesel-no-diesel-dos-postos-sobe-nesta-sexta-feira-para-maior-patamar-ja-praticado-no-brasil.ghtml>>.
- 50 MONZONI, M. *Contabilização, quantificação e publicação de inventários corporativos de emissões de gases de efeito estufa*. [S.l.], 2008. Disponível em: <<https://hdl.handle.net/10438/15413>>.
- 51 WRI Brasil. *GHG Protocol - O padrão global para que empresas e organizações mensurem e gerenciem emissões de gases de efeito estufa*. 2015. Disponível em: <<https://www.wribrasil.org.br/projetos/ghg-protocol>>.

- 52 PAVÃO, E. de M. et al. Quantificação das emissões de gee no setor agropecuário. *AgroANALYSIS*, v. 43, n. 11, p. 30–37, 2023.
- 53 Centro de Estudos em Sustentabilidade - FGVces. *Nota técnica: valores de referência para o potencial de aquecimento global (GWP) dos gases de efeito estufa: versão 2.0*. [S.l.], 2022. Disponível em: <<https://hdl.handle.net/10438/31764>>.
- 54 PITTARELLO, R.; SOARES, W. G. T. O sequestro de carbono e o empreendedorismo social. *Revista de Empreendedorismo e Gestão de Micro e Pequenas Empresas*, v. 3, n. 01, p. 167–186, 2018.
- 55 Centro de Estudos em Sustentabilidade - FGVces. *Nota técnica: definição das categorias emissões de gases de efeito estufa (GEE) de Escopo 1: versão 4.0*. [S.l.], 2018. Disponível em: <<https://hdl.handle.net/10438/30244>>.
- 56 BACHINI, M. S. *Compensação ambiental das emissões de gases de efeito estufa em máquinas e implementos agrícolas do Jardim Botânico do Rio de Janeiro*. Universidade Federal Fluminense, 2020. Disponível em: <<https://app.uff.br/riuff/handle/1/14695>>.
- 57 FONSECA, A. M.; GONZAGA, V. C.; COELHO, A. B. P. Metodologia para auditoria de serviços de limpeza urbana, com enfoque nos custos de coleta de resíduos sólidos urbanos. In: Instituto Brasileiro de Auditoria de Obras Públicas - IBRAOP. (Ed.). *15 Anos de Auditoria em Resíduos Sólidos Urbanos*. [S.l.]: arlini & Caniato Editorial, 2021. p. 138–157. ISBN 978-65-88600-88-7.

APÊNDICE A – Aplicação da API do OSRM

Este apêndice complementa a seção **3.2.1**, onde foi descrito o uso da API do *Open Source Routing Machine (OSRM)* para gerar as rotas atualmente percorridas no processo de coleta e transporte de resíduos.

1. Bibliotecas Utilizadas

O processo descrito neste trabalho foi realizado por meio de requisições feitas utilizando *Python*. Além disso, algumas bibliotecas foram utilizadas para facilitar a interação com a API e o processamento dos dados. A seguir, serão listadas as bibliotecas utilizadas e as funções em que foram utilizadas.

a) *Pandas*

A biblioteca *Pandas* permite manipular e analisar dados. Neste trabalho, ela foi utilizada para manipular as coordenadas das ruas que foram coletadas. As informações sobre o uso da ferramenta podem ser obtidas na sua documentação, disponível em: <https://pandas.pydata.org/>.

b) *Requests*

A biblioteca *Requests* permite trabalhar com requisições HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*). Neste trabalho, ela foi utilizada para enviar requisições HTTP para a API do *OSRM*. A partir dela, é possível acessar os pontos de entrada e saída das rotas e receber as informações em formato *JSON*. Para mais informações, consulte a documentação da biblioteca, disponível em: <https://requests.readthedocs.io/en/latest/>.

c) *Folium*

Folium é uma biblioteca que permite gerar mapas interativos em *Python*, de maneira rápida e fácil. Neste trabalho, este pacote foi utilizado para auxiliar na visualização das rotas obtidas com a API do *OSRM*. Para mais informações sobre o uso da biblioteca visite: <https://python-visualization.github.io/folium/latest/>

2. Fazendo Requisições à API

Para realizar uma requisição à API, é necessário fornecer algumas informações como: o tipo de transporte (carro, bicicleta, a pé); as coordenadas de origem e destino; e outros parâmetros específicos. A requisição retorna uma resposta no formato *JSON*, que pode ser manipulada e analisada conforme necessário.

a) Construção *url* da requisição:

A url é estruturada com base no tipo de serviço solicitado (rotas ou distância, por exemplo), o tipo de transporte e as coordenadas geográficas dos pontos de interesse.

A url básica para requisição deve conter:

- *service*
É o tipo de serviço a ser solicitado. Pode ser um dos seguintes valores: *route*, *nearest*, *table*, *match*, *trip* ou *tile*.
- *version*
Corresponde à versão do protocolo implementada pelo serviço.
- *profile*
Refere-se ao tipo de transporte ou de movimento, que pode ser *driving*, *cycling* ou *walking*.
- *coordinates*
Correspondem às coordenadas geográficas, no formato (longitude, latitude) dos pontos de origem e destino, ou ainda de uma sequência de pontos.
- *format*
É um parâmetro opcional usado para especificar o formato da resposta desejada. Por padrão, a resposta é apresentada no formato JSON.
- *?option=value&option=value*
São parâmetros de configuração adicionais opcionais. Por exemplo: *overview=false* desativa a função de visualizar o mapa da rota; e, *steps=true* inclui as instruções detalhadas da rota.

Exemplo de uma requisição padrão da API do OSRM:

```
http://router.project-osrm.org/{service}/{version}/{profile}/
{coordinates}[.{format}]?option=value&option=value
```

b) Resposta

Toda requisição retorna uma resposta no formato *JSON* (ou em outro formato solicitado), que contém as informações referentes à rota solicitada, como tempo de viagem e e distância percorrida.

3. Exemplo de Requisição

O exemplo apresentado tem o objetivo de ilustrar o formato de uma requisição e de uma resposta retornada pela API. O exemplo mostra uma rota entre o Parque Halfeld, localizado no centro da cidade de Juiz de Fora, e a Praça Jarbas Santos, localizada no bairro São Mateus, também em Juiz de Fora. O tipo de transporte considerado foi o carro, que corresponde a opção *driving*. Desta forma, foi formulada a seguinte url de requisição:

`http://router.project-osrm.org/route/v1/
driving/-43.35061451233865,-21.761039208778968;-43.35175,
-21.771686?geometries=geojsonoverview=full`

Com o auxílio do Python, foi possível obter a seguinte resposta:

```
{  
  "code": "Ok",  
  "routes": [  
    {  
      "geometry": {  
        "coordinates": [  
          [  
            -43.350712,  
            -21.760668  
          ],  
          [  
            -43.350541,  
            -21.760629  
          ],  
          [  
            -43.350509,  
            -21.760646  
          ],  
          [  
            -43.350472,  
            -21.760654  
          ],  
          [  
            -43.350439,  
            -21.760656  
          ],  
          [  
            -43.35041,  
            -21.760653  
          ],  
          [  
            -43.350333,  
            -21.760636  
          ],  
          [  
            -43.350094,  
            -21.760589  
          ]  
        ]  
      }  
    }  
  ]  
}
```

```
],  
[  
    -43.350065,  
    -21.760587  
],  
[  
    -43.350046,  
    -21.760593  
],  
[  
    -43.350031,  
    -21.760602  
],  
[  
    -43.349981,  
    -21.76065  
],  
[  
    -43.349875,  
    -21.760718  
],  
[  
    -43.349701,  
    -21.761398  
],  
[  
    -43.349323,  
    -21.762881  
],  
[  
    -43.349212,  
    -21.763304  
],  
[  
    -43.3492,  
    -21.763351  
],  
[  
    -43.349098,  
    -21.763741  
],  
[
```

```
-43.348988 ,  
-21.764193  
],  
[  
-43.348954 ,  
-21.764322  
],  
[  
-43.348822 ,  
-21.764836  
],  
[  
-43.348789 ,  
-21.764961  
],  
[  
-43.348607 ,  
-21.765755  
],  
[  
-43.348486 ,  
-21.766253  
],  
[  
-43.34846 ,  
-21.766341  
],  
[  
-43.348431 ,  
-21.766457  
],  
[  
-43.348096 ,  
-21.767655  
],  
[  
-43.348028 ,  
-21.767926  
],  
[  
-43.34801 ,  
-21.767997
```



```
],  
[  
    -43.347826,  
    -21.768671  
],  
[  
    -43.347895,  
    -21.768686  
],  
[  
    -43.349978,  
    -21.769157  
],  
[  
    -43.350064,  
    -21.769785  
],  
[  
    -43.350245,  
    -21.770619  
],  
[  
    -43.350253,  
    -21.770706  
],  
[  
    -43.350269,  
    -21.770707  
],  
[  
    -43.350283,  
    -21.770713  
],  
[  
    -43.350296,  
    -21.770722  
],  
[  
    -43.350305,  
    -21.770734  
],  
[
```

```
-43.350308 ,  
-21.770743  
],  
[  
-43.350309 ,  
-21.770752  
],  
[  
-43.350308 ,  
-21.770766  
],  
[  
-43.350302 ,  
-21.77078  
],  
[  
-43.350292 ,  
-21.770792  
],  
[  
-43.350279 ,  
-21.7708  
],  
[  
-43.350264 ,  
-21.770804  
],  
[  
-43.350884 ,  
-21.771617  
],  
[  
-43.350939 ,  
-21.771688  
],  
[  
-43.351446 ,  
-21.772345  
],  
[  
-43.352423 ,  
-21.772307
```

```
    ],
    [
      -43.352425,
      -21.772008
    ],
    [
      -43.352393,
      -21.771845
    ],
    [
      -43.352382,
      -21.771746
    ],
    [
      -43.352411,
      -21.771539
    ],
    [
      -43.352292,
      -21.771467
    ],
    [
      -43.352161,
      -21.771369
    ],
    [
      -43.352115,
      -21.771329
    ]
  ],
  "type": "LineString"
},
"legs": [
  {
    "steps": [],
    "summary": "",
    "weight": 178.4,
    "duration": 160.4,
    "distance": 1854.2
  }
],
"weight_name": "routability",
```

```

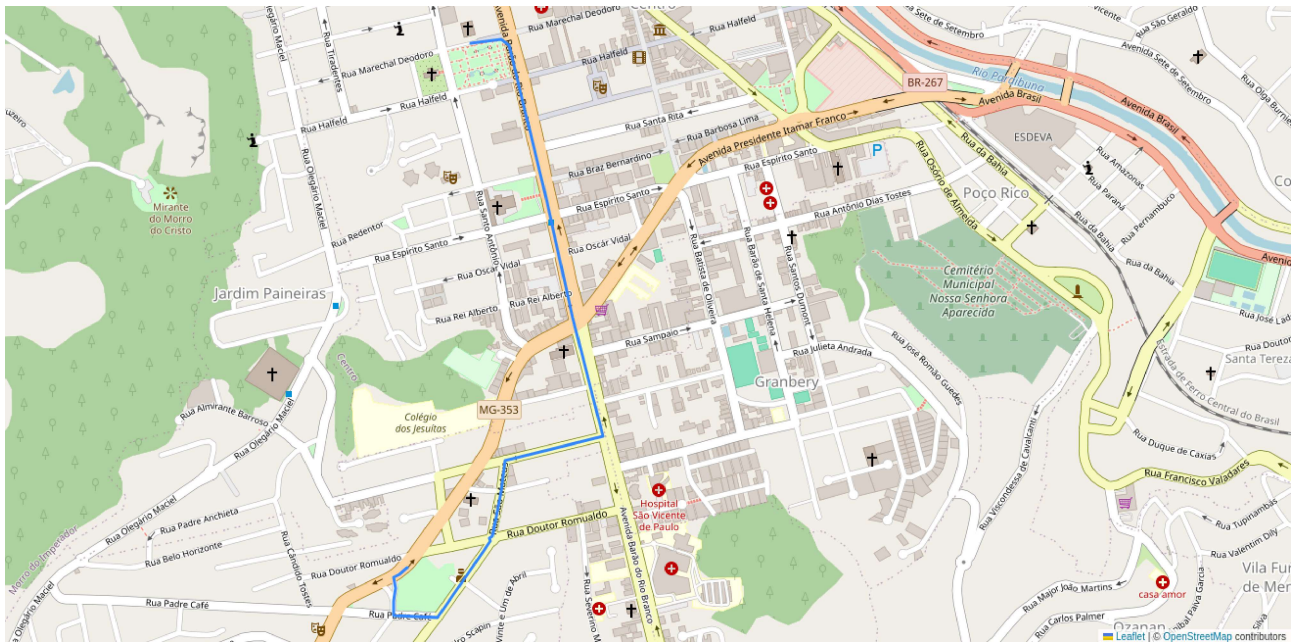
    "weight": 178.4,
    "duration": 160.4,
    "distance": 1854.2
  }
],
"waypoints": [
  {
    "hint": "zKsahJf0k4srAAAAigAAAAAAAAAXAAAA
            HKSRQRxVZUIAAAAWQAcQSsAAACKAAAAA
            AAAABcAAACReQAASIVq_WT1s_6phWr98f
            Oz_gAADxDckZJL",
    "distance": 42.287052702,
    "name": "Rua Marechal Deodoro",
    "location": [
      -43.350712,
      -21.760668
    ]
  },
  {
    "hint": "FVZDg____38EAAAADAAAABgAAAAYAAAA
            gADQKKJVEkHuFgBC010AQgQAAAAMAAAA
            GAAAABgAAACReQAAzX9q_b_Ls_46gWr9
            Wsqz_gIA7wLckZJL",
    "distance": 54.659333175,
    "name": "Avenida Presidente Itamar Franco",
    "location": [
      -43.352115,
      -21.771329
    ]
  }
]
}

```

A resposta acima mostra que a distância percorrida entre o Parque Halfeld e a Praça Jarbas Santos é de 1.854,2 metros (que corresponde a cerca de 1,8 km). Enquanto o tempo necessário foi de 160,4 segundos (que corresponde a aproximadamente 2 minutos e 40 segundos).

A Figura 17 mostra o desenho da rota resultante da requisição. Tal imagem foi obtida através da utilização também da biblioteca *Folium*.

Figura 17 - Ilustração da Rota Gerada



Fonte: Elaborado pela autora (2024)

É importante ressaltar que este apêndice teve como objetivo demonstrar como é possível realizar requisições simples utilizando a API do OSRM. Não faz parte do objetivo demonstrar todos os tipos de requisições possíveis. Sendo assim, caso o leitor necessite de mais informações, deve consultar a documentação oficial da própria API, disponível em: <http://project-osrm.org/docs/v5.24.0/api/>.

APÊNDICE B – Utilizando o Software *Vroom*

Neste apêndice, serão apresentados dois exemplos práticos de como utilizar o software *Vroom* para resolver um problema de roteamento de veículos (VRP). Ambos os exemplos consideram os mesmos pontos e os mesmos locais para início e final da rota. A diferença entre eles reside na variação da quantidade de veículos utilizados para gerar cada exemplo.

O primeiro passo para otimizar rotas através do *Vroom* é definir os pontos de atendimento, incluindo os pontos de início e final da rota. Os exemplos aqui apresentados buscam gerar uma rota otimizada que começa e termina na Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), enquanto visita alguns locais espalhados pela cidade. Assim, temos os seguintes pontos:

- UFJF (Início);
- Parque da Lajinha;
- Praça São Mateus;
- Parque Halfeld;
- Shopping Jardim Norte;
- Mirante do Morro do Cristo;
- UFJF (Final).

O programa pode ser utilizado de duas formas principais: via linha de comando ou por meio da *interface web*. Embora ambas as abordagens utilizem arquivos *JSON* para definir as configurações do problema, existem diferenças significativas na saída e nas funcionalidades oferecidas. Na *interface web*, o usuário pode visualizar as rotas geradas diretamente em um mapa interativo, o que facilita a análise visual das soluções. No entanto, a saída não é fornecida em formato *JSON*, mas a visualização no mapa é o principal recurso. Já na linha de comando, o *Vroom* gera um arquivo *JSON* com todos os dados detalhados sobre as rotas, como custos, distâncias e tempos. Os exemplos a seguir consideram apenas a obtenção dos resultados através da interface web, uma vez que esta foi a opção utilizada para a execução deste trabalho.

- Considerando a Utilização de 1 Veículo

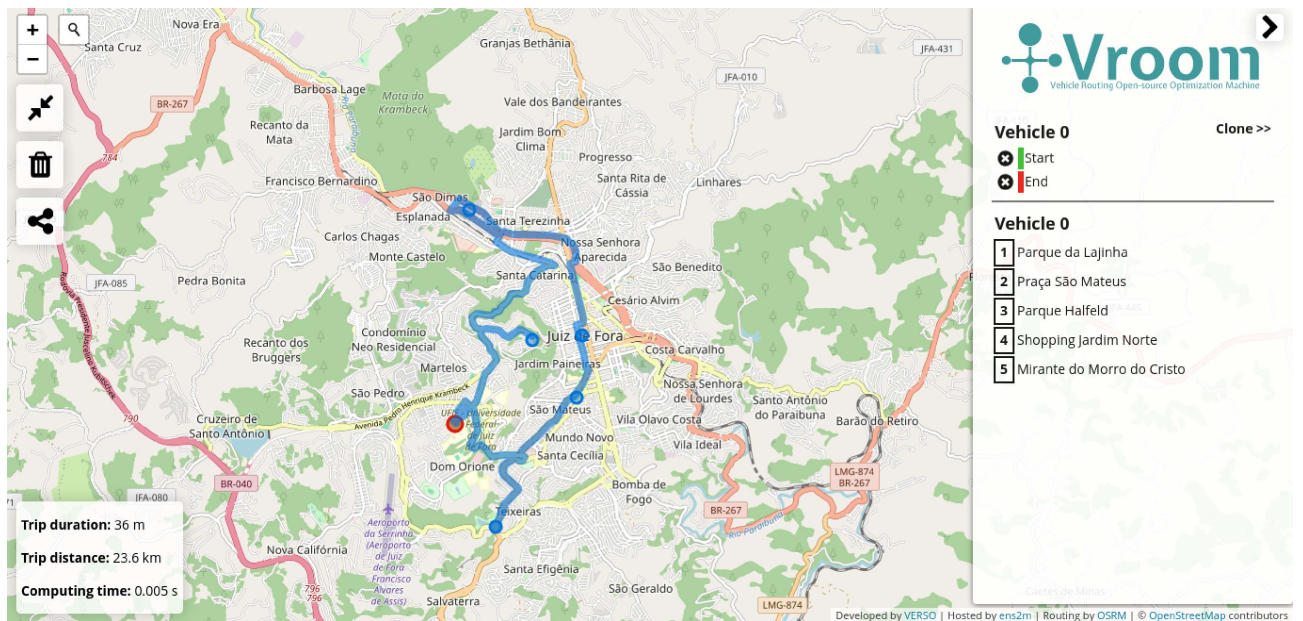
O primeiro exemplo considerou a utilização de apenas um veículo para visitar todos os pontos solicitados. A seguir é mostrado o arquivo de configurações que foi utilizado.

```
{
  "vehicles": [
    {
      "id": 0,
      "start": [
        -43.37377701233172,
        -21.77605284730942
      ],
      "end": [
        -43.37377701233172,
        -21.77605284730942
      ]
    }
  ],
  "jobs": [
    {
      "id": 1,
      "location": [
        -43.36639919724783,
        -21.79346450210183
      ],
      "description": "Parque da Lajinha"
    },
    {
      "id": 2,
      "location": [
        -43.35175,
        -21.771686
      ],
      "description": "Pra\u00e7a S\u00e3o Mateus"
    },
    {
      "id": 3,
      "location": [
        -43.35061451233865,
        -21.761039208778968
      ],
      "description": "Parque Halfeld"
    },
    {
      "id": 4,
```

```
    "location": [
      -43.37128329798821,
      -21.73985412306634
    ],
    "description": "Shopping Jardim Norte"
  },
  {
    "id": 5,
    "location": [
      -43.359828562925536,
      -21.76186530295279
    ],
    "description": "Mirante do Morro do Cristo"
  }
]
```

A Figura 18 mostra o resultado obtidos via *interface web*. A imagem mostra que o tempo necessário para visitar todos os pontos seria de 36 minutos, a distância percorrida é de 23,6 km. Além disso, é possível verificar a ordem que tais pontos devem ser visitados: Parque da Lajinha, Praça São Mateus, Parque Halfeld, Shopping Jardim Norte e Mirante do Morro do Cristo.

Figura 18 - Rota Utilizando 1 Veículo



Fonte: Elaborado pela autora (2024)

- Considerando a Utilização de 2 Veículos

O segundo exemplo considera a utilização de 2 veículos ao invés de apenas 1. Neste caso, os pontos a serem visitados são divididos entre os dois veículos. A seguir é apresentado o arquivo de configuração utilizado na *interface web*.

```
{
  "vehicles": [
    {
      "id": 0,
      "start": [
        -43.37377701233172,
        -21.77605284730942
      ],
      "end": [
        -43.37377701233172,
        -21.77605284730942
      ]
    },
    {
      "id": 1,
      "start": [
```

```
        -43.37377701233172,
        -21.77605284730942
    ],
    "end": [
        -43.37377701233172,
        -21.77605284730942
    ]
}
],
"jobs": [
    {
        "id": 1,
        "location": [
            -43.36639919724783,
            -21.79346450210183
        ],
        "description": "Parque da Lajinha"
    },
    {
        "id": 2,
        "location": [
            -43.35175,
            -21.771686
        ],
        "description": "Pra\u00e7a S\u00e3o Mateus"
    },
    {
        "id": 3,
        "location": [
            -43.35061451233865,
            -21.761039208778968
        ],
        "description": "Parque Halfeld"
    },
    {
        "id": 4,
        "location": [
            -43.37128329798821,
            -21.73985412306634
        ],
        "description": "Shopping Jardim Norte"
    },
}
```

```

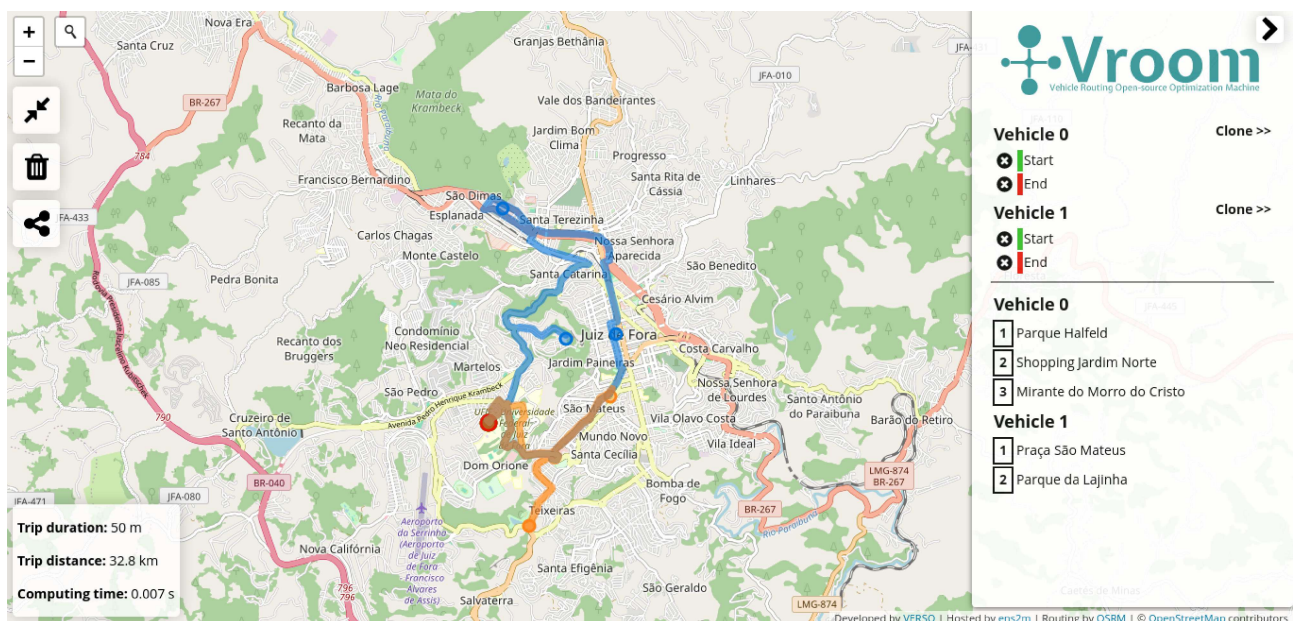
{
  "id": 5,
  "location": [
    -43.359828562925536,
    -21.76186530295279
  ],
  "description": "Mirante do Morro do Cristo"
}
]
}

```

A Figura 19 mostra o resultado obtido. A imagem mostra as rotas geradas para os dois veículos (0 e 1). O primeiro veículo, representado pela cor azul, visita: o Parque Halfeld, o Shopping Jardim Norte e o Mirante do Morro do Cristo. A Praça São Mateus e o Parque da Lajinha formaram a rota do segundo veículo, representado pela cor laranja. Vale lembrar que em os dois veículos começam e terminam sua viagem na UFJF.

Além disso, a Figura 19 também mostra o tempo total de viagem que os dois veículos demorariam para visitar todos os pontos, que seria cerca de 50 minutos. A distância total percorrida seria de quase 33 km.

Figura 19 - Rota Utilizando 2 Veículos



Fonte: Elaborado pela autora (2024)

É importante lembrar ao leitor que os exemplos gerados foram obtidos através da *interface web* do *Vroom*. Entretanto, esta não é a única opção de utilização do programa, que também pode ser utilizado via terminal. Caso seja de interesse do leitor, o arquivo *JSON* fornecido pode ser utilizado também para obter os resultados via terminal.

Este apêndice teve como objetivo apenas ilustrar, através de exemplos simples, o uso da ferramenta *Vroom*, que foi utilizada neste trabalho para obter rotas otimizadas para a coleta e transporte de resíduos. Não era o objetivo apresentar todas as funcionalidades que o programa apresenta. Sendo assim, o leitor pode acessar a documentação oficial do *software*, disponível em <https://github.com/VROOM-Project/vroom>, para obter mais informações e exemplos sobre os usos e configurações do programa.