

OTIMIZAÇÃO DE ROTAS PARA COLETA DE RESÍDUOS ORGÂNICOS NO MUNICÍPIO DE NOVA FRIBURGO – RJ, BRASIL

Caroline Nascimento Parajara Libotte[1] – parajara@iprj.uerj.br
Anderson Amendoeira Namen[2,4] – aanamen@iprj.uerj.br
Gustavo Barbosa Libotte[3] – gustavolibotte@iprj.uerj.br
[123] Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico – Nova Friburgo, RJ, Brasil
[4] Universidade Veiga de Almeida – Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Resumo. *Reduzir os custos logísticos e melhorar o atendimento aos clientes são tarefas fundamentais para a sobrevivência das empresas no mercado global atual, visto que estas atividades impactam significativamente na competitividade e nos resultados econômicos e financeiros da organização. O transporte é responsável por grande parte dos custos logísticos da organização, além de ter um papel importante no serviço de atendimento ao cliente. Dessa forma, o presente trabalho tem o objetivo de criar um sistema inteligente de coleta de resíduos orgânicos de uma empresa situada em Nova Friburgo – RJ, Brasil, definindo rotas otimizadas que minimizam o custo total de transporte. O problema foi modelado como um problema de programação linear e foi implementado computacionalmente usando a biblioteca MIP do Python. O método CBC foi utilizado para otimização das rotas da empresa de compostagem estudada neste trabalho. As rotas otimizadas encontradas pelo modelo proposto têm um custo de 17,16% menor do que as rotas atuais utilizadas pela empresa em questão.*

Keywords: *Roteirização, Resíduos sólidos, Gestão de Resíduos, Redução de custos.*

1. INTRODUÇÃO

Diante de um mercado competitivo e dinâmico, uma busca contínua por melhorias no desempenho operacional se faz necessária visando minimizar, principalmente, os custos logísticos do processo produtivo, visto que esses constituem uma grande parcela dos custos totais de produção. De acordo com Ballou (1985), a operação de movimentação de cargas absorve de um a dois terços destes custos logísticos, implicando na busca constante por melhorias na execução da atividade de transporte.

No Brasil, para distribuição da produção o modal de transporte mais utilizado é o rodoviário. As variáveis econômicas como os preços elevados dos combustíveis, estradas precárias, impostos elevados, pedágios, dentre outros aspectos, têm influência direta na composição dos custos logísticos. Assim, as organizações deparam-se com desafios importantes relacionados com a gestão, o planejamento das atividades de logística e a gestão dos custos correspondentes e, ao mesmo tempo, precisam oferecer mais qualidade e rapidez ao seu mercado consumidor (Dias, 1993).

Diante do exposto, é desejável desenvolver uma operação que atenda aos clientes de maneira satisfatória, garantindo um baixo custo desde a fabricação de produtos até a entrega

final. A roteirização de veículos é o processo para otimizar as rotas de forma estratégica, baseada em objetivos como redução de custos logísticos, otimização de tempo e distância percorrida e maximização da satisfação dos clientes. Nesse sentido, é de fundamental importância o uso de métodos computacionais no auxílio da elaboração de rotas de distribuição em uma empresa, especialmente considerando a importância dos custos de transportes no custo logístico total (Almeida *et al*., 2020).

Problemas de roteirização ocorrem com bastante frequência na distribuição de produtos e serviços. Alguns exemplos são listados a seguir (Novaes, 2004):

- Entrega, em domicílio, de produtos comprados nas lojas de varejo ou pela internet;
- Distribuição de bebidas em bares e restaurantes;
- Distribuição de dinheiro para caixas eletrônicos de bancos;
- Distribuição de combustíveis para postos de gasolina;
- Coleta de lixo urbano;
- Entrega domiciliar de correspondência;
- Distribuição de produtos dos Centros de Distribuição de atacadistas para lojas do varejo.

O presente trabalho se concentra no problema de roteamento de coleta de resíduos orgânicos em residências. Segundo a ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – em 2022 foram geradas 81,8 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU) no Brasil. Das cerca de 76,1 milhões de toneladas de RSU coletadas, apenas 61% foram dispostas em aterros sanitários, sendo o restante direcionado a lixões e aterros controlados, constituindo-se um sério problema ambiental, social e econômico. Quanto à composição dos RSU, a fração orgânica permanece como seu principal componente (45,3%), havendo um descarte médio de 170 kg de matéria orgânica por pessoa a cada ano (ABRELPE, 2022). Nesse contexto, a compostagem pode ser uma abordagem interessante a ser considerada em relação aos resíduos orgânicos domésticos, pois reduz a quantidade de resíduos orgânicos passíveis de coleta, podendo reduzir as taxas pagas pelo poder público para a disposição em aterros sanitários e aumentar a vida útil desses aterros. Ademais, pode reduzir os custos de fertilização na produção agrícola; a não aplicação de fertilizantes químicos implica também na redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) associadas à sua produção e utilização. Ressalta-se também que GEE são produzidos em grande volume nos aterros sanitários, devido à degradação da matéria orgânica sob condições anaeróbicas (COLÓN *et al*., 2012; FAVOINO; HOGG, 2008; SÁNCHEZ *et al*.., 2015).

Dentro dessa perspectiva, já existem diversas iniciativas de empresas que realizam a coleta desses resíduos em empresas e residências, fazendo a posterior compostagem e gerando adubo rico em nutrientes. Essas empresas, em sua maioria, são de pequeno e médio porte e carecem de sistemas que, a partir do apoio da computação, possam gerar rotas inteligentes para a realização da coleta. Essas rotas inteligentes visam reduzir as distâncias percorridas, atendendo aos horários de coleta demandados pelos geradores dos resíduos e minimizando os custos envolvidos.

Nesse contexto, o presente trabalho objetiva desenvolver um modelo matemático computacional para minimizar a distância percorrida e, consequentemente, os custos envolvidos na coleta de resíduos orgânicos. O trabalho foi desenvolvido para atendimento de uma empresa localizada no município de Nova Friburgo, no estado do Rio de Janeiro..

2. PROBLEMA DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS

O Problema de Roteirização de Veículos é uma questão central no gerenciamento da logística nos setores privado e público. Christofides *et al*. (1981) afirmam que o objetivo do problema de roteirização de veículos é projetar rotas viáveis - uma para cada veículo - a fim de

atender a todos os clientes e minimizar o custo (distâncias ou tempos de viagem entre os clientes) total de todas as rotas.

O Problema de Roteirização de Veículos foi introduzido por Dantzig e Ramser (1959) e consistia em uma generalização do Problema do Caixeiro Viajante. O objetivo era encontrar a roteirização ótima de uma frota de caminhões de entrega de gasolina entre um terminal de granéis e um grande número de postos de abastecimento atendidos pelo terminal. Desejava-se encontrar uma maneira de atribuir estações aos caminhões de modo que as demandas das estações fossem satisfeitas e a quilometragem total percorrida pela frota fosse mínima. De acordo com Clarke e Wright (1964), o método de Dantzig e Ramser tende a dar maior ênfase no preenchimento de caminhões com capacidades próximas do que a minimizar a distância percorrida.

Com base no trabalho de Dantzig e Ramser citado anteriormente, Clarke e Wright (1964) desenvolveram um procedimento interativo que permitia a seleção rápida da rota ótima ou de uma rota próxima da ótima. Além do tratamento do problema básico, os mesmos autores desenvolveram mecanismos para torná-lo flexível. Clarke e Wright (1964) dizem que o método por eles desenvolvido encontra resultados melhores que os do Método de Dantzig e Ramser para vários casos testados. Segundo os mesmos autores, o mérito relativo desses dois métodos depende da variabilidade da demanda dos clientes.

Os problemas de roteamento de veículos têm sido estudados com muito interesse nas últimas décadas. O foco no estudo desta classe de problema se deve à necessidade da diminuição de gastos em todo o processo, que engloba desde a produção de uma mercadoria até a sua venda. Pesquisas indicam que um considerável percentual do valor da mercadoria que chega aos clientes é de exclusiva responsabilidade dos gastos obtidos através de sua distribuição.

Baradan *et al*. (2019) abordam o problema de roteamento de veículos com múltiplas janelas de tempo prioritárias (VRPMPTW - *Vehicle Routing Problem with Multiple hard Prioritized Time Windows*) com frota heterogênea de veículos com base nas restrições de um sistema de distribuição da vida real. Três modelos multiobjetivo são propostos para abordar o VRPMPTW sob diferentes perspectivas. No primeiro modelo os tempos de viagem e os custos de transporte são determinísticos. No segundo modelo, um modelo linear biobjetivo com custos de transporte fixos e variáveis estocásticas é desenvolvido para minimizar o custo total de transporte e maximizar a satisfação dos clientes, simultaneamente. O terceiro é um novo modelo estocástico multiobjetivo onde os tempos e custos de viagem são variáveis aleatórias normais. Foi desenvolvido um algoritmo de colônia artificial de abelhas binária (ABC) sintonizado pelo método Taguchi. Para validar o algoritmo proposto, os resultados obtidos pelo algoritmo ABC são comparados com as soluções ótimas de vários problemas de teste de tamanho pequeno.

No que tange à questão da gestão e coleta de resíduos, Sahoo *et al*. (2005) abordam o caso da *Waste Management* (WM), empresa com sede em Houston, Texas, EUA, que é a fornecedora líder de serviços de gerenciamento de resíduos na América do Norte. O sistema *WasteRoute* foi desenvolvido visando gerenciar as rotas para a empresa sendo, posteriormente, implantado em todo os EUA a partir de março de 2003. No final de 2003, a WM tinha 984 rotas a menos, economizando US$ 18 milhões, sendo que a economia estimada para 2004 seria de US$ 44 milhões. Diversos outros trabalhos também abordam questões relacionadas à otimização de rotas na coleta de resíduos, como Huang e Lin (2015), Babaee Tirkolaee *et al*. (2019), Delgado-Antequera *et al*. (2020), Yu *et al*. (2020), Liang *et al*. (2022) e Negreiros Gomes *et al*. (2023). Liang *et al.* (2022) afirmam que o problema de roteamento de coleta de resíduos é uma extensão do problema de roteirização de veículos e fornecem uma revisão das abordagens mais recentes e sua aplicação na coleta e encaminhamento de resíduos. Vários algoritmos são revistos, como otimização de colônia de formigas, *Simulated Annealing*, algoritmo genético e busca em grandes vizinhanças. Por fim, é apresentada uma comparação de desempenho de um benchmark do mundo real, bem como futuras oportunidades de pesquisa.

3. MODELO MATEMÁTICO DESENVOLVIDO

A empresa OrganoKits Práticas Sustentáveis Ltda, situada em Nova Friburgo – RJ, foi fundada em 2019 e sua atividade principal é a coleta de resíduos orgânicos. A empresa conta atualmente com cerca de 70 clientes (pessoas física e jurídica) espalhados pela cidade. A empresa conta com um veículo, que sai do ponto de compostagem, recolhe os resíduos nos clientes e então retorna ao centro de compostagem para realização do descarte.

Atualmente a empresa não utiliza nenhum sistema de roteirização para realizar as coletas dos resíduos orgânicos. Segundo Ballou (2001), utilizar o racional humano para determinar roteiros já agrega alguns resultados positivos. Porém, de acordo com Ballou (1993), apesar de o bom senso levar a resultados simples com alguma eficiência, o aumento da complexidade, em termos de restrições de velocidade, tempos de paradas, número de pontos, passa a exigir o apoio de sistemas computacionais como ferramenta para o aumento de eficácia. Nesse sentido, visando à criação de rotas otimizadas para minimização do custo total de transporte, foi gerado o modelo matemático apresentado a seguir.

Seja $N = \{0, 1, \dots, n-1\}$ o conjunto dos n centros de compostagem, $M = \{n,\ n+1, \dots, n+m-1\}$ o conjunto dos m clientes e $K = \{0, 1, \dots, k-1\}$ o conjunto dos k veículos. Dessa forma, considere $G = (V, A)$, o grafo direcionado onde $V = N \cup M$ é o conjunto de vértices e $A = \{(i,j) |\ i,j \in V, i \neq j\}$ são os arcos. Os dados do problema a serem considerados são:

- Cada cliente $j \in M$ descarta uma quantidade específica de resíduos orgânicos: $\boldsymbol{d_j}$
- Capacidade do veículo k: $\boldsymbol{q_k}$
- Distância do trajeto de $i - j$ feito pelo veículo k: $\boldsymbol{h_{ijk}}$
- Tempo de viagem de i a j utilizando o veículo k: $\boldsymbol{t_{ijk}}$
- Primeiro e último horário possível para o início do serviço no ponto i no dia l, no período (turno) r: $[\boldsymbol{a_{ilr}}, \boldsymbol{b_{ilr}}]$
- Tempo de coleta no ponto i: $\boldsymbol{s_i}$ OBS: tempo de coleta nos centros de compostagem é 0
- Custo do veículo k: $\boldsymbol{\alpha_k}$
- Custo do trajeto $i - j$ utilizando o veículo k: $\boldsymbol{c_{ijk} = h_{ijk}.\alpha_k}$

As variáveis do problema são:

- $\boldsymbol{x_{ijkl}}$: 1 se o caminho i - j é utilizado pelo veículo k no dia l, 0 caso contrário;
- $\boldsymbol{w_{ikl}}$: horário de início do serviço no ponto i pelo veículo k no dia l;
- $\boldsymbol{v_{kl}}$: número de idas aos centros de compostagem pelo veículo k no dia l;
- $\boldsymbol{o_{kj}}$: volume acumulado do veículo k no cliente j.
- $\boldsymbol{y_i}$: eliminação de subrotas. $y_i = [1, m+n]$

Além dos dados do problema citados acima, é importante ressaltar que cada cliente deve ser visitado uma única vez na semana e por apenas um único veículo e que as rotas de cada veículo saem de um centro de compostagem, visitam os clientes e retornam a um centro de compostagem. Portanto, o modelo matemático que descreve o problema de roteirização para coleta de resíduos orgânicos da empresa em questão é dado como:

$$\text{Minimize } f(x) = \sum_{l \in D} \sum_{k \in K} \sum_{j=0}^{n+m-1} \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq j}}^{n+m-1} c_{ijk} x_{ijkl} \qquad (1)$$

Sujeito a

$$\sum_{l\in D}\sum_{k\in K}\sum_{\substack{i=0\\ i\neq j}}^{n+m-1} x_{ijkl} = 1, \qquad \forall j \in M \tag{2}$$

$$\sum_{\substack{i=0\\ i\neq j}}^{n+m-1} x_{ijkl} = \sum_{\substack{i=0\\ i\neq j}}^{n+m-1} x_{jikl}, \quad \forall j \in M, k \in K, l \in D \tag{3}$$

$$\sum_{i=0}^{n-1}\sum_{\substack{j=n\\ j\neq i}}^{n+m-1} x_{jikl} = v_{kl}, \quad \forall k \in K, l \in D \tag{4}$$

$$\sum_{i=0}^{n-1}\sum_{\substack{j=n\\ j\neq i}}^{n+m-1} x_{ijkl} = v_{kl}, \quad \forall k \in K, l \in D \tag{5}$$

$$\sum_{j=n}^{n+m-1}\sum_{\substack{i=0\\ i\neq j}}^{n+m-1} d_j x_{jikl} \leq q_k v_{kl}, \qquad \forall k \in K, l \in D \tag{6}$$

$$o_{kj} \leq q_k, \qquad \forall k \in K, j \in M \tag{7}$$

$$o_{kj} = 0, \qquad \forall k \in K, j \in N \tag{8}$$

$$o_{ki} + d_j - o_{kj} \leq \big(1 - x_{ijkl}\big)BigM, \quad \forall i \in (N \cup M), j \in M, k \in K, l \in D, i \neq j \tag{9}$$

$$w_{ikl} + s_i + t_{ijk} - w_{jkl} \leq \big(1 - x_{ijkl}\big)BigM, \qquad \forall i \in (N \cup M), j \in M, k \in K, \; l \in D, i \neq j \tag{10}$$

$$\sum_{r=1}^{2}\sum_{i=0}^{n+m-1} a_{jlr}x_{ijkl} \;\leq\; w_{jkl} \;\leq\; \sum_{r=1}^{2}\sum_{i=0}^{n+m-1} b_{jlr}x_{ijkl}, \forall j \in M, k \in K, l \in D, i \neq j \tag{11}$$

$$y_i - y_j + (m+n)\sum_{l\in D}\sum_{k\in K} x_{ijkl} \leq m + n - 1, \qquad \forall i, j \in M, i \neq j \tag{12}$$

A Eq. (1) é a função objetivo do problema que minimiza o custo total de transporte da empresa A Eq. (2) diz que cada ponto j é atendido por um único veículo e uma única vez na semana. A Eq. (3) diz que se um veículo k chega em um ponto j no dia l, ele deve sair também, ou seja, todo ponto j será destino e origem uma única vez. As Eqs. (4) e (5) garantem, respectivamente, que o veículo k visita e sai do centro de compostagem i no dia l, v_{kl} vezes. Essa quantidade é calculada pela restrição (6). A restrição (7) assegura que o volume acumulado no cliente j não deve exceder a capacidade do veículo k, enquanto a Eq. (8) zera o volume acumulado nos centros de compostagem j. A restrição (9) calcula a demanda acumulada do veículo k após cada visita. As restrições (10) e (11) asseguram que cada cliente será atendido dentro da sua janela de tempo. Por fim, a restrição (12) impede a formação de subrotas.

4. RESULTADOS

Para encontrar as rotas otimizadas, o modelo matemático foi implementado computacionalmente utilizando a biblioteca MIP do Python. O método de otimização utilizado foi o CBC (*COIN-OR Branch-and-Cut solver*) que é um algoritmo para resolver problemas de programação linear inteira mista. Ele é implementado como parte da biblioteca COIN-OR, uma coleção de ferramentas de otimização de código aberto.

O CBC combina técnicas de *branch-and-bound* (ramificação e limitação) e *cutting-plane* (corte de planos) para encontrar soluções ótimas ou aproximadas para problemas de programação linear.

O CBC é uma ferramenta valiosa para resolver problemas de otimização combinatória e inteira em diversas aplicações onde a busca por soluções ótimas ou de alta qualidade são cruciais, como planejamento da produção, roteamento de veículos, design de redes, escalonamento, logística, alocação de recursos e muitos outros domínios.

As rotas atuais da empresa utilizam apenas um carro com capacidade de 200 quilogramas para coletar os resíduos de 51 clientes da categoria pessoa física e um ponto de compostagem, e conforme já citado anteriormente, essas rotas foram criadas sem o uso de sistemas de roteirização, utilizando apenas o racional humano. A Tabela 1 mostra como funcionam as rotas atuais da empresa e as rotas otimizadas encontradas pelo sistema computacional implementado.

Tabela 1: Comparação entre as rotas atuais da empresa e as rotas encontradas pelo sistema computacional implementado.

		Nº de clientes atendidos	Volume coletado (quilogramas)	Distância total (km)	Nº de bairros atendidos
Rotas atuais	Segunda-feira	5	34	18,785	3
	Terça-feira	27	186	25,524	3
	Quarta-feira	19	150	33,017	7
				77,326	
Rotas otimizadas	Terça-feira	26	180	24,132	2
	Quarta-feira	25	190	39,925	11
				64,057	

As rotas otimizadas encontradas pelo modelo matemático desenvolvido têm uma distância 17,16% menor do que a distância total das rotas atuais da empresa estudada. Considerando que essas rotas sejam feitas periodicamente pela empresa, a economia ao adotar as rotas otimizadas seria de 344,994 quilômetros em um ano.

Pela Tabela 1, verifica-se que nas rotas atuais, apenas 5 clientes são atendidos nas segundas-feiras. Como a capacidade do veículo utilizado pela empresa para a coleta dos resíduos é de 200 quilogramas, o baixo volume coletado neste dia poderia ser coletado nas terças e quartas-feiras, fazendo assim com que uma rota a menos seja executada. Os clientes que são atendidos nas segundas-feiras possuem disponibilidade para serem atendidos em outros dias da semana. Além disso, esses clientes estão situados em bairros que possuem clientes atualmente atendidos em outros dias da semana ou então estão próximos a outros bairros atendidos pela empresa, reforçando assim, a possibilidade de eliminar essa rota de segunda-feira.

A Fig. 1 compara a distância acumulada a cada cliente visitado pelas rotas atuais usadas pela empresa e pelas rotas otimizadas encontradas pelo modelo matemático proposto. Conforme já mencionado, atualmente a empresa atende os 51 clientes em 3 dias, portanto, como as rotas devem começar e finalizar nos centros de compostagem, 54 viagens precisam ser feitas para atender todos os clientes e respeitar o funcionamento da empresa. Já as rotas otimizadas encontradas pelo modelo matemático proposto, fazem um total de 53 viagens para atender em 2 dias todos os 51 clientes. É válido ressaltar que em um mesmo dia é permitido ir ao centro de compostagem para descarregar o volume já coletado e depois voltar a atender mais clientes caso haja tempo disponível no dia, porém, isso só deve ser feito se o veículo já estiver com sua capacidade cheia ou se essa viagem representar um ganho na distância total percorrida.

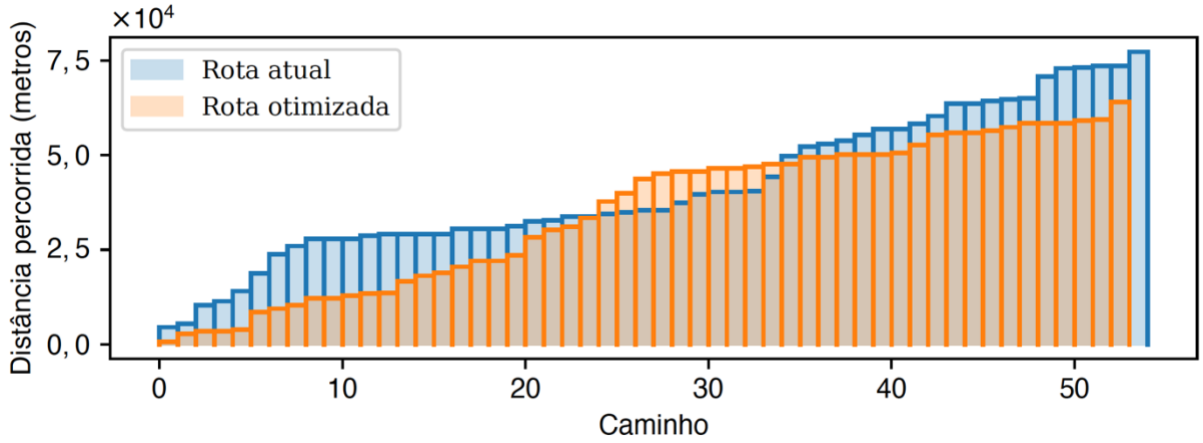


Figura 1: Comparação da distância acumulada percorrida pelas rotas atuais e pelas rotas otimizadas.

O problema abordado neste trabalho trata-se de um caso de uma empresa que possui apenas 51 clientes (pessoa física) atualmente. Analisando a disposição geográfica, percebe-se uma proximidade muito grande entre eles. Além disso, 28 clientes, ou seja, mais da metade dos clientes, estão situados no mesmo bairro, o que favorece que boas rotas sejam criadas mesmo sem o uso de um sistema inteligente de roteirização.

Apesar da quantidade de clientes ser relativamente pequena, a função objetivo (Eq. (1)) do problema conta com 13.100 termos e o problema possui um total de 28.936 restrições. À medida em que o número de clientes aumenta, e/ou a disposição destes seja mais dispersa, e/ou a quantidade de veículos utilizados para coletar os resíduos seja maior que um, e/ou o número de centros de compostagem aumenta, maior é a complexidade do problema. Desse modo, encontrar boas rotas utilizando apenas o racional humano pode se tornar uma tarefa improvável, necessitando assim, de um sistema de roteirização. Porém, sabe-se que estes sistemas são caros e as pequenas empresas de compostagem não possuem capital para adquiri-los. Nesse contexto, as rotas encontradas pelo sistema computacional proposto neste trabalho serão fornecidas gratuitamente para a empresa estudada em questão.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho aborda o problema de roteamento de veículos de uma empresa de coleta de resíduos orgânicos situada em Nova Friburgo – RJ, Brasil, que possui 51 clientes da categoria pessoa física, 1 centro de compostagem e faz as coletas dos resíduos utilizando um veículo com capacidade de 200 kg. Atualmente as coletas são realizadas em 3 dias da semana, fazendo um total de 54 viagens e percorrendo um total de 77,326 km.

O problema foi modelado como um problema de programação linear e implementado computacionalmente usando a biblioteca MIP do Python. A função objetivo do problema conta com 13.100 termos e o problema possui um total de 28.936 restrições. O método CBC foi utilizado para otimização do problema. As rotas encontradas pelo modelo matemático desenvolvido atendem a todos os clientes em 2 dias da semana e possuem um custo 17,16% menor do que o custo das rotas atuais da empresa.

Acredita-se que essa pesquisa pode ser uma contribuição relevante para pequenas empresas que realizam coleta e compostagem de resíduos orgânicos. Nesse sentido, espera-se desenvolver no futuro, de forma gratuita, modelos de otimização de rotas para outras empresas desse segmento.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, e com o apoio da Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro – FAPERJ.

REFERÊNCIAS

Almeida, M. das N., Santos Neto, B. R. dos, Moura Filho, A. M. de, Santos, A. A. dos. (2020), Otimização da rota de veículos e seus impactos na logística de distribuição: um estudo de caso em uma distribuidora de produtos de limpeza. Revista Produção Online, 20(2), 598–626.

Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) (2022), Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil. São Paulo. 52 f.

Babaee Tirkolaee, E., Goli, A., Pahlevan, M., Malekalipour Kordestanizadeh, R. (2019). A robust bi-objective multi-trip periodic capacitated arc routing problem for urban waste collection using a multi-objective invasive weed optimization. Waste Management & Research, 37(11), 1089-1101.

Ballou, R. H. (1985), "*Instructor's manual business logistics management: planning and control*". Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall.

Ballou, R. H. (1993), "*Logística empresarial: transportes, administração de materiais e distribuição física*", Ed. Atlas.

Ballou, R. H. (2001), "*Gerenciamento da cadeia de suprimentos: planejamento, organização e logística empresarial*", Bookman.

Baradaran, V., ShafaeI, A., Hosseinian, H. (2019), Stochastic vehicle routing problem with heterogeneous vehicles and multiple prioritized time windows: Mathematical modeling and solution approach. Computers & Industrial Engineering, 131: 187-199.

Christofides, N., Mingozzi, A., Toth, P. (1981), Exact algorithms for the vehicle routing problem, based on spanning tree and shortest path relaxations. Mathematical programming, 20, 255-282.

Clarke, G., Wright, J. W. (1964), Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. Operations research, v12, n4, 568-581.

Colón, J.; Cadena, E.; Pognani, M.; Barrena, R.; Sánchez, A.; Font, X.; Artola, A. (2012). Determination of the energy and environmental burdens associated to the biological treatment of source-separated municipal solid wastes. Energy & Environmental Science, vol. 5, no. 2, pp. 5731–5741.

Delgado-Antequera, L., Caballero, R., Sánchez-Oro, J., Colmenar, J. M., Martí, R. (2020). Iterated greedy with variable neighborhood search for a multiobjective waste collection problem. Expert Systems with Applications, *145*, 113101.

Dias, M. A. P. (1993). "*Administração de materiais: uma abordagem logística*". 4ª Edição. *São Paulo: Atlas*.

Favoino, E.; Hogg D. (2008). The potential role of compost in reducing greenhouse gases. Waste Management & Research, vol. 26, no.1, pp. 61-69.

Gomes, M.J.N., Palhano, A.W.D.C., Reis, E.C.R. (2023). Sector arc routing-based spatial decision support system for waste collection in Brazil. Waste Management & Research, 41(1), 214-221.

Grando-Lazzari, S. (2018), "*Problema de roteirização de veículos: um estudo de caso em uma transportadora*". Trabalho de conclusão de curso, UFSC, Joinville.

Huang, S.H., Lin, P.C. (2015). Vehicle routing–scheduling for municipal waste collection system under the "Keep Trash off the Ground" policy. Omega, *55*, 24-37.

Liang, Y. C., Minanda, V., Gunawan, A. (2022), Waste collection routing problem: A mini-review of recent heuristic approaches and applications. Waste Management & Research, 40(5): 519-537.

Rodrigues, L. F., Peixoto, E. C., Pinto, L. R., Conceição, S. V. (2016), "O problema de roteirização de veículos tratado de forma simples e eficiente em uma empresa transportadora de médio porte". *III Simpósio de Pesquisa Operacional e Logística Marinha,* 733 – 746.

Sahoo, S., Kim, S., Kim, B. I., Kraas, B., Popov Jr, A. (2005), Routing optimization for waste management. Interfaces, 35(1), 24-36.

Sánchez, A.; Artola, A.; Font, X.; Gea, T.; Barrena, R.; Gabriel, D.; Sánchez-Monedero, M.A.; Roig, A.; Cayuela, M.L.; Mondini, C. (2015). Greenhouse gas emissions from organic waste composting. Environmental Chemistry Letters, vol. 13, pp. 223–238.

Silva, J. T. S. D.; Araújo, M.C.B. de; Souza, I. B. de; Soares, W.O. S.; Palhares, R. de A. (2019). "*Roteirização de veículos: estudo de caso em uma indústria de laticínios no Rio Grande do Norte*", XXXIX Encontro Nacional de Engenharia de Produção.

Yu, X., Zhou, Y., Liu, X. F. (2020). The two-echelon multi-objective location routing problem inspired by realistic waste collection applications: The composable model and a metaheuristic algorithm. Applied Soft Computing, 94, 106477.

OPTIMISATION OF ORGANIC WASTE COLLECTION ROUTES IN THE MUNICIPALITY OF NOVA FRIBURGO – RJ, BRAZIL

Abstract*. Reducing logistics costs and improving customer service are fundamental tasks for companies to survive in current global market, as these activities significantly impact the competitiveness and economic and financial outcomes of the organization. Transport is responsible for a large part of the organization's logistical costs, in addition to playing an important role in customer service. The aim of this work is to create an intelligent system for collecting organic waste from a company located in Nova Friburgo - RJ, Brazil, by defining optimized routes that minimize the total cost of transport. The problem was modeled as a linear programming problem and was implemented computationally using Python's MIP library. The CBC method was used to optimize the routes of the composting company studied in this work. The optimized routes found by the proposed model cost 17.16% less than the current routes used by the company in question.*

Keywords: *Routing, Solid waste, Waste management, Cost reduction.*