

# PESQUISA OPERACIONAL APLICADA À OTIMIZAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE VACINAS ANTIRRÁBICAS: UM ESTUDO DE CASO EM ARAGUAÍNA, TOCANTINS

Pedro Henrique Rodrigues Aguiar

Universidade Federal do Norte do Tocantins (UFNT)  
pedro.aguiar@ufnt.edu.br

David Gabriel de Barros Franco

Universidade Federal do Norte do Tocantins (UFNT)  
david.franco@ufnt.edu.br

Warton da Silva Souza

Universidade Federal do Norte do Tocantins (UFNT)  
warton.souza@ufnt.edu.br

Leonardo Pinheiro da Silva

Universidade Federal do Norte do Tocantins (UFNT)  
leonardo.silva@ufnt.edu.br

**Resumo:** A logística se faz presente em todos os setores da economia, com destaque para a saúde pública. Um exemplo significativo de aplicação é no controle de zoonoses que afetam animais domésticos, como a raiva. O presente estudo aborda a otimização da distribuição de vacinas antirrábicas no município de Araguaína, Tocantins, com o objetivo de melhorar a eficiência logística do Centro de Controle de Zoonoses (CCZ) do município. A pesquisa destaca a importância da logística no transporte de insumos, especialmente em campanhas de saúde pública, e propõe um modelo matemático baseado em programação linear inteira mista para desenvolver rotas eficientes. A metodologia incluiu a coleta de dados sobre a demanda nos postos de vacinação, a análise das distâncias geográficas e o uso de modelos de programação linear para a obtenção da rota ótima. Os resultados indicam que a nova roteirização proposta pode reduzir significativamente os custos operacionais, minimizando a distância percorrida e o número de veículos em circulação. O estudo também enfatiza que, apesar das dificuldades na determinação da capacidade exata dos veículos, o uso de estimativas médias permitiu uma simulação eficaz. Além disso, a pesquisa sugere que a implementação dessas soluções pode impactar positivamente não apenas na redução de custos para os cofres públicos, mas também na qualidade do serviço prestado à população, nesse e em outros setores da administração pública.

**Palavras-chave:** problema de roteamento de veículos; distribuição de vacinas; otimização logística; saúde pública; modelagem matemática.

## APPLIED OPERATIONAL RESEARCH FOR OPTIMIZING THE DISTRIBUTION OF ANTI-RABIES VACCINES

**Abstract:** Logistics is present in all sectors of the economy, with emphasis on public health. A significant example of its application is in the control of zoonoses that affect domestic animals, such as rabies. This study

addresses the optimization of the distribution of anti-rabies vaccines in the municipality of Araguaína, Tocantins, with the aim of improving the logistical efficiency of the city's Zoonosis Control Center (CCZ). The research highlights the importance of logistics in the transportation of supplies, especially in public health campaigns, and proposes a mathematical model based on mixed integer linear programming to develop efficient routes. The methodology included the collection of data on demand at vaccination centers, the analysis of geographic distances, and the use of linear programming models to obtain the optimal route. The results indicate that the new proposed routing can significantly reduce operating costs by minimizing the distance traveled and the number of vehicles in circulation. The study also emphasizes that, despite the difficulties in determining the exact capacity of the vehicles, the use of average estimates allowed for an effective simulation. Furthermore, the research suggests that the implementation of these solutions can have a positive impact not only on reducing costs for public coffers, but also on the quality of service provided to the population, in this and other sectors of public administration.

**Keywords:** vehicle routing problem; vaccine distribution; logistics optimization; public health; mathematical modeling.

## INTRODUÇÃO

Desde os primórdios da civilização, o transporte tem sido uma necessidade fundamental para a humanidade, permitindo o deslocamento de bens e pessoas entre diferentes locais. A utilização de barcos para navegação foi uma das primeiras inovações nesse contexto. No entanto, a invenção da roda pelos mesopotâmicos, há cerca de 5.000 anos, representa um marco crucial na evolução do conceito de transporte. Ao longo da história, diversas inovações tecnológicas deram origem a diferentes modais de transporte, facilitando a locomoção entre pontos distantes (Carandina, 2019).

Para otimizar o uso dessas inovações no âmbito logístico, é imprescindível um aprofundamento contínuo nos estudos dessa área. Isso se torna ainda mais relevante considerando que os custos relacionados à logística de distribuição podem ser bastante elevados para as organizações. Nesse sentido, a logística de transporte emerge como um ramo da ciência que busca minimizar as despesas associadas às entregas por meio do desenvolvimento de roteamentos eficientes, beneficiando tanto as empresas quanto seus clientes (Bräysy e Gendreau, 2005).

No contexto brasileiro, a logística se faz presente em todos os setores da economia, com destaque para a saúde pública. Um exemplo significativo é o controle de zoonoses que afetam animais domésticos, como a raiva. Entre 1990 e 1991, o Brasil registrou altos índices

dessa enfermidade em humanos, com os cães sendo os principais transmissores (Brasil, 2023). Dentre as medidas profiláticas adotadas para conter a doença em áreas urbanas, a vacinação antirrábica de cães e gatos se destaca como o método mais eficaz (Brasil, 2022). Uma distribuição mais eficaz das vacinas antirrábicas não apenas ajuda a prevenir a raiva em animais domésticos, mas também protege a saúde pública ao reduzir o risco de transmissão da doença para humanos. A implementação de uma logística robusta é fundamental para alcançar coberturas vacinais adequadas e garantir que os benefícios da vacinação sejam plenamente realizados.

Diante desse cenário, surge a seguinte questão-problema da pesquisa: Como realizar a distribuição das vacinas antirrábicas de maneira eficiente, garantindo atendimento à população local com o menor custo possível para os cofres públicos e sem deixar cidadãos desassistidos?

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver uma roteirização otimizada para a distribuição das vacinas antirrábicas nos postos de imunização do município de Araguaína, Tocantins. Os objetivos específicos incluem:

- I. Compreender o cenário local do município e as restrições aplicáveis;
- II. Mapear a demanda em cada posto de vacinação;
- III. Desenvolver um modelo matemático para otimizar o trajeto.

Este estudo justifica-se pela sua contribuição prática ao município analisado, visando aprimorar as decisões relacionadas ao traçado dos percursos e atender às necessidades da população enquanto reduz significativamente os custos de transporte. Além disso, busca-se fomentar a difusão do conhecimento nessa área, incentivando novas pesquisas e inovações que possam aprimorar futuras iniciativas no setor.

Este artigo está estruturado em cinco seções distintas. A primeira seção, de caráter introdutório, delinea o contexto e os objetivos da pesquisa. Em seguida, a segunda seção apresenta o referencial teórico, que abrange aspectos relacionados à logística de transporte, à distribuição física, às especificidades do manuseio de insumos imunobiológicos e ao problema da otimização de rotas. A terceira seção descreve a metodologia empregada na

pesquisa, além de caracterizar o local onde o estudo foi realizado. Na quarta seção, são apresentados os resultados obtidos, seguidos pela seção de conclusões, que sintetiza as principais implicações do trabalho.

## **REFERENCIAL TEÓRICO**

### LOGÍSTICA DE TRANSPORTE

A logística desempenha um papel crucial no funcionamento das empresas, abrangendo um conjunto de processos que incluem planejamento, controle eficiente do fluxo de bens, informações, recursos, transporte e armazenamento de matérias-primas ou mercadorias. Essa cadeia logística se estende desde a origem dos materiais até o ponto de entrega, com o objetivo de atender às exigências dos clientes de maneira satisfatória e econômica para a organização (Franco *et al.*, 2022).

De acordo com Fleury, Wanke e Figueiredo (2000), o transporte é uma função logística fundamental, representando uma parcela significativa dos custos logísticos nas organizações. Os autores enfatizam que essa função não apenas constitui a maior parte das despesas logísticas, mas também desempenha um papel crucial no desempenho de diversas dimensões do serviço ao cliente. Em termos de custos, o transporte pode representar aproximadamente 60% das despesas logísticas, e em algumas situações, esses custos podem ser duas ou três vezes superiores ao lucro de uma empresa. Essa realidade ressalta a importância de uma gestão eficiente do transporte para a sustentabilidade financeira e a competitividade das organizações.

Diante disso, a logística se torna uma área prioritária para otimização e redução de desperdícios, resultando em maior margem de lucro para as empresas e um nível de serviço aprimorado para os clientes. Essa eficiência proporciona uma vantagem competitiva em relação aos concorrentes.

Ao correlacionar as definições apresentadas, evidencia-se a importância da logística na otimização dos custos internos da empresa e na satisfação do cliente final. A logística é medida tanto em termos espaciais quanto temporais, exigindo que os especialistas compreendam onde e quando ocorrerá a demanda (Ballou, 2006).

No que diz respeito à logística de transporte, especialmente no que tange à roteirização, diversos fatores devem ser considerados. Atualmente, a tecnologia desempenha um papel fundamental na redução de custos. A aplicação de algoritmos e modelos matemáticos permite determinar as rotas mais eficientes para o transporte, minimizando distâncias percorridas (e custos) e reduzindo atrasos nas entregas. Isso resulta em uma melhoria na produtividade da equipe — tanto no planejamento quanto na execução — e impacta positivamente na satisfação do cliente (Sampaio *et al.*, 2025).

Ballou (2006) enfatiza que a eficácia de um arranjo de transporte depende da consideração de diversos fatores na elaboração do itinerário a ser percorrido. Um aspecto crucial é a seleção de veículos com capacidade adequada, o que é fundamental para o sucesso do roteiro. O autor argumenta que, em um roteiro ideal, a utilização de um veículo com capacidade suficiente para atender todas as paradas minimizaria tanto a distância quanto o tempo total necessário para realizar o serviço. Assim, recomenda-se que os veículos de maior capacidade disponíveis na frota sejam alocados preferencialmente, desde que sua utilização seja otimizada para garantir eficiência no transporte.

Portanto, para maximizar as chances de sucesso em um roteiro logístico, é essencial conhecer as especificações dos tipos de transporte disponíveis. Isso permite aproveitar ao máximo o potencial de cada veículo e tomar decisões logísticas mais informadas durante o planejamento do transporte.

## **DISTRIBUIÇÃO FÍSICA**

A distribuição física de produtos é uma atividade operacional essencial, cuja finalidade é transferir mercadorias desde o ponto de origem, onde são fabricadas, até o

destino final, que são os consumidores. Para garantir o sucesso dessa entrega, são necessárias ferramentas como veículos de transporte, estoques adequados e um planejamento eficaz (Novaes, 2021).

Os canais de distribuição variam conforme a realidade e o segmento de cada organização. No entanto, existem objetivos comuns que convergem entre as empresas, como a necessidade de um fluxo rápido de informações entre as partes envolvidas, a disponibilidade imediata do produto e a redução de custos ao longo da cadeia de suprimentos (Novaes, 2021).

Para otimizar os canais de distribuição e minimizar problemas relacionados à falta de sincronia entre oferta e demanda — como o acúmulo excessivo de produtos em estoque — é fundamental adotar estratégias mais eficientes. Isso inclui a utilização de ferramentas de tecnologia da informação para estruturar uma logística de distribuição que se alinhe tanto aos tamanhos de lotes compatíveis com a demanda quanto ao tipo de distribuição física a ser empregado (Dias, 2014).

Um canal de distribuição eficaz deve atender às necessidades do consumidor final, garantindo a disponibilidade do produto nos momentos e locais adequados. Essa abordagem agrega valor percebido pelo cliente. Portanto, para uma distribuição eficiente que satisfaça o consumidor, é necessário um planejamento abrangente que considere todos os passos do processo logístico. Isso inclui identificar os pontos de atendimento que precisarão ser reabastecidos e selecionar o modal mais apropriado para cada local dentro do prazo estipulado (Beckedorff, 2013).

## INSUMOS IMUNOBIOLOGICOS

No âmbito das altas hierarquias do governo federal, a Coordenação-Geral do Programa Nacional de Imunização (CGPNI), vinculada ao Ministério da Saúde, desempenha um papel fundamental na distribuição de medicamentos imunobiológicos. Essa distribuição é realizada por meio da Rede de Frio, uma estrutura logística que abrange todas as esferas

da administração pública — federal, estadual e municipal — garantindo que os imunobiológicos cheguem à população em todo o território nacional (Brasil, 2017).

A Rede de Frio opera mediante solicitações das unidades federativas brasileiras, que organizam a distribuição dos medicamentos de acordo com a demanda específica de seus municípios. Esse processo logístico é complexo e envolve um longo trajeto que se inicia no desenvolvimento dos produtos em laboratórios e se estende até o momento em que o usuário final pode utilizá-los (Brasil, 2017). A eficácia dessa rede é crucial para atender às campanhas locais de imunização, assegurando que os imunobiológicos sejam mantidos em condições adequadas durante todo o percurso, desde a fabricação até a aplicação.

Além disso, a manutenção da qualidade dos insumos durante o transporte e armazenagem é essencial para garantir a eficácia das vacinas. A Rede de Frio é projetada para preservar as características originais dos produtos, considerando que muitos deles são termolábeis e podem perder eficácia se expostos a temperaturas inadequadas (Brasil, 2017). Portanto, a estrutura logística da CGPNI não apenas coordena a distribuição, mas também assegura que os imunobiológicos sejam manuseados adequadamente em todas as etapas do processo.

## OTIMIZAÇÃO DE ROTAS

Ao desenvolver um roteiro para a entrega de mercadorias, as restrições e variáveis de decisão são componentes fundamentais na busca pela minimização dos custos de transporte. Cada empresa possui um contexto específico que influencia a elaboração de sua malha logística, como, por exemplo, as múltiplas opções de percursos entre o ponto de origem e o destino. O fator determinante nessa tomada de decisão costuma ser a menor distância entre os pontos (Ballou, 2006).

Além da formulação inicial do roteiro, existem diversos métodos que podem ser utilizados para aprimorar um percurso já estabelecido, com destaque para os métodos *2-opt* e *3-opt*. Desenvolvidos por Lin e Kernighan, esses métodos visam reduzir os custos de

uma rota por meio de trocas sucessivas entre os pontos de entrega. O algoritmo *3-opt* é uma versão mais complexa e precisa do *2-opt*, permitindo uma permutação que não altera o agrupamento dos destinos finais. Quando uma redução de custo — como a distância — é identificada, um novo roteiro pode ser gerado a partir da modificação do anterior, resultando em um remanejamento da ordem dos pontos a serem atendidos (Novaes, 2021). A elaboração de uma rota envolve considerações que vão além da simples definição do trajeto a ser percorrido; diversos parâmetros devem ser levados em conta. De acordo com Franco e Steiner (2022), para cada cliente, diferentes restrições podem ser aplicadas em função de suas especificidades. Entre esses parâmetros, destacam-se:

- **Função objetivo:** busca minimizar os custos totais do transporte da carga (incluindo custos fixos e variáveis);
- **Variáveis de decisão:** representam as conexões entre os pontos desejados;
- **Restrições:** garantem que a rota seja viável, cíclica e compatível com a estrutura física da empresa (como número de veículos disponíveis e suas capacidades de carga).

O Problema de Roteamento de Veículos (PRV) tem como objetivo definir as rotas que devem ser percorridas por múltiplos veículos que partem de um ponto para atender aos clientes em locais distintos, buscando minimizar o gasto de recursos enquanto respeita as restrições de capacidade dos veículos e considera a demanda a ser atendida (Toth e Vigo, 2002).

A criação de rotas para veículos em um contexto organizacional pode ser bastante desafiadora. Portanto, a utilização de *softwares* específicos para essa finalidade é a solução mais eficaz. Nesse sentido, a modelagem matemática pode ser empregada para desenvolver uma solução ótima para um número reduzido de pontos (Cunha, 2000).

## MATERIAIS E MÉTODOS

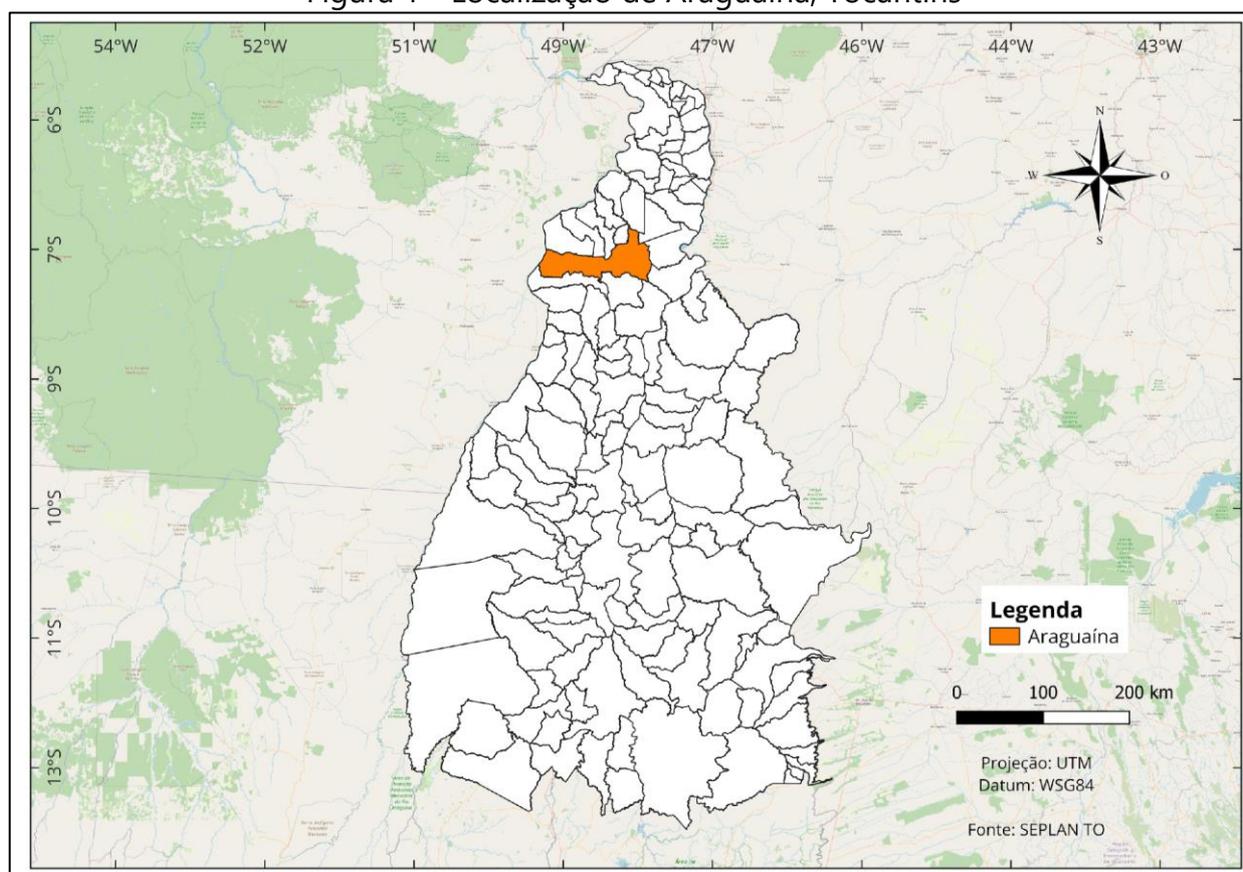
### LOCAL DA PESQUISA

A pesquisa foi realizada no município de Araguaína, Tocantins, localizado no norte do estado, com uma extensão territorial de 4.004 km<sup>2</sup> e uma população estimada em aproximadamente 171.301 habitantes. De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a arrecadação de receita do município gira em torno de R\$427.808.780, e o PIB per capita é de R\$28.129,89 (IBGE, 2024).

O foco do estudo foi o Centro de Controle de Zoonoses (CCZ), uma unidade de saúde pública responsável pelo controle de doenças zoonóticas, como Dengue, Chikungunya, Doença de Chagas, Raiva e Leishmaniose visceral e tegumentar. O CCZ atua por meio de políticas públicas que incluem palestras de conscientização em áreas urbanas e rurais, atividades de bloqueio realizadas por Agentes de Combate a Endemias (ACE) em locais com alta incidência de zoonoses, além da disponibilização gratuita de vacinas antirrábicas e coleiras antipulgas em campanhas sazonais organizadas pelo centro.

Os dados para esta pesquisa foram coletados por meio de questionários abertos ao setor de medicina veterinária do CCZ, que organizou o procedimento logístico do evento, além da solicitação de informações à Secretaria Municipal de Saúde. A campanha foi distribuída em 29 pontos de vacinação, sendo um deles o depósito central. Esses postos foram agrupados em 9 grupos, cada um sob a supervisão de um responsável pela administração dos pontos. A Figura 1 apresenta a localização do município no Estado do Tocantins.

Figura 1 - Localização de Araguaína, Tocantins



Fonte: SEPLAN – TO (2024).

Para o transporte dos insumos necessários à campanha, foi disponibilizado um veículo para cada supervisor, totalizando 9 veículos. Esses veículos atenderam diversas necessidades logísticas da campanha, incluindo reabastecimento das vacinas e materiais suplementares como luvas e injeções, além de fornecer alimentação para os colaboradores envolvidos.

O objetivo deste trabalho é utilizar os dados fornecidos pela Secretaria de Saúde sobre as demandas de vacinação e as distâncias geográficas entre os locais coletadas no Google Maps para desenvolver uma roteirização que minimize os custos da campanha em termos de deslocamentos. Além disso, busca-se proporcionar agilidade na entrega dos medicamentos veterinários para atender a demanda em cada posto de vacinação.

Assim, esta pesquisa é caracterizada como aplicada e exploratória, com uma abordagem quantitativa. A solução proposta será fundamentada em modelagem

matemática oriunda da Pesquisa Operacional (PO), utilizando as informações numéricas obtidas para determinar a melhor estratégia para a implementação do roteiro no contexto analisado.

## MODELAGEM MATEMÁTICA

O modelo matemático utilizado para buscar uma possível solução foi desenvolvido com base em programação linear inteira mista, que combina variáveis inteiras e binárias. Neste tipo de abordagem, tanto a função objetivo quanto as restrições são lineares, e o domínio das variáveis de decisão é restrito a valores inteiros e binários (Belfiore e Fávero, 2012). A estrutura do modelo é composta da seguinte maneira:

### Parâmetros

$c_{ij}$ : custo de transporte do cliente  $i$  para o cliente  $j$ .

$D_i$ : demanda do cliente  $i$ .

$C$ : a capacidade dos veículos de entrega.

### Variáveis de decisão

$x_{ij}$ : variável binária que assume valor 1 se o arco  $(i, j)$  for utilizado e 0, caso contrário.

$f_{ij}$ : quantidade de fluxo enviada do cliente  $i$  para o cliente  $j$ .

### Função objetivo

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij}$$

A função objetivo do PRV é fundamental para a otimização das operações logísticas, visando a eficiência no transporte de mercadorias. Essa função pode variar dependendo das necessidades específicas do problema, mas geralmente se concentra em minimizar os custos do transporte ( $c_{ij}$ ).

## Restrições

1. De cada cliente  $i$  sai um único veículo, exceto para o depósito

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad \forall i = 2, \dots, n$$

2. A cada cliente  $j$  chega um único veículo, exceto para o depósito

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad \forall j = 2, \dots, n$$

3. O fluxo que chega em um cliente menos o fluxo que sai dele é igual à sua demanda, exceto para o depósito

$$\sum_{j=1}^n f_{ji} - \sum_{j=1}^n f_{ij} = D_i \quad \forall i = 2, \dots, n$$

4. O fluxo em cada cliente é menor ou igual à capacidade do veículo que passa por ele

$$f_{ij} \leq Cx_{ij} \quad \forall i, j = 1, \dots, n$$

5. Variáveis de decisão binárias e inteiras

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j = 1, \dots, n$$

$$f_{ij} \in Z \quad \forall i, j = 1, \dots, n$$

## SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Para a execução do modelo matemático proposto e garantir um resultado mais preciso, utilizou-se o *software* de otimização *OpenSolver*, versão 2.3.1. Desenvolvido por Andrew Mason e uma equipe da Universidade de Auckland, na Nova Zelândia, o *OpenSolver* é uma ferramenta que se integra a planilhas eletrônicas e é capaz de resolver problemas que envolvem múltiplas análises combinatórias em questão de minutos. É importante ressaltar

que, quanto maior for a complexidade do problema, mais tempo o programa levará para encontrar a solução ótima.

Além do *OpenSolver*, foi empregado o método de melhoria de rota *2-opt* para aprimorar o roteiro gerado. Em determinadas situações, especialmente devido ao tamanho do modelo, o *OpenSolver* pode não conseguir identificar a solução ótima, apresentando apenas uma solução factível que atende às restrições do modelo.

O algoritmo *2-opt* consiste na remoção de duas arestas de uma rota e na reconexão dessas arestas de maneira invertida, desde que se mantenha uma única rota contínua. Utilizando a condição do triângulo — que estabelece que o comprimento de um dos lados é sempre menor que a soma dos outros dois lados — é possível realizar melhorias na rota final, eliminando trechos cruzados e religando os pontos em ordem inversa (Croes, 1958).

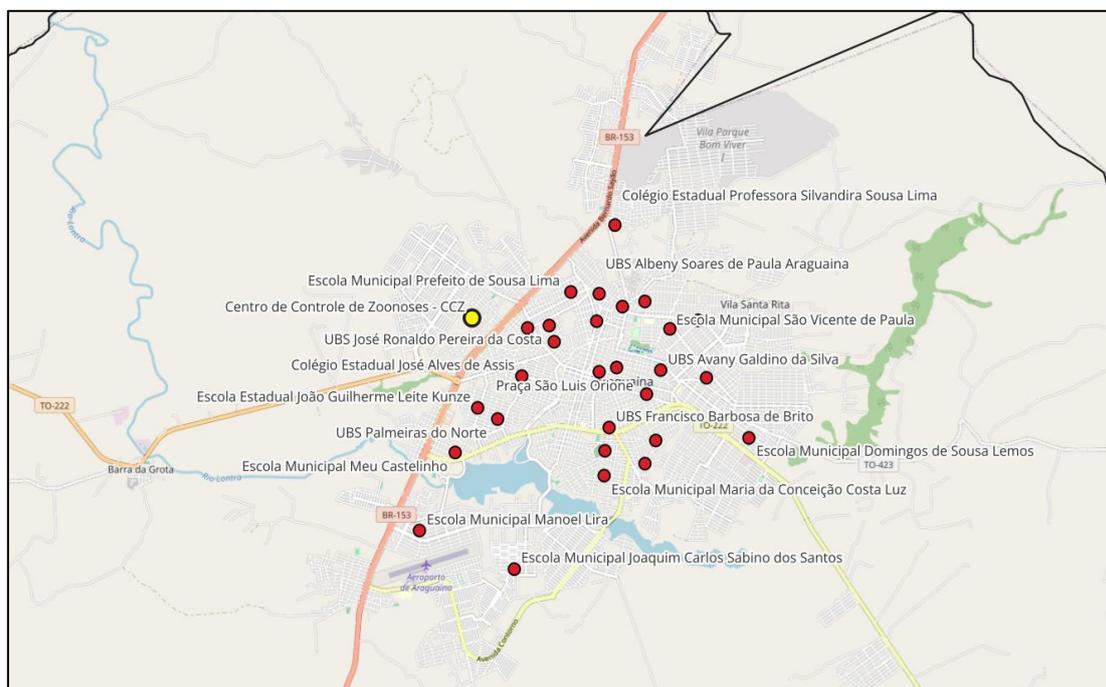
Essa combinação de ferramentas e métodos visa não apenas otimizar a roteirização, mas também garantir uma solução prática e eficiente para os desafios logísticos enfrentados no contexto da pesquisa.

## RESULTADOS

Conforme informações fornecidas pela Secretaria de Saúde de Araguaína e pelos funcionários que organizaram o evento, inicialmente foram distribuídos 8 frascos de vacinas para cada posto de vacinação. Cada frasco contém 25 doses, permitindo que cada local atendesse até 200 animais domésticos, incluindo cães e gatos. O atendimento ao público foi programado para iniciar às 8:00 horas e encerrar às 16:00 horas, funcionando de maneira contínua, com revezamento entre os trabalhadores durante o horário do almoço.

Os locais de atendimento foram selecionados estrategicamente, conforme ilustrado na Figura 2, com o objetivo de maximizar o alcance da população da cidade e facilitar a conexão entre o depósito central (ponto amarelo) e as demais localidades (pontos vermelhos). Essa estratégia visou garantir que a campanha de vacinação fosse acessível e eficiente, atendendo às necessidades da comunidade local.

Figura 2 - Localização dos 29 postos de vacinação

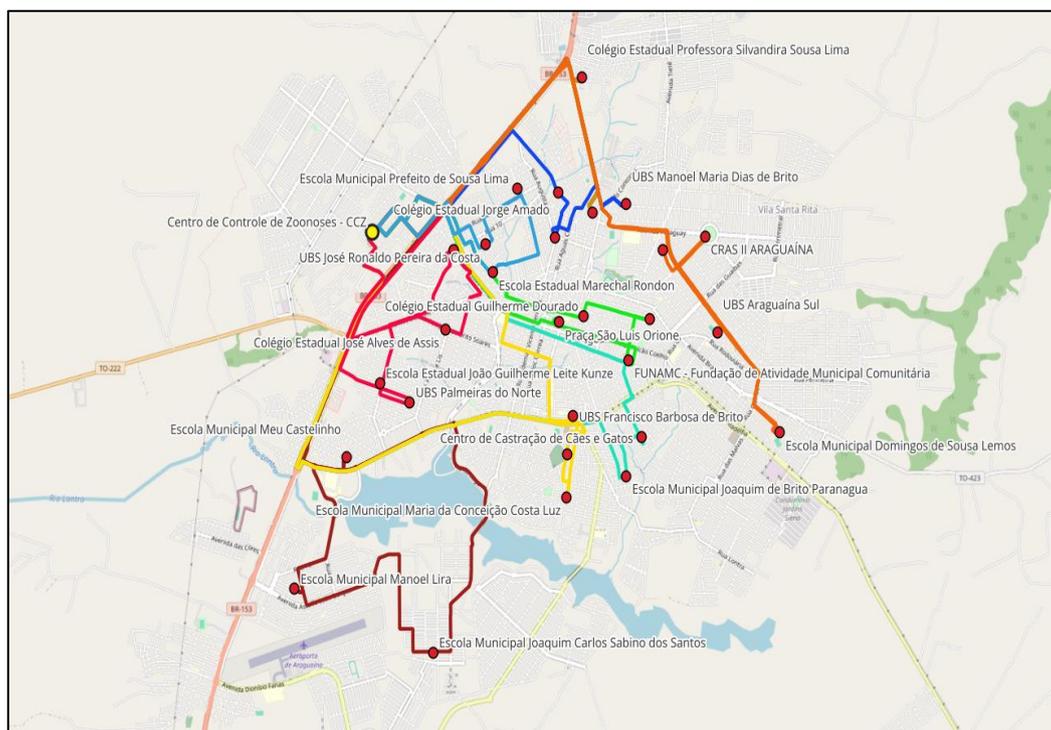


Fonte: Autores (2024).

A divisão dos locais de atendimento realizada pelo CCZ foi baseada na proximidade dos bairros, com cada equipe realizando um percurso cíclico entre seus pontos designados e o depósito central. É possível perceber que o depósito do CCZ se encontra em uma região afastada dos demais pontos, a noroeste do perímetro urbano. Isso dificulta a distribuição e aumenta os custos associados ao processo. Os organizadores determinaram uma quantidade de 200 doses por ponto de atendimento como uma estratégia de previsão de demanda, considerando que a última campanha de vacinação ocorreu em 2018.

Embora a intenção fosse garantir que os locais não ficassem completamente desabastecidos, foi necessário realizar reabastecimentos ao longo do dia, pois a demanda superou as expectativas em todos os postos. A Figura 3 ilustra as rotas percorridas por cada veículo, conforme planejado pelo CCZ, evidenciando a logística implementada para atender à população de forma eficiente.

Figura 3 - Roteirização utilizada pelo CCZ



Fonte: Autores (2024).

A análise revela a utilização de 9 rotas diferentes para o abastecimento dos postos de atendimento, totalizando uma distância percorrida de 140 km, considerando apenas uma viagem por rota. O tempo médio para completar os trajetos é de 266 minutos. O estudo exploratório realizado identificou uma capacidade heterogênea entre os veículos disponíveis. No entanto, para viabilizar o modelo, foi adotada uma capacidade padrão de 60 frascos para todos os veículos. Além dos frascos de vacina, outros insumos relacionados à vacinação, como coleiras, luvas e seringas, também precisavam ser enviados aos postos.

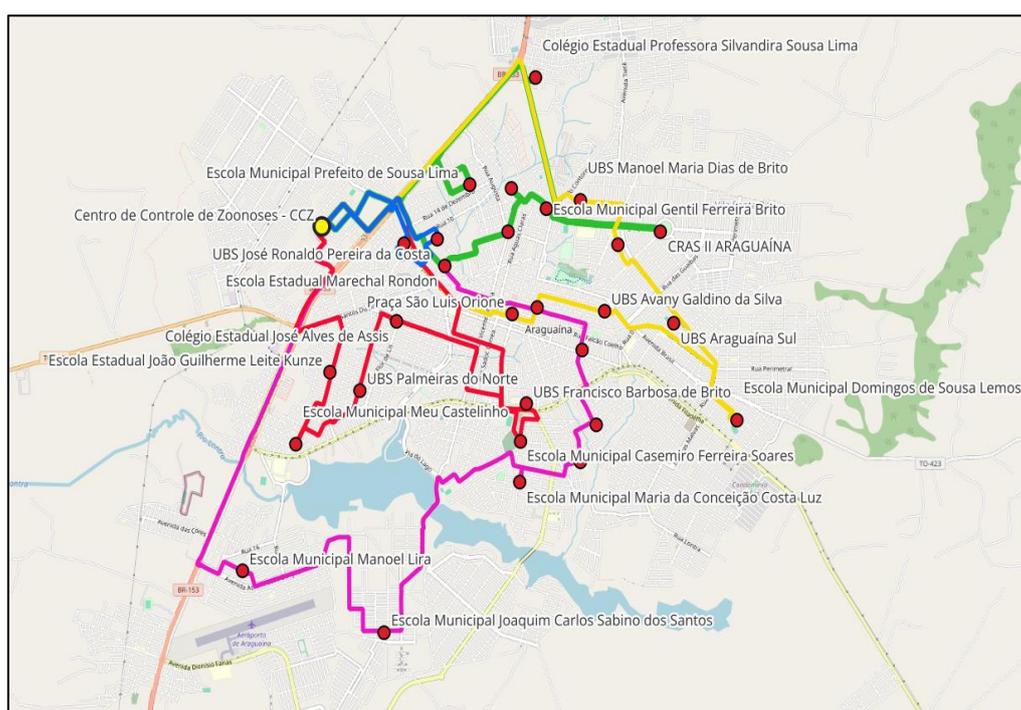
Uma nova oportunidade de redução dos custos de transporte seria transferir o depósito central do CCZ para uma região mais centralizada em relação aos postos de atendimento do município. Porém, para isso seria necessário um novo planejamento de localização de instalações, que também poderia ser realizado utilizando modelagem matemática.



no mesmo período, proporcionando um serviço mais ágil e satisfatório para os usuários dos serviços do CCZ.

Essas reduções na quilometragem e nos tempos de deslocamento impactam diretamente nos custos operacionais, resultando em economia de combustível, diminuição do desgaste dos veículos e uma readequação da equipe responsável pela operação dos veículos. Assim, garantiu-se um impacto positivo nos custos da campanha. Entretanto, devido a razões técnicas relacionadas ao número de variáveis do modelo, o *OpenSolver* não conseguiu encontrar uma solução ótima, apresentando apenas uma solução factível que atendia às restrições estabelecidas. Em decorrência disso, foi necessário aplicar o algoritmo *2-opt* para aprimorar a rota, conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5 - Roteirização após melhoria utilizando o *2-opt*



Fonte: Autores (2024).

Em relação à rota aprimorada, observa-se que as 5 rotas permanecem, com a única alteração ocorrendo no percurso da rota 4. Essa modificação resultou em uma distância total de 83,0 km e tempo médio de percurso de 173 minutos, representando uma redução no

percurso de aproximadamente 1,2% em comparação ao modelo do PRV e de 40,7% em relação ao modelo atualmente utilizado no município. Esses resultados evidenciam a eficácia dos modelos propostos e corroboram outros estudos na literatura que destacam o impacto positivo dos métodos quantitativos de planejamento logístico nas organizações. A Tabela 1 apresenta uma comparação entre os resultados obtidos e o modelo atual.

Tabela 1 - Comparação dos resultados

| <b>Modelo</b> | <b>Trajetos (km)</b> | <b>Tempo (minutos)</b> | <b>Varição no Trajeto</b> | <b>Rotas</b> | <b>Varição no nº de rotas</b> |
|---------------|----------------------|------------------------|---------------------------|--------------|-------------------------------|
| Atual         | 140,0                | 266                    | -                         | 9            | -                             |
| PRV           | 84,0                 | 175                    | -40,0%                    | 5            | -44,4%                        |
| <i>2-opt</i>  | 83,0                 | 173                    | -40,7%                    | 5            | -44,4%                        |

Fonte: Autores (2024).

A aplicação desses métodos de roteirização em outros setores da rede de abastecimento e distribuição do CCZ tem o potencial de reduzir custos e aprimorar a eficiência operacional do centro. Isso não apenas garantirá uma melhoria no nível de satisfação dos usuários, mas também contribuirá para a diminuição dos gastos operacionais. Adicionalmente, o baixo custo de implementação das soluções testadas não afetará negativamente o orçamento do centro, servindo como um incentivo adicional para sua adoção.

## CONCLUSÕES

O presente artigo, por meio de etapas de busca, análise e execução de dados, alcançou com sucesso o objetivo de gerar rotas para otimizar a distribuição física dos materiais utilizados pelo Centro de Controle de Zoonoses de Araguaína - TO, visando atender a população local durante a campanha municipal de imunização de animais. Através do fornecimento de informações sobre a demanda nos postos e da organização administrativa, foi possível desenvolver uma proposta mais econômica, apoiada por

métodos matemáticos da Pesquisa Operacional e literatura especializada em transportes e roteirização. Esse processo de pesquisa demonstrou que a nova abordagem de roteamento pode impactar positivamente na redução dos custos logísticos para o município.

Apesar das dificuldades em estabelecer uma capacidade exata para os veículos utilizados, devido à variabilidade nas demandas das localidades e à diversidade dos modelos de automóveis, o roteamento foi considerado um sucesso. Isso se deveu à estimativa média da demanda. Utilizando modelos matemáticos, foi realizada uma simulação de rota que, embora não tenha sido uma solução ótima, respeitou todas as variáveis e restrições estabelecidas.

A solução proposta tem potencial para reduzir os custos aos cofres públicos relacionados ao transporte no caso estudado. Além disso, pode contribuir para a disseminação do conhecimento sobre técnicas de otimização nas organizações, uma vez que a logística, embora essencial em diversos contextos, ainda não recebeu a atenção necessária tanto no setor privado quanto no público. Apresentar um roteiro que minimize gastos públicos — especialmente em manutenção de veículos e consumo de combustível — é uma maneira eficaz de demonstrar como a otimização da roteirização pode beneficiar a economia local.

A pesquisa evidenciou uma significativa intersecção entre a geografia e as questões sociais do município, destacando como as condições das ruas e rodovias influenciam diretamente a eficiência do sistema público de controle de zoonoses. Essa relação é um fator determinante na agilidade da entrega de insumos essenciais, especialmente no município em foco, que se configura como um polo de referência na região Norte do Brasil.

As características geográficas de Araguaína, incluindo sua localização estratégica entre rotas de transporte importantes e a presença de diversos postos de atendimento ao cidadão, demandam um planejamento logístico que leve em consideração não apenas a otimização das rotas, mas também a infraestrutura existente.

Dessa forma, a pesquisa não apenas aborda a necessidade de melhorias na logística pública, mas também ressalta a importância de políticas que integrem o desenvolvimento

urbano à saúde pública. Isso é fundamental para garantir que todos os cidadãos tenham acesso adequado aos serviços essenciais, independentemente das condições geográficas e econômicas que enfrentam.

Para futuras pesquisas nesse contexto, que busquem atender uma população específica, existem diversas possibilidades para otimizar as rotas utilizadas. Isso inclui a escolha de veículos com maior capacidade e a seleção de locais estratégicos que possam facilitar conexões mais eficientes com o centro de distribuição. Dessa forma, na próxima campanha, será possível atender os consumidores finais com maior eficiência, garantindo a disponibilidade das vacinas antirrábicas nas quantidades e momentos adequados.

## REFERÊNCIAS

- BALLOU, H. R. *Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos/logística empresarial*. 5. ed. Porto Alegre: BOOKMAN, 2006.
- BECKEDORFF, I. A. *Logística de Suprimentos e Distribuição*. Indaial: 2013.
- BELFIORE, P.; FÁVERO, L. P. *Pesquisa operacional para cursos de administração, contabilidade e economia*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.
- BRANCO, F. J. C.; GIGIOLI, O. A. Roteirização de transporte de carga Estudo de caso: distribuidora de tintas e seu método de entregas. *Revista da FAE*, v. 17, n. 2, p. 56-81, 2014.
- BRASIL – Ministério da Saúde. *Manual de Rede de Frio do Programa Nacional de Imunizações*. 5. ed. Brasília: Ministério da saúde, 2017.
- BRASIL – Ministério da Saúde. *Raiva Humana*. Gov.br, 22/05/2023. Disponível em: <https://www.gov.br/saude/pt-br/assuntos/saude-de-a-a-z/r/raiva/raiva-humana>. Acesso em: 10 abr. 2024.
- BRASIL – Ministério da Saúde. *Raiva: saiba como prevenir a doença*. Gov.br, 31/10/2022. Disponível em: [https://www.gov.br/pt-br/noticias/saude-e-vigilancia-sanitaria/2022/copy\\_of\\_08/raiva-saiba-como-prevenir-a-doenca](https://www.gov.br/pt-br/noticias/saude-e-vigilancia-sanitaria/2022/copy_of_08/raiva-saiba-como-prevenir-a-doenca). Acesso em: 07 abr. 2024.
- BRÄYSY, O.; GENDREAU, M. *Vehicle Routing Problem with Time Windows, Part I: Route Construction and Local Search Algorithms*. *Transportation Science*, v.39, n.1, p. 1-16, 2005.
- BRESSAN, G.M.; CAMPOS, L. A. O. Otimização de problemas de roteamento de veículos: soluções heurísticas, C.Q.D. – *Revista Eletrônica Paulista de Matemática*. v. 18, p. 60-76, 2020.
- CARANDINA, G. *A evolução do Transporte*. NTC & Logística, 10/07/2019. Disponível em: <https://www.portalntc.org.br/a-evolucao-do-transporte/>. Acesso em: 05 abr. 2024.

- CROES, G. A. *A Method for Solving Traveling-Salesman Problems*. **Operations Research**, v. 6, n. 6, pp. 791-812, 1958.
- CUNHA, C. B. Aspectos práticos da aplicação de modelos de roteirização de veículos a problemas reais. *TRANSPORTES*, v. 8, n. 2, p. 2-22, 2000.
- DIAS, N.C. *Canais de distribuição*. 1. ed. Brasília: NT editora, 2014.
- FLEURY, P. F.; WANKE, P.; FIGUEIREDO, K. F. *Logística empresarial: A perspectiva brasileira*. 1. ed. São Paulo: Atlas, 2000.
- FRANCO, David G. B.; STEINER, Maria T. A. Otimização do transporte de resíduos sólidos urbanos no Estado do Paraná: repensando a localização de aterros sanitários com base em modelagem matemática. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 27, n. 5, pp. 987-993, 2022.
- FRANCO, David G. B.; STEINER, Maria T. A.; FERNANDES, Rafaela P.; NASCIMENTO, Victor F. *Modeling municipal solid waste disposal consortia on a regional scale for presente and future scenarios*. *Socio-Economic Planning Sciences*, v. 82, Parte B, 101333, 2022.
- GALVÃO, R. D. *et al.* Roteamento de veículos com base em sistemas de informação geográfica. *Gestão & Produção*, v. 4, n. 2, p. 159-174, 1997.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Cidades e Estados*. Gov.br. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/to/araguaina.html>. Acesso em: 26 abr. 2024.
- 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 & Produção*, v. 23, n. 1, p. 165-176, 2015.
- NOVAES, G. A. *Logística e gerenciamento da cadeia de distribuição: Estratégia, operação e avaliação*. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2021.
- SAMPAIO, A. R. S.; FRANCO, D. G. B.; ZUKOWSKI JUNIOR, J. C.; SPADA, A. B. D. *Artificial intelligence Applied to truck emissions reduction: A novel emissions calculation model*. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 138, 104533, 2025.
- SEPLAN – TO. Secretaria do Planejamento e Orçamento do Estado do Tocantins. *GEOPORTAL SEPLAN*. Palmas, 2024. Disponível em: <https://geoportal.to.gov.br/gvsigonline/>. Acesso em: 28 out. 2024.
- TOTH, P.; VIGO, D. *The Vehicle Routing Problem*. Philadelphia: SIAM, 2002.
- TOTVS, E. *Roteirização: como funciona, tipos e benefícios*. Totvs.com, 01/08/2023. Disponível em: <https://www.totvs.com/blog/gestao-logistica/roteirizacao/>. Acesso em: 12 abr. 2024.
- WIKIPÉDIA. *Araguaína*. Flórida: Wikimedia Foundation, 2023. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Aragua%C3%ADna&oldid=67131342>. Acesso em: 04 mai. 2024.