



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO

INSTITUTO TRÊS RIOS

CURSO DE ADMINISTRAÇÃO

**ESTUDO DE CASO: A OTIMIZAÇÃO DE ROTAS DE TRANSPORTE EM UMA
EMPRESA DE LATICÍNIOS**

CÉSAR AUGUSTO LEITE DE CARVALHO

Orientador: **Reinaldo Ramos Silva**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido como
requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel
em Administração no campus Três Rios da
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

Três Rios - RJ

2025

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C331e Carvalho, César Augusto Leite de, 2000-
 Estudo de caso: a otimização de rotas de transporte
 em uma empresa de laticínios / César Augusto Leite de
 Carvalho. - Três Rios, 2025.
 37 f.: il.

 Orientador: Reinaldo Ramos Silva. Trabalho de
 conclusão de curso (Graduação). -- Universidade Federal
 Rural do Rio de Janeiro, Bacharelado em Administração,
 2025.

 1. Otimização combinatória. 2. Pesquisa operacional.
 3. Transporte de carga. 4. Logística. I. Silva,
 Reinaldo Ramos, 1982-, orient. II Universidade
 Federal Rural do Rio de Janeiro. Bacharelado em
 Administração III. Título.



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
COORDENAÇÃO DO CURSO DE GRADUAÇÃO EM
ADMINISTRAÇÃO/ITR**



CADASTRO Nº 1038 / 2025 - CoordCGAdm/ITR (12.28.01.00.00.00.12)

Nº do Protocolo: 23083.066832/2025-88

Seropédica-RJ, 17 de novembro de 2025.



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO,
INSTITUTO DE DE TRÊS RIOS
CURSO DE BACHARELADO EM ADMINISTRAÇÃO**

**ESTUDO DE CASO: A OTIMIZAÇÃO DE ROTAS DE TRANSPORTE EM UMA EMPRESA DE
LATICÍNIOS**

CESAR AUGUSTO LEITE DE CARVALHO

Trabalho de Conclusão de
Curso apresentado como pré-requisito parcial
para obtenção do título de bacharel
em Administração, Instituto Três Rios da
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

Aprovado em 12/11/2025

Banca examinadora:

(Assinado digitalmente em 19/11/2025 11:24)

MARCIO DE LIMA DUSI
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DeptCAdmS (12.28.01.00.00.00.16)
Matrícula: 1735014

(Assinado digitalmente em 18/11/2025 11:37)

REINALDO RAMOS SILVA
CHEFE DE DEPARTAMENTO - TITULAR
DeptCAdmS (12.28.01.00.00.00.16)
Matrícula: 1945259

(Assinado digitalmente em 18/11/2025 14:20)

TATIANA LADEIRA VIDAL
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DeptCAdmS (12.28.01.00.00.00.16)
Matrícula: 1197426

AGRADECIMENTOS

Eu agradeço, primeiramente, a Deus por ter me dado o dom da vida, determinação, força e coragem para superar todos os desafios.

Aos meus pais e minha família, meu maior tesouro. Que sempre me incentivaram e me apoiaram em todo o processo de formação na universidade.

Ao meu professor e orientador, Reinaldo, por ter incentivado e impulsionado a escolha do tema que sabíamos que não seria fácil, mas que deu todo o apoio para que fosse realizado.

Aos meus amigos, que foram fundamentais na minha caminhada pela universidade. Alguns já se formaram, alguns ainda não, outros seguiram caminhos diferentes. Muito obrigado pelas inesquecíveis experiências, e que Deus continue abençoando todos grandemente.

Aos docentes por todos os ensinamentos e conselhos dados ao longo desses anos.

Aos demais funcionários do Instituto Três Rios pelas contribuições diretas e indiretas para esta caminhada.

Amo vocês!

*"Cada passo dado com propósito faz da jornada
uma obra-prima."*

Friedrich Nietzsche

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo otimizar a rota de coleta de leite no campo, buscando reduzir os custos logísticos e os impactos ambientais associados ao transporte. Para isso, foi aplicado o modelo do Problema do Caixeiro Viajante (PCV) em uma indústria de laticínios situada na região Sudeste do Brasil, utilizando dados reais de coleta. A metodologia adotada envolveu a análise da rota então utilizada e a simulação de uma rota otimizada, com base em distâncias geográficas e volume de leite transportado. Os resultados obtidos demonstraram uma redução de 12 km na rota total, representando uma economia anual estimada de R\$ 10.284,84 e uma diminuição média de 4 litros de combustível consumidos por dia, equivalentes a aproximadamente 720 litros por ano. Além dos ganhos econômicos, observou-se a redução nas emissões de gases poluentes e a melhoria operacional do processo, devido à menor perda de temperatura do leite durante o transporte. O estudo também reconhece limitações, como a ausência de janelas de tempo específicas e o uso de médias de consumo de combustível. Para pesquisas futuras, recomenda-se a aplicação de técnicas avançadas de otimização e a integração de tecnologias IoT e sistemas de monitoramento em tempo real, visando aprimorar a eficiência e a sustentabilidade da cadeia logística do leite no cenário nacional.

Palavras-Chaves: Otimização de rotas; Problema do Caixeiro Viajante; Logística sustentável; Transporte de leite; Economia de combustível;

ABSTRACT

This study aimed to optimize the milk collection route in the field, seeking to reduce logistical costs and environmental impacts associated with transportation. To this end, the Traveling Salesman Problem (TSP) model was applied to a dairy industry located in the Southeast region of Brazil, using real collection data. The methodology involved analyzing the route then in use and simulating an optimized route based on geographical distances and the volume of milk transported. The results showed a reduction of 12 km in the total route, representing an estimated annual savings of R\$ 10,284.84 and an average reduction of 4 liters of fuel consumed per day, equivalent to approximately 720 liters per year. In addition to the economic gains, a reduction in pollutant emissions and an operational improvement in the process were observed, due to less temperature loss in the milk during transport. The study also addresses limitations, such as the lack of specific time windows and the use of fuel consumption methods. For future research, the application of advanced optimization techniques and the integration of IoT technologies and real-time monitoring systems are recommended, improving the efficiency and sustainability of the milk logistics chain in the national context.

Key-words: Route optimization; Traveling Salesman Problem; Sustainable logistics; Milk transport; Fuel economy;

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Cadeia de produção do leite.....	11
FIGURA 2 - Etapas metodológicas da pesquisa.....	27
FIGURA 3 - Processo de cálculo de otimização da rota.....	30
FIGURA 4 - Representação cartográfica da rota.....	31
FIGURA 5 - Trecho alternativo inserido.....	31

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Matriz de distâncias.....	29
TABELA 2 – Comparativo da rota antes da otimização e após.....	32

LISTA DE ABREVIACÕES

AISI - American Iron and Steel Institute
ANTT - Agência Nacional de Transportes Terrestres
CBT - Contagem Bacteriana Total
CIP - *Cleaning In Place*
EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
GEE - Gases de Efeito Estufa
GOV - Governo Federal
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IN - Instrução Normativa
IoT - *Internet of Things*
IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MPC - Ministério Público de Contas
NN - *Nearest Neighbor*
PCV - Problema do Caixeiro Viajante
PIB - Produto Interno Bruto

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
2. PROBLEMÁTICA.....	14
3. OBJETIVOS.....	16
3.1 Objetivo geral.....	16
3.2 Objetivos específicos.....	16
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
5. METODOLOGIA.....	24
5.1 Procedimentos metodológicos.....	24
6. DESENVOLVIMENTO.....	28
7. CONCLUSÃO.....	33
8. REFERÊNCIAS.....	35

1 INTRODUÇÃO

O mercado do leite no Brasil desempenha um papel na economia do país. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o setor representou 3,2% do PIB no terceiro trimestre de 2023 com valor aproximado de 86,4 bilhões de reais (PIB 2,7 trilhões no período), sendo um dos setores mais importantes da agropecuária nacional. Com uma produção de leite que cresce anualmente, o Brasil é um dos maiores produtores e consumidores de leite do mundo, sendo o quarto maior produtor e o quinto maior consumidor segundo Siqueira e Carvalho (2021).

A produção de leite no Brasil alcançou aproximadamente 35,3 bilhões de litros em 2021 (IBGE, 2022), distribuindo-se por grande parte do território nacional. As regiões Sudeste, Centro-Oeste e Sul se destacam como principais polos produtores, com ênfase para os estados de Minas Gerais, Goiás, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul segundo a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2023). Entretanto, é possível observar uma concentração produtiva relevante, visto que essas áreas respondem por cerca de 43,37% da produção nacional, ainda que tenham apresentado redução de 0,63% em relação a 2020 (EMBRAPA, 2023). Diante desse cenário, se torna estratégico para as indústrias de laticínios se instalarem nessas regiões, em razão do volume produzido, da densidade de captação e da infraestrutura disponível, fatores que otimizam os custos logísticos e reduzem despesas com transporte. Assim, além do setor de laticínios se evidenciar como peça importante na economia, é válido caracterizá-lo como sendo composto por uma cadeia produtiva complexa, que envolve desde a produção nas fazendas até a distribuição de produtos lácteos nas prateleiras dos supermercados. A figura 1 a seguir ilustra essa cadeia produtiva do leite exemplificando as principais etapas envolvidas no processo.

Figura 1 - Cadeia de produção do leite



Fonte: Adobe Stock (2024)

Além disso, a indústria de lácteos brasileira tem se destacado pela diversificação dos produtos, incluindo leite, leite em pó, queijo e iogurtes atendendo à demanda por alimentos lácteos. A produção de leite brasileira é marcada por uma grande diversidade, com os pequenos produtores rurais convivendo com as grandes empresas, o que influencia o movimento dinâmico do mercado. Nesse contexto, segundo a Pesquisa Trimestral do Leite do IBGE (2023), mesmo diante dessa dinâmica produtiva, o setor enfrenta desafios significativos, como a flutuabilidade dos preços do leite, que está diretamente ligado ao incentivo à produção. A aquisição de leite cru realizada pelos estabelecimentos sob inspeção apresentou retração no 1º trimestre de 2023, registrando queda de 71,36 milhões de litros em comparação ao mesmo período de 2022. Esse movimento evidencia a volatilidade estrutural da captação nacional e reforça a sensibilidade do setor às oscilações de mercado e aos fatores conjunturais que afetam diretamente a oferta e a competitividade dos produtores rurais (IBGE, 2023). Silva (2023) aponta que essa queda decorre de um conjunto de fatores, como:

- O abandono da atividade produtiva (partindo de 2021);
- A mudança crescente de parte do sistema produtivo do gado para confinamento, que exige maior volume de insumos alimentares;
- Chuvas fortes na região Sudeste, que deixam pastos extremamente úmidos dificultando o acesso aos produtores entre outras dificuldades;
- A inflação e o aumento dos preços dos combustíveis.

Assim, ao evidenciar questões como acesso e o preço dos combustíveis, por exemplo, o transporte de leite cru desempenha um papel fundamental na cadeia de produção de laticínios no Brasil. Dessa forma, a empresa a qual esse estudo de caso é direcionado tem importância para o fornecimento dos dados que serão utilizados uma vez que ela faz uso dessa modalidade de transporte.

A empresa em questão se faz presente no ramo de laticínios como sendo uma grande indústria do setor lácteo, contando com mais de 1000 colaboradores diretos. Possui um portfólio superior a 100 produtos, distribuídos em suas marcas e suas unidades fabris que operam com capacidade produtiva de mais de 5 milhões de litros de leite por dia.

A indústria láctea escolhida está situada na região Sudeste do Brasil, tendo sua

localização estrategicamente privilegiada devido ao acesso à rodovia BR 040, que faz ligação do Rio de Janeiro com os estados de Minas Gerais e Goiás, além de dar acesso a outras que ligam o país inteiro. A região onde se situa a empresa não possui grande quantidade de produtores relativamente próximos, isso é devido ao fato de outros produtores mais próximos pertencerem ao quadro de fornecedores de concorrentes da mesma região. Com isso, o transporte da matéria prima tem importância e grande impacto no processo produtivo, devendo ocorrer da forma mais otimizada possível. Para isso, os veículos percorrem grandes distâncias, dentre elas, algumas contam com difícil acesso por se tratar de zonas rurais, devendo atentar-se à economia de recursos e minimização de riscos.

2 PROBLEMÁTICA

O setor de transporte é responsável por uma parte significativa das emissões de gases de efeito estufa. Segundo o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2011), o setor de transporte responde por cerca de 20% das emissões globais de dióxido de carbono (CO₂), e a busca por soluções que reduzam o consumo de combustível tem se intensificado, tanto por razões econômicas quanto ambientais.

Múltiplos elementos impactam o gasto de combustível na captação de leite cru, incluindo o modelo do veículo, as condições das vias de acesso, a capacidade de carga e a eficiência das operações de coleta (Correia *et al.*, 2012). Gerenciar esses componentes é fundamental para aprimorar a economia energética e minimizar despesas.

A economia de combustível no transporte de leite cru não apenas reduz os custos operacionais das empresas, mas também contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para a sustentabilidade ambiental do setor de transporte. De acordo com o IPEA, quanto maior a distância percorrida, maior a quantidade de gases de efeito estufa (GEE) lançados na atmosfera (IPEA, 2011).

A adoção de boas práticas de logística e roteirização pode reduzir a distância percorrida, o tempo de viagem e o consumo de combustível. Além disso, a otimização das rotas pode minimizar o tempo ocioso dos veículos e evitar deslocamentos desnecessários, sendo área de estudo crucial em logística e transporte, visando encontrar os trajetos mais eficientes para minimizar custos, tempo e recursos utilizados como discutido por Costa Pereira *et al.* (2024), que abordam a otimização de rotas através de algoritmos genéticos.

Arelado ao consumo de combustível, também pode-se ressaltar as condições específicas da coleta de leite cru. No transporte primário, o veículo inicia sua rota vazio e retorna ao ponto de origem carregado, o que altera a dinâmica tradicional de transporte e influencia diretamente a forma como a roteirização é planejada e executada. Esse tipo de operação requer atenção especial ao planejamento logístico e às restrições de capacidade, já que a carga cresce progressivamente ao longo do percurso (Belfiore; Fávero, 2007). Tal característica também se relaciona com o modelo clássico de transporte, em que as restrições de oferta e demanda determinam os fluxos ótimos entre fontes e destinos (Amaral; Almeida; Morabito, 2012).

É possível observar também, a diferença na quantidade de leite produzido pelos

produtores presentes na base durante o chamado “período das águas” que, conforme Heinemann *et al.*, 2019, se inicia no período entre o fim de setembro e o começo do mês de novembro, e se encerra entre o fim de março e a primeira metade do mês de abril. O aumento da produção no período das águas implica a necessidade de que as linhas sejam refeitas, pois alguns produtores que possuíam coletas a cada 48 horas passam a ser coletados diariamente, no formato de 24 horas.

Um fator também crucial no planejamento é a significativa diferença de escala de produção entre os produtores, que variou de 80 a 4.000 litros por dia. Ao final das coletas, essa diferença faz com que as rotas apresentem volumes totais de 40.000 a 60.000 litros por dia. Essa dessemelhança pode impactar diretamente o processo de criação de rotas, uma vez que veículos com diferentes capacidades de transporte necessitam de ajustes específicos na modelagem logística. De acordo com Lachtermacher (2007), nos problemas de transporte e roteirização, a capacidade dos veículos é uma das restrições mais relevantes do modelo, devendo ser considerada na definição das rotas para equilibrar a demanda dos pontos de coleta e otimizar a utilização dos recursos disponíveis. Da mesma forma, Taha (2008) reforça que os modelos de transporte e roteamento devem considerar o equilíbrio entre oferta e demanda, uma vez que a limitação de capacidade influencia diretamente a viabilidade e a eficiência das soluções obtidas.

Essas dificuldades ressaltam a importância de investir em infraestrutura e tecnologia para melhorar a logística de coleta de leite em áreas rurais, além de buscar soluções que promovam a eficiência operacional e a sustentabilidade econômica e ambiental do setor.

Em resumo, a busca pela economia de combustível no transporte de leite cru é fundamental para a competitividade das empresas na redução dos impactos ambientais e a sustentabilidade do setor de laticínios; a implementação de tecnologias, estratégias e boas práticas pode proporcionar benefícios econômicos e ambientais significativos a longo prazo. (Martins *et al.*, 2004)

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é propor uma estratégia de otimização logística para o transporte de leite cru, visando a redução do consumo de combustível e a melhoria da eficiência das rotas de coleta.

3.2 Objetivos Específicos

A análise apresentada incluiu a avaliação dos ganhos potenciais relacionados à redução do consumo de combustível e ao aumento da eficiência operacional, destacando as implicações práticas decorrentes da implementação da estratégia proposta. Conforme Belfiore e Fávero (2007), a Pesquisa Operacional contribui de forma significativa para o processo de tomada de decisão ao permitir que sistemas reais sejam representados por modelos matemáticos capazes de otimizar o desempenho de processos logísticos e produtivos. A aplicação de modelos robustos, fundamentados em dados reais, garante maior precisão na análise e no planejamento das operações, favorecendo decisões mais racionais e sustentáveis. Nesse contexto, Lachtermacher (2007) ressalta que a utilização da modelagem matemática na Pesquisa Operacional possibilita transformar informações complexas em soluções quantitativas, que orientam ações práticas e viáveis. Assim, ao estruturar a pesquisa de maneira sistemática e baseada em evidências empíricas, o estudo contribui para o avanço do conhecimento na área de logística agrícola e transporte sustentável, reforçando a importância da integração entre teoria e aplicação.

Para alcançar o objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Realizar o levantamento da rota atualmente utilizada para a coleta de leite cru,
- Analisar possíveis alternativas de rotas para a coleta, considerando dados geográficos e operacionais visando ampliar as opções disponíveis para o transporte, permitindo a exploração de caminhos mais eficientes e economicamente viáveis.
- Aplicar o modelo do Problema do Caixeiro Viajante (PCV) para otimizar a sequência das visitas às fazendas.
- Apresentar a estratégia de otimização proposta, comparando a rota atual com as rotas otimizadas obtidas por meio do modelo computacional.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O processo de coleta de leite no campo é uma etapa que compõe a cadeia de suprimentos lácteos, garantindo que o leite seja coletado de maneira eficiente, segura e higiênica das fazendas e entregue às instalações de processamento nas condições adequadas para preservar sua qualidade. Para isso, o órgão responsável por regulamentar e ditar as normas responsáveis por essa modalidade é o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA).

Em 30 de maio de 2019, entrou em vigor a nova legislação para o setor, conforme informado no portal do Governo Federal (GOV), revogando assim a Portaria DILEI/SIPA/SNAD/MA nº 08, de 26 de junho de 1984; a Instrução Normativa nº 51, de 18 de setembro de 2002; a Instrução Normativa SDA/MAPA nº 22, de 07 de julho de 2009; a Instrução Normativa nº 62, de 29 de dezembro de 2011; a Instrução Normativa nº 07, de 03 de maio de 2016; e a Instrução Normativa nº 31, de 29 de junho de 2018. A partir daí, os produtores rurais e as indústrias de produtos lácteos tiveram de se atentar para as duas novas regulamentações: Instrução Normativa nº 76, de 26 de novembro de 2018 (IN 76) e Instrução Normativa nº 77, de 26 de novembro de 2018 (IN 77) (Brasil, 2018a; Brasil, 2018b).

Partindo dos princípios estabelecidos pelas ditas IN 76 e 77, pode-se descrever os principais aspectos do processo de coleta de leite no campo como:

A empresa de laticínio em questão possui horários específicos para o início da coleta de leite das fazendas. O agendamento é importante para garantir que o leite seja coletado e entregue às instalações de processamento dentro do tempo necessário para manter sua qualidade. Conforme apontado na IN 76, o recebimento do leite no estabelecimento deve ser de 7,0° C (sete graus Celsius), admitindo-se, excepcionalmente, o recebimento até 9,0° C (nove graus Celsius);

Os veículos de coleta de leite, como caminhões-tanque refrigerados, são preparados antes da coleta para garantir condições higiênicas e adequadas para o transporte do leite. Isso envolve a limpeza e esterilização dos tanques de armazenamento, bem como a verificação dos sistemas de refrigeração (Brasil, 2018b).

Um caminhão-tanque refrigerado é enviado às fazendas de onde o leite será coletado, e esse leite é retirado dos tanques de armazenamento das fazendas e transferido para o tanque do caminhão. Durante esse processo, é essencial garantir que o leite seja manuseado com

cuidado para evitar contaminação e preservar sua qualidade. (Brasil, 2018b).

Durante a coleta, amostras de leite são coletadas para análise de qualidade. Isso inclui testes tais como de temperatura, acidez, teor de gordura e contagem de células somáticas. Estes testes ajudam a garantir a conformidade com os padrões de qualidade e segurança alimentar presentes nas instruções normativas 76 e 77 do MAPA. E todas as informações relevantes sobre a coleta de leite, incluindo volume coletado, qualidade e origem, são registradas para rastreabilidade e controle de qualidade. Esses registros são usados para fins de rastreamento em caso de problemas de segurança alimentar ou qualidade.

Após a coleta, o caminhão-tanque refrigerado transporta o leite das fazendas para as instalações de processamento. Durante o transporte, é crucial manter o leite refrigerado para preservar sua qualidade e evitar a proliferação de bactérias (Brasil, 2018b). Ao chegar às instalações de processamento, o leite é descarregado do caminhão-tanque e armazenado em tanques de armazenamento refrigerados até ser processado. Esses tanques são projetados para manter o leite nas condições ideais até o processamento (Brasil, 2018a)

O transporte de leite cru é uma etapa crítica na cadeia produtiva de laticínios, influenciando diretamente a qualidade e segurança do produto final. Estudos indicam que o leite cru, por ser altamente perecível, é suscetível à contaminação bacteriana quando submetido a condições inadequadas de transporte ou higienização insuficiente (Ströher; Dos Santos Jr.; Nunes, 2024). O resfriamento do leite após a ordenha é fundamental pois temperaturas próximas de 4 °C retardam a multiplicação de bactérias, contribuindo para a manutenção de baixos níveis de contagem bacteriana total (CBT) e preservação das propriedades sensoriais e nutricionais do leite (Garlini *et al.*, 2024). Portanto, é crucial garantir condições ideais durante o transporte — como veículos limpos, tanques isotérmicos, controle de temperatura e higiene constante — para preservar suas características nutricionais e sensoriais, bem como sua inocuidade.

Como exemplo de alguns desafios enfrentados no transporte de leite cru, pode-se incluir a manutenção da temperatura adequada, prevenção da contaminação microbiológica, e minimização de impactos físicos que possam afetar a integridade do produto, por isso, conforme a IN 77, os veículos que realizam as coletas precisam atender às seguintes especificações:

O processo de coleta do leite cru refrigerado deve ser realizado diretamente na propriedade rural, utilizando veículo equipado com tanque isotérmico. A transferência do produto ocorre por meio de mangueira e bomba sanitárias em circuito fechado, ligadas diretamente ao tanque de refrigeração. Para assegurar a qualidade e a inocuidade do leite, todas as partes metálicas do carro-tanque que entram em contato com o produto devem ser fabricadas

em aço inoxidável austenítico da série AISI 300, material adequado para uso em alimentos e compatível com as substâncias higienizantes aplicadas em sua limpeza (Brasil, 2018b).

O veículo utilizado para o transporte de leite cru refrigerado deve atender a requisitos técnicos específicos que garantam a segurança e a qualidade do produto durante o transporte, conforme estabelecido pela legislação vigente (Brasil, 2018b).

A mangueira utilizada na coleta do leite cru deve ser fabricada com material atóxico, adequado para contato com alimentos, e capaz de suportar o processo de higienização *Cleaning In Place* (CIP). Além disso, deve apresentar-se íntegra, com superfície interna lisa, e compor o conjunto de equipamentos do veículo, garantindo a manutenção da qualidade e da segurança do leite durante o transporte (Brasil, 2018b).

O veículo deve estar equipado com refrigerador ou caixa isotérmica confeccionada em material não poroso e de fácil limpeza, destinada ao transporte de amostras de leite. Essas amostras devem ser mantidas sem congelamento, em temperatura controlada de até 7,0 °C, até a chegada ao estabelecimento, garantindo a preservação de suas características físico-químicas e microbiológicas (Brasil, 2018b).

O veículo transportador de leite cru deve possuir dispositivos destinados à proteção das conexões, além de espaço adequado para armazenar os utensílios e equipamentos utilizados durante o processo de coleta, assegurando a higiene e a segurança do produto transportado (Brasil, 2018b).

A implementação de boas práticas de transporte — incluindo limpeza e desinfecção regular dos equipamentos, treinamento adequado dos motoristas e monitoramento constante das condições de transporte — é essencial para assegurar a qualidade e segurança do leite cru (Brasil, 2018b). Conforme Ströher, Dos Santos Jr. e Nunes (2024), muitos transportadores não atendem plenamente normas de boas práticas, especialmente relativas à higiene dos equipamentos e uniformização, o que pode comprometer a inocuidade do leite. Ademais, Ströher, Dos Santos Jr. e Nunes (2024) identificaram não conformidades em diversas rotas de coleta no Rio Grande do Sul, em itens ligados ao treinamento de transportadores, higiene das conexões e refrigeração inadequada, reforçando a necessidade de intervenções sistemáticas.

Após a coleta do leite, a refrigeração imediata é uma prática comum para retardar o crescimento de bactérias e a deterioração do leite. Isso é feito pelos tanques de refrigeração ou resfriadores de leite e esse leite é resfriado rapidamente para uma temperatura igual ou menor a 4°C (Brasil, 2018a).

A utilização de veículos especialmente projetados para o transporte de leite cru, equipados com sistemas de refrigeração eficientes e compartimentos higienizados, é

fundamental para garantir a integridade do produto. Esses veículos devem atender às normas sanitárias e de segurança estabelecidas pelo MAPA mencionadas anteriormente, como é o caso dos veículos utilizados pela empresa estudada.

Antes do armazenamento, o leite coletado no campo passa por testes de qualidade para garantir que esteja dentro dos padrões aceitáveis. Isso pode incluir testes de temperatura e testes de alizarol.

Teste do Álcool/Alizarol 72% v/v: prova físico-química executada por meio da adição e mistura de volumes iguais de leite e de uma solução de alizarol 72% v/v (1,2 dihidroxiantraquinona - alizarina - a 0,2 % m/v em álcool etílico com graduação alcoólica de 72% v/v neutralizado), realizando-se interpretação conforme aspecto assumido pela mistura (Brasil, 2018b).

Vale ressaltar que após a chegada do veículo na unidade, outras análises são realizadas pelo laticínio para verificação de acidez, presença de resíduos de antibióticos, entre outros.

Quanto à higiene e limpeza, manter os equipamentos de armazenamento limpos e higienizados é fundamental para evitar a contaminação do leite. Isso envolve práticas regulares de limpeza e desinfecção dos tanques de refrigeração, tubulações e outros equipamentos (Brasil, 2018b).

Em suma, o transporte de leite cru demanda cuidados especiais para garantir a qualidade e segurança do produto final. A adoção de tecnologias avançadas, veículos adequados e boas práticas de transporte são essenciais para minimizar riscos e preservar as características do leite cru até sua chegada à indústria de laticínios.

A coleta e o transporte de leite no campo enfrentam uma série de desafios específicos devido às condições variáveis do ambiente rural. No estado do Rio de Janeiro, a atividade leiteira apresenta caráter municipalizado, com múltiplos produtores distribuídos em diferentes cidades (IBGE, 2022). Isso significa que os veículos de coleta podem precisar percorrer longas distâncias para coletar leite de várias propriedades, o que aumenta os custos operacionais e logísticos.

As estradas rurais que, segundo o MAPA (2021), compõem 1,4 milhão de km (77% da rede rodoviária brasileira), nem sempre são adequadas para o tráfego de veículos pesados, especialmente durante épocas úmidas do ano, como períodos chuvosos, por exemplo (MAPA, 2021). Estradas mal conservadas, com buracos ou sem pavimentação, podem causar prejuízos diretos aos proprietários rurais e, indiretamente, à toda sociedade (MAPA, 2021). Dificultando assim o acesso às fazendas e aumentando o tempo de viagem e o desgaste dos veículos. Algumas fazendas leiteiras podem estar localizadas em áreas remotas ou de difícil acesso, como regiões montanhosas ou regiões com infraestrutura limitada, isso pode tornar a coleta de leite

ainda mais desafiadora.

Em regiões rurais, os produtores de leite frequentemente enfrentam rotinas de trabalho variáveis e, por vezes, imprevisíveis, o que impacta diretamente o planejamento das coletas e a eficiência logística. A quantidade de ordenhas diárias, as condições de armazenamento do leite e a distância entre as propriedades são fatores que exigem constantes ajustes nas rotas de coleta, tornando o processo mais dinâmico e complexo. De acordo com a Embrapa (2018), a heterogeneidade produtiva e as particularidades operacionais do meio rural impõem desafios à padronização das rotas, demandando soluções de otimização flexíveis e adaptadas à realidade local. Essa necessidade de replanejamento contínuo é reforçada por estudos que destacam a importância da integração entre tecnologia, gestão de transporte e sustentabilidade na cadeia do leite (Zhang *et al.*, 2021; EMBRAPA, 2018).

Como observado na empresa objeto deste estudo, esses desafios são gerenciados através da roteirização eficiente e do monitoramento constante das rotas de coleta, que podem ser afetadas por condições externas, como a infraestrutura das estradas e o volume de produção de cada fazenda.

Conforme expressado por Kazancoglu *et al.* (2022), esses desafios específicos destacam a importância de uma abordagem cuidadosa e adaptável na logística de coleta e transporte de leite no campo. Soluções inovadoras, como o uso de tecnologias de monitoramento remoto e veículos especializados, podem ajudar a superar esses obstáculos e garantir uma cadeia de suprimentos eficiente e sustentável para a indústria, especialmente em cadeias de suprimentos vulneráveis a interrupções, como a cadeia de suprimentos de laticínios.

Devido às condições adversas das estradas e ao uso intensivo dos veículos de coleta, os custos de manutenção podem ser mais elevados em áreas rurais de cascalho e não pavimentadas (MPC-658, 2018). Além disso, o aumento das distâncias percorridas e os tempos de viagem mais longos podem aumentar os custos operacionais, incluindo combustível e mão de obra. Por isso, o transporte de leite cru de alta qualidade pode ajudar a reduzir os custos operacionais e melhorar a eficiência geral da cadeia de suprimentos como discutido por Kazancoglu *et al.* (2022). Isso inclui a minimização de perdas de produto, o aumento da vida útil do leite e a redução dos custos de retrabalho devido a produtos não conformes.

O transporte de leite cru representa uma parcela expressiva dos custos operacionais da indústria láctea, pois envolve uma operação contínua e de alta demanda energética. Segundo Belfiore e Fávero (2007), a aplicação de modelos de otimização em logística e transporte permite reduzir custos em setores como o alimentício e de bebidas, onde o transporte é uma etapa crítica do processo produtivo. Nesse contexto, a economia de combustível torna-se um

fator essencial não apenas para a redução de custos diretos, mas também para a mitigação dos impactos ambientais decorrentes da emissão de gases poluentes. A otimização das rotas e da utilização dos veículos pode, portanto, contribuir significativamente para a eficiência energética e a sustentabilidade operacional (Arenales *et al.*, 2007). Assim, ao se abordar a economia de combustível no transporte de leite cru, é possível adotar estratégias de otimização inspiradas em modelos clássicos de programação linear e problemas de transporte, que buscam a minimização dos custos totais de deslocamento, respeitando as restrições de oferta e demanda (Belfiore; Fávero, 2007).

O modelo ao qual se dirigiu esse estudo, foi o que é conhecido como “O Problema do Caixeiro Viajante” (PCV) que se trata de uma abordagem clássica da otimização combinatória amplamente utilizada em aplicações logísticas para minimizar a distância total percorrida por um agente que deve visitar um conjunto de pontos e retornar à origem. O modelo visa encontrar o caminho hamiltoniano de menor custo em um grafo, garantindo que cada nó seja visitado uma única vez (Belfiore; Fávero, 2007). Devido à sua estrutura, o PCV é especialmente adequado para problemas de roteirização e transporte, em que o objetivo principal é reduzir custos de deslocamento e aumentar a eficiência operacional. Conforme Arenales *et al.* (2007), o PCV é considerado um dos modelos fundamentais da Pesquisa Operacional aplicada à logística, servindo como base para formulações mais complexas, como os problemas de roteirização de veículos. Dessa forma, sua aplicação em contextos logísticos, como o transporte de leite cru, permite otimizar as rotas de coleta e minimizar o consumo de combustível, mantendo a eficiência operacional do sistema.

A formulação matemática do PCV foi usada como base teórica para guiar a implementação computacional. O modelo considera um conjunto de n propriedades, com uma matriz D de distâncias d_{ij} entre cada par de propriedades i e j . O objetivo é encontrar um ciclo que passe por todas as propriedades exatamente uma vez e retorne ao ponto inicial, minimizando a soma total das distâncias percorridas (Taha, 2008).

A fórmula 1 —formulação matemática adotada para o PCV — é a seguinte:

Minimizar:

1

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

Sujeito a:

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

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

$$u_i - u_j + nx_{ij} \leq n - 1, \quad \forall i, j = 2, \dots, n, i \neq j$$

Em que:

c_{ij} representa o custo ou distância entre os pontos i e j ;

x_{ij} é uma variável binária que assume valor 1 caso o trajeto de i para j seja utilizado;

u_i é uma variável auxiliar introduzida para eliminar sub-rotas;

n é o número total de pontos (neste caso, nove: oito propriedades mais a garagem).

Segundo Belfiore e Fávero (2007), o PCV é um dos problemas fundamentais da Pesquisa Operacional e serve como base para o desenvolvimento de modelos de roteirização de veículos, com aplicações diretas na logística e no transporte de bens perecíveis. No entanto, devido à sua complexidade computacional NP-difícil, o número de permutações possíveis cresce de forma fatorial à medida que n aumenta, tornando inviável a obtenção de soluções exatas para grandes conjuntos de dados (Taha, 2008).

Para contornar essa limitação, são utilizadas heurísticas e metaheurísticas, que permitem encontrar soluções aproximadas de maneira mais eficiente (Arenales *et al.*, 2007). Dentre as heurísticas mais conhecidas, destaca-se o algoritmo do vizinho mais próximo (*Nearest Neighbor* - NN), amplamente aplicado em problemas de roteirização de transporte e distribuição.

O algoritmo do vizinho mais próximo baseia-se em uma estratégia construtiva, na qual o agente parte de um ponto inicial e, a cada iteração, escolhe o ponto mais próximo ainda não visitado, repetindo o processo até retornar ao ponto de origem (Lachtermacher, 2007). Sua simplicidade e rapidez o tornam especialmente adequado para situações práticas em que se busca uma solução viável com baixo custo computacional, como no caso da coleta de leite em propriedades rurais, onde a eficiência operacional é um fator determinante.

Conforme Belfiore e Fávero (2007), embora o algoritmo do vizinho mais próximo não garanta a solução ótima, ele apresenta resultados satisfatórios em aplicações reais, permitindo reduções significativas em tempo de percurso e consumo de combustível. Assim, sua utilização como abordagem inicial é coerente com o objetivo de se obter uma solução prática, eficiente e de fácil implementação para a roteirização de coleta de leite cru.

Desse modo, tanto o Problema do Caixeiro Viajante (PCV) quanto o algoritmo do vizinho mais próximo oferecem a base teórica necessária para compreender e formular o problema de otimização proposto neste estudo, fornecendo os fundamentos que orientam a

etapa metodológica e a definição dos objetivos da pesquisa.

5 METODOLOGIA

Este trabalho configura-se como uma pesquisa aplicada, pois busca a solução prática para um problema real: a otimização das rotas de coleta de leite cru em propriedades rurais. De acordo com Belfiore e Fávero (2007), as pesquisas aplicadas em Pesquisa Operacional têm como propósito central desenvolver soluções quantitativas voltadas para problemas concretos, utilizando modelos matemáticos para apoiar a tomada de decisão. Trata-se de uma pesquisa de natureza quantitativa, uma vez que utiliza dados numéricos — como distâncias, volumes coletados e tempos de deslocamento — para análise e modelagem das rotas, conforme salientam Arenales *et al.* (2007), ao afirmarem que a Pesquisa Operacional se baseia em métodos quantitativos e computacionais para propor soluções otimizadas a problemas reais.

A abordagem adotada é computacional, fazendo uso do algoritmo do vizinho mais próximo, inspirado no Problema do Caixeiro Viajante (PCV) e suas variantes, amplamente aplicados em contextos logísticos (Lachtermacher, 2007). O objetivo é propor uma solução prática para a otimização de rotas de coleta de leite em propriedades rurais, utilizando ferramentas matemáticas e computacionais para modelar e resolver o problema. A escolha do algoritmo do vizinho mais próximo justifica-se por sua simplicidade de implementação e eficiência computacional, características que o tornam adequado para problemas de roteirização de pequeno e médio porte, nos quais a rapidez na obtenção de uma solução viável é mais relevante do que a busca pela solução ótima (Lachtermacher, 2007).

5.1 Procedimentos metodológicos

O método adotado para a modelagem do cenário de coleta de leite foi baseado no Problema do Caixeiro Viajante (PCV), que, segundo Belfiore e Fávero (2007), consiste em determinar um único roteiro com o menor custo possível, de forma que o veículo visite todos os pontos de uma rede exatamente uma vez e retorne ao ponto de origem, minimizando a distância total percorrida.

O PCV é um clássico problema de otimização combinatória que busca determinar a rota de menor custo para um agente que parte de um ponto inicial, visita um conjunto de n vértices — neste caso, propriedades rurais — exatamente uma vez e retorna ao ponto inicial (Arenales *et al.*, 2007). Esse problema é conhecido por sua complexidade computacional, sendo

classificado como NP-difícil, o que significa que o número de permutações possíveis cresce de forma fatorial, tornando inviável a obtenção de soluções exatas quando n é grande (Taha, 2008). Assim, tornam-se necessárias abordagens heurísticas e metaheurísticas para encontrar soluções aproximadas com eficiência (Lachtermacher, 2007).

O PCV apresenta vantagens relevantes na otimização de rotas logísticas, pois é um modelo amplamente estudado, com vasta literatura e implementações consolidadas (Belfiore; Fávero, 2007). Além disso, algoritmos heurísticos e metaheurísticos são facilmente adaptáveis a contextos diversos e permitem alcançar resultados práticos mesmo em cenários com grande número de variáveis (Arenales *et al.*, 2007). Tais algoritmos, segundo Lachtermacher (2007), são capazes de gerar soluções próximas da ótima em tempo computacional reduzido, o que os torna particularmente úteis em problemas reais de logística e transporte.

Apesar dessas vantagens, o PCV também apresenta limitações importantes. Sua complexidade fatorial torna inviável a obtenção de soluções exatas em casos de grande escala (Taha, 2008). Além disso, o modelo clássico não contempla restrições práticas, como capacidade de veículos, janelas de tempo ou horários específicos, o que exige adaptações ou extensões do modelo (Arenales *et al.*, 2007). Por fim, embora as heurísticas proporcionem rapidez, elas não garantem a obtenção da solução ótima, podendo gerar resultados subótimos dependendo do conjunto de parâmetros (Lachtermacher, 2007).

Optou-se pelo PCV devido à sua simplicidade conceitual, ampla aplicação em problemas de roteirização e pela disponibilidade de algoritmos eficientes para sua resolução. Conforme Belfiore e Fávero (2007), o PCV serve de base para modelos de transporte e distribuição que envolvem múltiplos pontos de coleta ou entrega, sendo adequado para o desenvolvimento de estratégias computacionais viáveis. Embora o modelo clássico não trate explicitamente de restrições adicionais, sua estrutura oferece uma base sólida para implementações futuras de variantes com maior complexidade.

Foram utilizados dados reais de uma rota de coleta de leite em uma região rural do estado do Rio de Janeiro. As localizações das propriedades foram obtidas por coordenadas GPS e transformadas em uma matriz de distâncias que foram obtidas por meio do software *Google Earth*. A matriz gerada serviu como base para a aplicação do algoritmo de otimização, etapa compatível com a fase de modelagem descrita por Arenales *et al.* (2007), em que a definição das variáveis e parâmetros constitui a etapa inicial da Pesquisa Operacional.

A modelagem e a resolução do problema foram realizadas com o uso do software “*Law of Cosines Calculator*”. Esse software é disponibilizado de forma gratuita *on-line* (<https://lawofcosinescalculator.com/traveling-salesman.html>). O algoritmo empregado foi o

vizinho mais próximo (*Nearest Neighbor*), uma heurística amplamente utilizada pela simplicidade e baixo custo computacional (Lachtermacher, 2007).

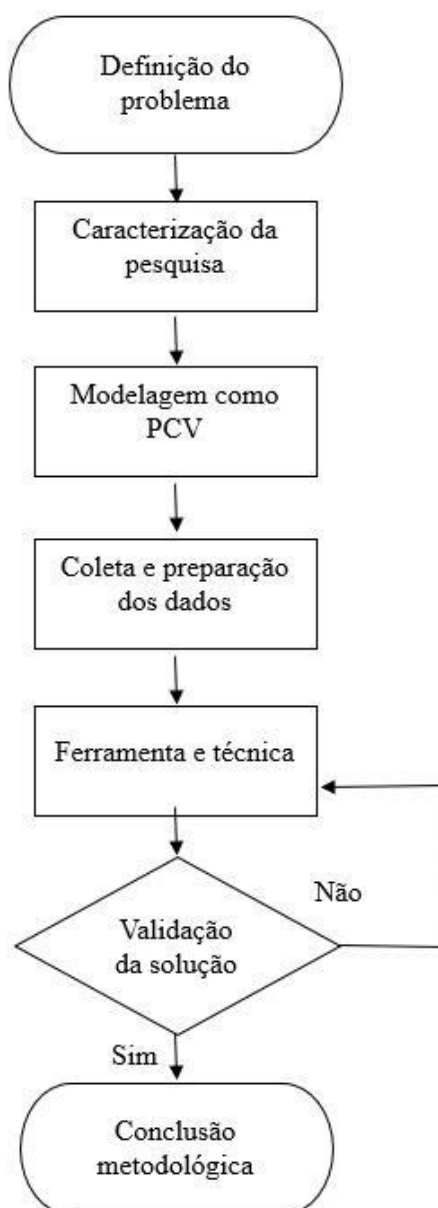
Esse método é especialmente adequado quando o número de pontos é moderado e o tempo de execução é um fator relevante, como no caso da coleta de leite em propriedades rurais. De acordo com Lachtermacher (2007), heurísticas construtivas como o NN são apropriadas quando se busca uma solução rápida e suficientemente boa, ainda que não necessariamente ótima. O algoritmo inicia em um ponto de origem, seleciona iterativamente o ponto mais próximo ainda não visitado e, ao final, retorna à origem, formando um ciclo completo.

A rota otimizada foi comparada à rota então utilizada pelo laticínio, em termos de distância total e tempo estimado de percurso. Essa análise visou verificar os ganhos potenciais obtidos pela aplicação do modelo proposto. Considerando a natureza perecível da matéria-prima, cuja coleta deve ocorrer no prazo máximo de 48 horas após a ordenha, o modelo foi configurado para representar um ciclo de um dia, contemplando todas as propriedades dentro desse intervalo (Belfiore e Fávero, 2007). Dessa forma, o estudo contribui para o desenvolvimento de práticas de transporte mais eficientes e sustentáveis, alinhadas aos objetivos de redução de impacto ambiental e aumento da competitividade no setor de laticínios.

Vale ressaltar que os dados originais referentes aos volumes coletados, por se tratar de informações sensíveis, foram submetidos a uma transformação linear por meio da multiplicação por uma constante desconhecida. Estes foram coletados em um período de 1 ano, entre maio de 2024 até maio de 2025. Essa medida visou preservar a confidencialidade das informações, sem comprometer a validade das análises relativas às proporções e variações dos dados.

As etapas da pesquisa são representadas pelo fluxograma na figura 2.

Figura 2 - Etapas metodológicas da pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

6 DESENVOLVIMENTO

O transporte de leite cru das propriedades rurais até o ponto de coleta ou usina processadora é uma atividade essencial para a cadeia produtiva do setor lácteo. No entanto, esse processo apresenta desafios significativos relacionados à logística, pois envolve percorrer longas distâncias em estradas rurais, muitas vezes em más condições, além da necessidade de respeitar restrições de tempo para evitar a perda da qualidade do leite conforme a IN 77.

Nesse contexto, a otimização de rotas surge como uma ferramenta estratégica, capaz de reduzir custos de transporte, economizar combustível e melhorar a eficiência operacional. A definição de uma rota ideal é particularmente importante quando se considera um conjunto fixo de propriedades que devem ser visitadas diariamente.

No presente estudo, foram consideradas oito propriedades rurais produtoras de leite cru, além do ponto de partida e chegada, que corresponde à garagem do veículo. A otimização da rota deve, portanto, encontrar o caminho mais curto e/ou eficiente que conecte todos esses pontos sem repetir trajetos desnecessários.

A etapa de coleta de dados consiste no levantamento das informações necessárias para a modelagem do problema.

Foram identificadas as coordenadas geográficas de cada uma das oito propriedades, bem como do ponto de partida, na garagem. A partir dessas coordenadas, foi possível calcular as distâncias entre os locais, gerando uma matriz de distâncias que representa os quilômetros de deslocamento entre os pontos.

Esse processo de construção da matriz de distâncias foi realizado por meio do software de georreferenciamento “*Google Earth*” e para que informações sensíveis referentes às propriedades não fossem expostas no estudo, os dados coletados referentes ao volume de leite coletado nelas foram multiplicados por uma constante aleatória, e dados como localização das propriedades, por exemplo, não foram mencionados. Já as distâncias entre as propriedades correspondem a dados reais, pois foram necessárias para a realização da análise e otimização.

A matriz de distâncias presente na tabela 1 constitui a base para a formulação matemática do problema de otimização. Com ela, é possível representar todas as possíveis conexões entre as propriedades e a base e serve de entrada para o software contendo o algoritmo de otimização.

Tabela 1 – Matriz de distâncias

Pontos		Distância em KM
A	G	173
G	C	12,4
C	H	4,2
H	I	12,6
I	F	2,2
F	B	1
B	D	18,7
D	E	1,9
E	A	194

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

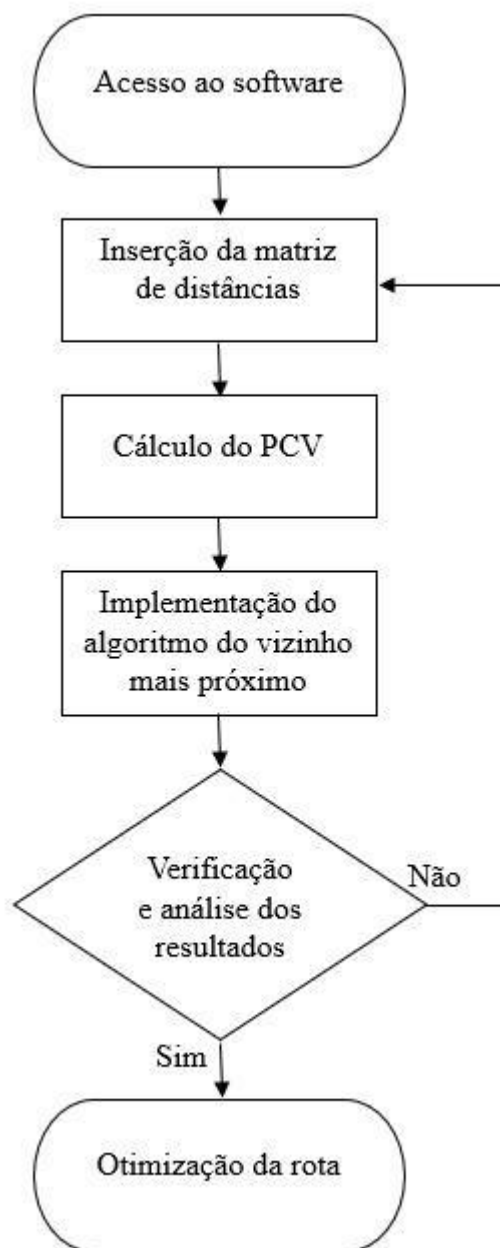
O problema de otimização das rotas de coleta de leite pode ser modelado como uma variação do Problema do Caixeiro Viajante (PCV). Nesse problema clássico da pesquisa operacional, o modelo é matematicamente representado como: minimizar a soma das distâncias selecionadas, sujeito à restrição de visitar cada ponto uma única vez. Apesar de eficiente, o modelo clássico não contempla restrições como capacidade do veículo ou janelas de tempo, porém, dada a baixa complexidade do problema, este modelo atende as necessidades identificadas.

Após a formulação matemática, o problema deve ser resolvido computacionalmente. Existem diferentes métodos para abordar o PCV, que variam desde algoritmos exatos, capazes de encontrar a solução ótima, até metaheurísticas, que buscam soluções próximas da ótima em menos tempo.

Para o presente trabalho, sugeriu-se a utilização de um algoritmo heurístico, como o Vizinho Mais Próximo, dada a baixa complexidade do problema. Esse método permite encontrar rotas eficientes mesmo em problemas com maior número de pontos.

O processo de implementação pôde ser realizado através do software gratuito “*Law of the Cosines Calculator*” conforme o fluxograma representado na figura 3.

Figura 3 – Processo de cálculo de otimização da rota



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A validação do modelo consistiu em comparar os resultados obtidos com a prática atual do transporte. Para isso, foi possível calcular a distância total percorrida pela rota atualmente utilizada pelo motorista e compará-la com a rota otimizada obtida pelo modelo gerado no software.

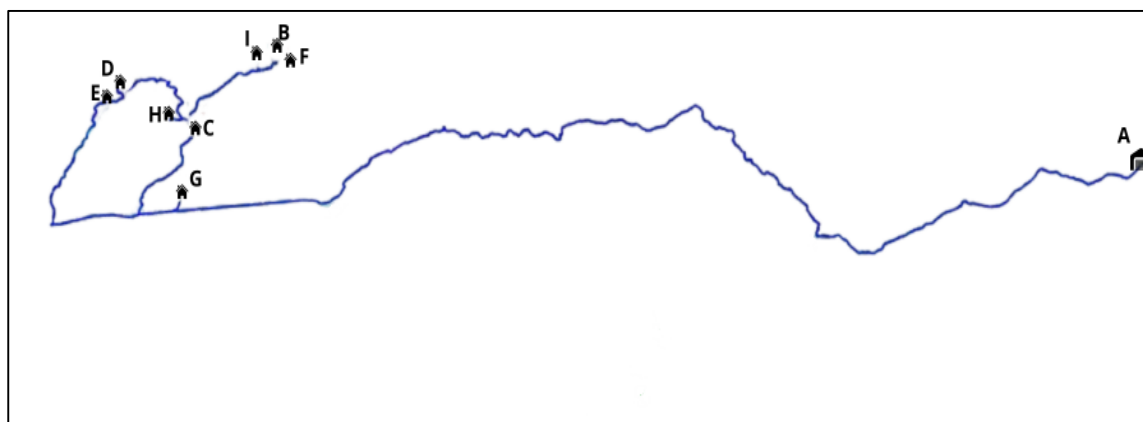
Ao analisar o processo atual da coleta, pode-se perceber que a rota conta com uma distância total de 396 km de trajeto completo, isto é, saindo da garagem, coletando um total de 8 produtores ao longo de sua extensão, retornando à garagem para efetuar a lavagem do veículo, conforme a IN 77, e seguindo para a descarga no laticínio. Dado que o trajeto de

aproximadamente 8 km que se tem da garagem ao laticínio não pode ser retirado, este foi desconsiderado para a análise e cálculo. O volume coletado desses produtores gira em torno de 8.798 litros por dia, o que é compatível com o veículo utilizado uma vez que sua capacidade corresponde a 12.000 litros.

Essa comparação permitiu verificar se a solução proposta realmente proporcionou reduções significativas nos custos, no consumo de combustível, na distância de deslocamento e no tempo de transporte. Além disso, a análise considerou também aspectos práticos, como a identificação de um caminho alternativo para a rota.

As figuras 4 e 5 a seguir são representações cartográficas não correspondentes ao mapa real, sendo apenas ilustrações para fins acadêmicos. A figura 4 ilustra a rota a ser estudada, se dando pela forma então realizada pela empresa.

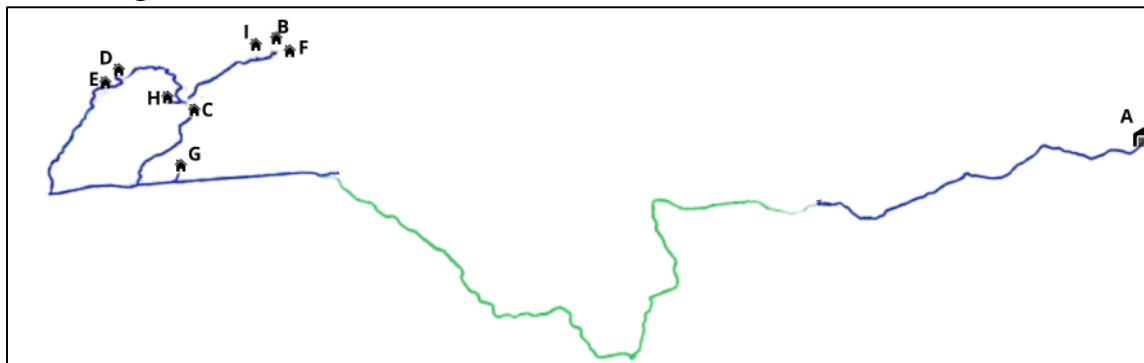
Figura 4 - Representação cartográfica da rota.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A sequência de coleta então realizada se dá por: A, G, H, I, B, F, C, E, D, A. Após a aplicação do método, foi possível reduzir a distância percorrida em 7 km e, somado a isso, com a inclusão do novo trecho, antes desconhecido, também houve a redução de 5 km de trajeto, totalizando 12 km a menos percorridos. A figura 5 traz a representação do trecho alternativo, em verde, e a eliminação do trecho anterior.

Figura 5 - Trecho alternativo inserido.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A partir dessa análise, foi possível discutir os ganhos potenciais da aplicação do modelo em termos econômicos e operacionais, e dessa forma foi obtida a sequência: A, G, C, H, I, F, B, D, E, A.

Com a rota otimizada, ao comparar com a utilizada anteriormente, foi possível calcular os resultados em potencial dessa otimização ao levar em consideração os coeficientes de pisos mínimos de transporte rodoviário de carga disponibilizados pela Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT). Considerando a economia de 12 km, o valor de R\$4,76 por quilômetro rodado, conforme a ANTT, em uma rodagem de 15 dias por mês, visto que os produtores possuem um intervalo de 48 horas entre as coletas, é obtido uma redução de R\$857,70 no custo da tarifa e esse resultado chega a um total de R\$10.284,84 no ano.

Analizando do ponto de vista do consumo sustentável de combustível, há uma redução de 4 litros por dia, o que corresponde a 60 litros de diesel S10 por mês e 720 litros em um ano.

Ao observar esses resultados, pode-se perceber que a implementação de uma rota otimizada pode trazer benefícios tanto para os produtores quanto para o laticínio e seus consumidores, obtendo maior eficiência e sustentabilidade na logística do leite cru. A análise detalhada das diferenças entre o percurso inicial e o percurso otimizado é apresentada na Tabela 2 a seguir, permitindo visualizar o impacto das melhorias implementadas.

Tabela 2 – Comparativo da rota antes da otimização e após

Indicador	Pré-otimização	Pós-otimização	Variação (%)
Distância total (km)	396 km	384 km	-3,03%
Consumo de combustível (L)	132 L	128 L	-3,03%

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

7 CONCLUSÃO

A otimização das rotas não apenas contribui para a redução de custos operacionais, mas também para a diminuição do impacto ambiental causado pelo uso excessivo de veículos, alinhando-se às práticas sustentáveis de gestão logística e evidenciando os principais pontos, dificuldades e características operacionais observadas no processo.

O presente trabalho teve como objetivo otimizar a rota de coleta de leite no campo, visando reduzir custos logísticos e impactos ambientais associados ao transporte. A aplicação do método proposto demonstrou resultados expressivos, comprovando o potencial da utilização de técnicas de roteirização no setor agroindustrial. Os resultados apontaram para uma redução de 12 km percorridos na rota, o que representa uma economia estimada em R\$10.284,84 ao longo de um ano. Além disso, verificou-se a diminuição de 4 litros de combustível consumidos por dia, totalizando uma economia anual aproximada de 720 litros. Esses ganhos não se restringem ao aspecto econômico, mas refletem também em benefícios ambientais — como a redução na emissão de gases poluentes — e operacionais, contribuindo para a diminuição do tempo de execução da rota e para a melhoria da qualidade do leite coletado, em virtude da menor perda de temperatura durante o transporte.

Apesar dos resultados positivos satisfatórios, é importante reconhecer algumas limitações do estudo. O algoritmo empregado, por sua simplicidade, não contemplou variáveis mais complexas, como janelas de coleta em horários específicos, que poderiam ocorrer em propriedades com necessidades diferenciadas. Além disso, a análise utilizou um valor médio de consumo de combustível para a rota completa, fornecido pelo transportador, não sendo possível detalhar o consumo por trecho individual — fator que poderia gerar estimativas ainda mais precisas.

Como perspectivas para trabalhos futuros, recomenda-se a aplicação de algoritmos de otimização mais avançados, capazes de considerar múltiplas variáveis, como restrições temporais, capacidade do veículo e condições das vias. Também se sugere que estudos posteriores incluam análises qualitativas sobre as implicações sociais e éticas da roteirização otimizada, considerando, por exemplo, o impacto sobre pequenos produtores rurais.

Além disso, uma vertente promissora para estudos futuros seria a integração de tecnologias emergentes, como a Internet das Coisas (IoT), aplicadas ao monitoramento em tempo real das rotas e das condições de transporte. Pesquisas recentes, como as publicadas na *Environmental Science and Pollution Research* (Zhang *et al.*, 2021), evidenciam que o uso de

sensores e sistemas conectados pode aprimorar a eficiência energética e a rastreabilidade, fortalecendo a sustentabilidade operacional na cadeia do leite.

Dessa forma, este trabalho evidencia a relevância da otimização logística na cadeia do leite, destacando não apenas os benefícios financeiros, mas também os ganhos ambientais, operacionais, considerando o rigor metodológico que fundamenta a atividade de coleta, configurando-se como uma contribuição para o avanço científico e prático da administração logística neste cenário.

8. REFERÊNCIAS

ADOBE STOCK. [Imagem da cadeia de produção do leite]. 2024.

AMARAL, M.; ALMEIDA, M. S.; MORABITO, R. Um modelo de fluxos e localização de terminais intermodais para escoamento da soja brasileira destinada à exportação. **Gestão & Produção**, v. 19, n. 4, p. 717-732, 2012. Disponível em: < <https://doi.org/10.1590/S0104-530X2012000400005> > Acesso em: 30 out. 2025.

ARENALES, M. et al. **Pesquisa operacional: modelos de otimização**. Rio de Janeiro: Campus, 2007.

BELFIORE, P.; FÁVERO, L. P. **Pesquisa Operacional para cursos de engenharia**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.

BRASIL. **Instrução Normativa nº 76, de 26 de novembro de 2018**. Estabelece os critérios e procedimentos para a produção, identidade, qualidade, coleta e transporte do leite cru refrigerado e do leite pasteurizado. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 30 nov. 2018. Disponível em: <https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/52750137/do1-2018-11-30-instrucao-normativa-n-76-de-26-de-novembro-de-2018-52749894IN%2076>. Acesso em: 01 jul. 2024.

BRASIL. **Instrução Normativa nº 77, de 26 de novembro de 2018.** Dispõe sobre os critérios e procedimentos para a produção, acondicionamento, conservação, transporte, seleção e descarte de leite. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 30 nov. 2018. Disponível em: <https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/52750137/do1-2018-11-30-instrucao-normativa-n-77-de-26-de-novembro-de-2018-52749894IN%2077>. Acesso em: 01 jul. 2024.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Novas regras para produção de leite entram em vigor em todo o país.** Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/novas-regras-para-producao-de-leite-entram-em-vigor-em-todo-o-pais#:~:text=Decreto%20n%C2%B02010.139%2C%20de%202019%20%2D%20Consolida%C3%A7%C3%A3o,a%20execu%C3%A7%C3%A3o%20de%20recursos%20decorrentes%20de%20emendas.>> Acesso em: 17 set. 2024.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Programa Águas do Agro: orientações técnicas para adequação ambiental de estradas vicinais**. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/programa-aguas-do-agro/arquivos/orientacoes_ada_2_estradasvicinais1_m.pdf> Acesso em: 17 set. 2024.

CORREIA, L. F. M.; PINTO, A. M.; PEREZ, R.; ALVES, M. P.; CARVALHO, A. F. **Custos de coleta de leite e avaliação da eficiência em indústrias de laticínios.** Revista do Instituto Cândido Tostes, Juiz de Fora, v. 67, n. 388, p. 15-24, set./out. 2012.

COSTA PEREIRA, Matheus; DE PAIVA, Anderson Paulo; MONTGOMERY DE MIRANDA, Vinícius Antônio; PAPANDREA, Pedro Jose. **Planejamento de rotas ótimas com algoritmos genéticos: uma solução para a otimização de transporte.** Journal of Open Research, v. 5, n. 1, 2024. Disponível em: <<https://stellata.com.br/journals/jor/article/view/44>>. Acesso em: 30 set. 2024.

EMBRAPA. **Anuário do Leite 2023. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite**, 2023. 180 p. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1154264/1/Anuario-Leite-2023.pdf>. Acesso em: 5 dez. 2023.

EMBRAPA. **Manual de manutenção da qualidade do leite cru refrigerado armazenado em tanques coletivos para produtores, técnicos, transportadores e coletadores de amostras de leite.** Embrapa, 2018. 25 p. Disponível em: <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1087771>>. Acesso em: 13 out. 2025.

GARLINI, Marcos Antonio; ADAMANTE, Djonathan; LEICHTWEIS, Thaís Maria; TININI, Rodrigo Cesar dos Reis. **Avaliação da qualidade e padrão do leite conforme AS IN 76 e 77, na região oeste do Paraná.** Iguazu Science, São Miguel do Iguaçu, v. 2, n. 5, p. 58-61, out. 2024. Disponível em: <<https://iguazu.uniguacu.com.br/index.php/iguazu/article/view/113/94>>. Acesso em: 30 out. 2025

HEINEMANN, Alexandre Bryan et al. **Precipitação pluvial no período das águas no Brasil Central.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 21., 2019, Catalão. Anais [...]. Catalão: Embrapa, 2019. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/204688/1/CNPAF-2019-cbagro.pdf>>. Acesso em: 21 out. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Em Nova Iguaçu, Censo 2022 chega à área rural do Rio de Janeiro.** Agência IBGE de Notícias, 24 mar. 2023. Disponível em: <<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/35488-em-nova-iguacu-censo-2022-chega-a-area-rural-do-rio-de-janeiro#:~:text=Destaques,estado%2C%20em%20termos%20de%20popula%C3%A7%C3%A3o.>>>. Acesso em: 9 set. 2024.

IBGE. **Pesquisa da Pecuária Municipal (PPM).** 2022. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura/9105-pesquisa-da-pecuaria-municipal.html?=&t=o-que-e>>. Acesso em: 01 jul. 2024.

IBGE. **Pesquisa Trimestral do Leite – 1º trimestre de 2023.** Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://ftp.ibge.gov.br/Producao_Pecuaria/Fasciculo_Indicadores_IBGE/2023/abate-leite-couro-ovos_202301caderno.pdf>. Acesso em: 31 out. 2023.

IBGE. **Produto Interno Bruto (PIB).** 2023. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9079-produto-interno-bruto-pib-trimestral.html?=&t=o-que-e>>. Acesso em: 01 jul. 2024.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA – IPEA. **Desafios e perspectivas para o desenvolvimento regional no Brasil**. Boletim Regional, Urbano e Ambiental, n. 5, 2011. Disponível em: <https://portalantigo.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/boletim_regional/111125_boletimregional5_cap13.pdf> Acesso em: 8 set. 2024

KAZANCOGLU, Y.; OZBILTEKIN-PALA, M.; SEZER, M. D. et al. **Circular dairy supply chain management through Internet of Things-enabled technologies**. Environmental Science and Pollution Research, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11356-021-17697-8>> Acesso em: 7 out. 2024.

LACHTERMACHER, G. **Pesquisa operacional na tomada de decisões: modelagem e aplicações**. 4. ed. Rio de Janeiro: Campus, 2007

MARTINS, R. S. LOBO, D. S., JUNIOR W. F. R. & OLIVEIRA, H. F. (2004). **Desenvolvimento de uma ferramenta para a gestão da logística da captação de leite de uma cooperativa agropecuária**. Gestão & Produção, v.11, n.3, p.429-440, set.-dez. 2004. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/gp/a/KBw8WmtzbhdQkxgd3hSRyjL/#>> Acesso em 23 set. 2024

Produção Agropecuária IBGE. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/leite/br>>. Acesso em: 05 nov. 2023.

SILVA, R. de O. P. e. Panorama do Mercado de Leite em 2023. **Análises e Indicadores do Agronegócio**, São Paulo, v. 18, n. 8, p. 1-7, ago. 2023. Disponível em: <<http://www.iea.agricultura.sp.gov.br/ftp/iea/AIA/AIA-29-2023.pdf>>. Acesso em: 01 nov. 2023.

SIQUEIRA, Pedro Henrique Moura; CARVALHO, Glaucio Rodrigues. **Análise de padrões de consumo de derivados lácteos na região Sudeste**. In: PASSOS, L. P. (ed.). Coletânea de Iniciação Científica da Embrapa Gado de Leite-PIBIC CNPq 2020-2021. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2021. p. 1-5. (Embrapa Gado de Leite. Documentos, 262). Disponível em: <<http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1134697>>. Acesso em: 31 out. 2023.

STRÖHER, A. P.; DOS SANTOS JR., J. G.; NUNES, J. C. Análise da conformidade do transporte de leite cru refrigerado em cooperativa do Rio Grande do Sul. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 47, n. 1, p. 108-118, 2024. Disponível em: <<https://semiaridodevisu.ifsertaope.edu.br/index.php/rsdv/article/view/582>> Acesso em: 13 out. 2025.

TAHA, H. A. **Pesquisa operacional**. 8. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

TRAVELING SALESMAN PROBLEM Calculator. Free online traveling salesman problem calculator with step-by-step solutions. Disponível em: <<https://lawofcosinescalculator.com/traveling-salesman.html>>. Acesso em: 16 jan. 2025.

ZHANG, Y.; LI, X.; WANG, J.; LIU, H. **Real-time vehicle routing optimization for**

sustainable logistics using IoT and cloud computing. Environmental Science and Pollution Research, v. 28, n. 45, p. 63612–63625, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11356-021-16483-8>> Acesso em: 22 out. 2025.