

Automatização da roteirização multimodal para a logística de última-milha em favelas

Automating multimodal routing for last-mile logistics in slums

Lara Silva¹, Milena de Campos Soares², Orlando Fontes Lima Jr.³, Janaina Antonino Pinto⁴, Henrique Candido de Oliveira⁵, e Luciano Aparecido Barbosa⁶

¹Universidade Estadual de Campinas, SP, Brasil, l224726@dac.unicamp.br, 0000-0002-9854-8036

²Universidade Estadual de Campinas, SP, Brasil, m184646@dac.unicamp.br, 0009-0005-2978-9775

³Universidade Estadual de Campinas, SP, Brasil, oflimaj@unicamp.br, 0000-0002-4283-8245

⁴Universidade Estadual de Campinas, SP, Brasil, janainaantonino@unicamp.br, 0000-0002-7755-8358

⁵Universidade Estadual de Campinas, SP, Brasil, hcandido@unicamp.br, 0000-0002-2783-4668

⁶Universidade Estadual de Campinas, SP, Brasil, lbarbosa@unicamp.br, 0000-0001-7973-0708

Recebido: 24 de junho de 2025

Revisão final: 25 de março de 2026

Aceito: 24 de abril de 2026

Publicado: 21 de agosto de 2026

Editor Associado:

Renato da Silva Lima

Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais, Brasil

Palavras-chave:

Last-mile;

Análise espacial;

Automatização;

Sustentabilidade.

Keywords:

Last-mile;

Spatial analysis;

Automation;

Sustainability.

DOI: 10.58922/transportes.v34.e3142



RESUMO

O crescimento urbano e a expansão do e-commerce aumentaram os desafios logísticos em favelas, onde a infraestrutura precária e a ausência de mapeamento detalhado dificultam as entregas de última-milha. A adoção de uma abordagem multimodal baseada em análises espaciais pode reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e melhorar a eficiência da distribuição em áreas de difícil acesso. No entanto, a execução desses processos ainda depende de métodos manuais, limitando sua replicabilidade. Este estudo implementa a roteirização multimodal automatizada por meio de ferramentas em ambiente SIG, permitindo o processamento encadeado de dados geoespaciais e de entregas de maneira sistemática. A integração de dados LiDAR com o OpenStreetMap possibilita o mapeamento da malha viária (ruas e vielas), bem como sua caracterização (declividades e largura) e definição dos modos mais adequados (a pé, bicicleta, drone e motocicleta), priorizando opções ambientalmente sustentáveis. Os resultados incluem a alocação eficiente das modalidades, redução da distância percorrida pela motocicleta e redução da emissão de CO₂ em 32%. A principal contribuição deste estudo é a criação de um fluxo de processamento replicável e escalável, permitindo que a metodologia seja replicada a outras comunidades, tornando as operações logísticas de última-milha em favelas mais eficientes e sustentáveis.

ABSTRACT

Urban growth and the expansion of e-commerce have increased the logistical challenges in slum areas ("favelas"), where lack of infrastructure and detailed mapping make last-mile deliveries a challenging task. Adopting a multimodal approach based on spatial analysis can reduce greenhouse gas (GHG) emissions and improve distribution in hard-to-reach areas. However, the execution of these processes still depends on manual methods, limiting their replicability. This study implements an automated multimodal routing process based on GIS tools, allowing geospatial and delivery data to be processed in a systematic way. The integration of LiDAR data with OpenStreetMap features enables the mapping of the road/alley network, as well as its characterization (slopes and width) and definition of the most suitable transportation modes (by foot, bicycle, drone, and motorcycle), prioritizing environmentally sustainable options. The results include optimizing the allocation of modes, reducing travel distances by motorcycle, and reducing CO₂ emissions by 32%. The main contribution of this study is the creation of a replicable and scalable workflow, allowing last-mile logistics operations in slums to be more efficient and sustainable.

1. Introdução

O setor de e-commerce tem crescido rapidamente, e a entrega de última-milha desempenha um papel essencial nesse processo. No entanto, o transporte de cargas urbanas enfrenta desafios, como a expansão das cidades, restrições de mobilidade, congestionamentos, aumento da demanda por prazos de entrega mais curtos e serviços de alta qualidade, além das crescentes preocupações ambientais (Elbert & Rentschler, 2022; Özbekler & Karaman Akgül, 2020).

Em países em desenvolvimento, como o Brasil, onde o crescimento das favelas é uma realidade, a distribuição de mercadorias enfrenta desafios logísticos adicionais. Estudos anteriores, como [Hirakawa, Rodrigues & Lima Jr. \(2018\)](#) e [Hirakawa \(2019\)](#), apontam que, nessas áreas desafios como a precariedade ou inexistência da infraestrutura viária, as restrições de acessibilidade devido à topografia íngreme, a presença de vielas estreitas, escadas e rampas, além da ausência de endereços formais, constituem obstáculos significativos para as operações logísticas.

Outros obstáculos incluem a inexistência de locais adequados para carga e descarga, a falta de padronização das vias de acesso a residências e comércios, a insegurança no transporte de mercadorias em função do histórico de furtos, bem como a escassez de estudos sobre essa modalidade de transporte, o que resulta em custos adicionais para as operações logísticas e afeta diretamente a qualidade de vida da população local, em função do baixo acesso a esses serviços ([Garcia et al., 2024](#)).

Além dos desafios logísticos inerentes às entregas *last-mile* em favelas, a sustentabilidade é um aspecto relevante nesse contexto. Segundo [Holguín-Veras et al. \(2018\)](#), o setor de transporte é um dos principais responsáveis pela emissão de gases de efeito estufa e outros poluentes. A fim de reduzir os impactos sociais e ambientais, é essencial que as empresas adotem novas estratégias para a distribuição de mercadorias na última-milha, incorporando modos de transporte mais sustentáveis em suas operações ([Comi & Savchenko, 2021](#)).

A utilização de modos alternativos surge como uma estratégia viável para tornar mais eficiente a distribuição de mercadorias em áreas de difícil acesso. Dentre as possíveis soluções, a literatura aponta para modalidades alternativas que podem ser adaptados aos desafios específicos das favelas. Para este estudo, foram selecionados quatro modos cujas características se complementam para superar as restrições de infraestrutura:

- Entregas a pé, fundamentais para alcançar domicílios em vielas estreitas e escadarias, sendo, frequentemente, a única opção viável, conforme demonstrado por [Allen et al. \(2018\)](#) em contextos urbanos densos.
- Bicicletas (e bicicletas de carga), que equilibram agilidade, capacidade de carga e zero emissões, ideais para vias com declives moderados, como destacado por [Maniatis \(2023\)](#) e [McLeod et al. \(2020\)](#). No contexto de favelas, o uso das bicicletas justifica-se por elas circularem em vias que, embora pavimentadas, possuem raios de curvatura muito fechados ou bloqueios físicos que impedem o giro de veículos maiores, mantendo uma capacidade de carga superior à mochila do entregador a pé.
- Drones, que contornam completamente as barreiras da malha viária terrestre, com vantagem de uso para encomendas leves em locais de topografia crítica ou acesso inviável ([Maniatis, 2023](#)).
- Motocicletas, que, embora sejam a modalidade tradicional, foram integradas ao modelo de forma otimizada, sendo realocadas para trechos acessíveis e para encomendas de maior porte, reduzindo assim seu impacto ambiental geral.

Esta seleção multimodal visa, portanto, aproveitar os pontos fortes de cada veículo para criar um sistema de distribuição mais resiliente, eficiente e sustentável para o contexto das favelas.

A adoção de uma roteirização automatizada, aliada à seleção multimodal, possibilita a escolha do meio de transporte mais adequado para cada entrega, tornando a distribuição de mercadorias mais eficiente. Essa abordagem contribui significativamente para a redução das distâncias percorridas por veículos motorizados, resultando na diminuição do consumo de combustível, na redução de custos operacionais e na mitigação dos impactos ambientais e sociais negativos, incluindo a menor emissão de gases de efeito estufa (GEE).

Diante da ausência de um mapeamento detalhado das vias em favelas, o uso de Sistemas de Varredura a Laser Aerotransportados (SVLA) surge como uma alternativa viável para suprir essa lacuna ([Oliveira et al., 2024](#)). Além disso, ferramentas de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) possibilitam a integração de dados espaciais, contribuindo para a definição eficiente das rotas mais adequadas para cada tipo de transporte.

Dados provenientes de sensoriamento remoto, como nuvens de pontos LiDAR e a malha viária extraída do OpenStreetMap, podem ser integrados de maneira a viabilizar uma caracterização mais precisa das vias, abrangendo aspectos como inclinação do terreno e largura das vias.

A roteirização em áreas urbanas de alta complexidade ainda é amplamente conduzida de forma manual, o que compromete sua escalabilidade e dificulta sua aplicação em diferentes cenários. Técnicas de planejamento automatizado têm demonstrado potencial para otimizar a distribuição do tráfego (Švadlenka, Chrpa & Vallati, 2023). No entanto, a escalabilidade contínua é um desafio relevante, pois esses métodos frequentemente enfrentam dificuldades ao lidar com a complexidade das redes urbanas de grande porte (Chrpa & Vallati, 2023).

Um dos principais desafios para a implementação de soluções mais eficientes é a ausência de um fluxo automatizado que integre dados geoespaciais e possibilite a definição de rotas multimodais de forma eficiente. Nesse sentido, ferramentas em ambiente SIG permitem a automatização de processos complexos, aumentando a precisão e a eficiência na roteirização multimodal.

O objetivo central é possibilitar o processamento de dados geoespaciais e integrar a análise dos dados da malha viária, de modo a viabilizar sistematicamente uma solução logística eficiente de alocação das modalidades de transporte sustentáveis. É importante notar que o problema de roteirização multimodal é computacionalmente complexo. A abordagem adotada, utilizando as ferramentas de rede em ambiente SIG, baseia-se em algoritmos heurísticos que buscam soluções em um tempo computacional viável.

Portanto, este estudo realiza a automatização da roteirização multimodal utilizando ferramentas SIG, num fluxo de tarefas implementado que integra diversas fontes de dados geoespaciais, proporcionando uma solução replicável e escalável para a logística *last-mile* em favelas. As seções a seguir estão organizadas da seguinte forma: a seção 2 faz uma revisão da literatura relacionada ao tema do trabalho, a seção 3 destaca os materiais e método utilizados na proposta, bem como um mapa que ilustra a importância da área de estudo no contexto viário e logístico. A seção 4 apresenta os resultados da pesquisa nos cenários considerados. A seção 5 discute a viabilidade prática para a implementação do método proposto e os desafios, enquanto a seção 6 conclui e discute os resultados encontrados na pesquisa.

2. Revisão da literatura

O estudo da logística urbana em favelas e assentamentos informais têm ganhado destaque recentemente, embora a literatura sobre o assunto ainda seja limitada. Pesquisas atuais apontam que os residentes dessas áreas enfrentam dificuldades devido à falta de endereços formais, insegurança, terreno acidentado e infraestrutura deficiente, fatores que restringem a logística de última-milha (Duarte *et al.*, 2019; Pereira, Zuidgeest & Lima, 2025).

No contexto brasileiro, Duarte *et al.* (2019) destacam que, apesar de algumas práticas tradicionais de logística urbana poderem ser implementadas em favelas, sua eficácia está condicionada à adoção de soluções adaptadas às condições locais, como a contratação de moradores, o reconhecimento da presença de atores informais e o uso de pontos de entrega alternativos.

Navarro, Vieira & Fransoo (2021) destacam que, ao comparar áreas de alta e baixa renda em São Paulo, as diferenças logísticas vão além da infraestrutura, abrangendo também questões de segurança. Enquanto bairros de renda mais alta enfrentam restrições regulatórias e de tráfego, as favelas e periferias lidam com a falta de planejamento urbano e a exposição a riscos de violência, impactando diretamente a eficiência das cadeias de suprimento de bens de consumo rápido.

Pongeluppe (2022) propõe o termo “efeito favela” para descrever um fenômeno no qual os consumidores dessas áreas pagam fretes desproporcionalmente altos, mesmo sem barreiras físicas entre territórios formais e informais. Essa prática empresarial acentua desigualdades socioespaciais, limitando o acesso das populações vulneráveis ao comércio eletrônico.

Pereira, Zuidgeest & Lima (2025) também destacam que, embora soluções como pontos de coleta auxiliem na inclusão logística em assentamentos informais, a falta de dados locais, a insegurança e a ausência de envolvimento comunitário continuam a dificultar a eficácia dessas iniciativas.

Além disso, pesquisas recentes destacam a relevância de abordagens computacionais na avaliação de políticas de distribuição urbana. Alves *et al.* (2019) criaram um modelo de simulação baseado em agentes para analisar políticas de transporte voltadas ao comércio eletrônico, mostrando que a aplicação de técnicas de modelagem pode diminuir custos operacionais e emissões em cenários complexos de última-milha. Essa abordagem se alinha ao presente estudo, que também utiliza dados reais e ferramentas

em ambiente SIG para otimizar rotas multimodais em contextos urbanos de difícil acesso, como em Paraisópolis, em São Paulo.

Embora esses estudos recentes tenham trazido avanços, ainda há uma lacuna de pesquisa com abordagens sistemáticas e metodologicamente replicáveis, que ofereçam soluções logísticas sustentáveis e escaláveis para favelas e áreas semelhantes. Nesse contexto, este artigo avança ao propor e implementar uma abordagem automatizada de roteirização multimodal, que combina dados geoespaciais com critérios de sustentabilidade ambiental. O estudo oferece uma contribuição original para reduzir custos logísticos, aumentar a eficiência das entregas e mitigar desigualdades socioespaciais em áreas de difícil acesso, ampliando o alcance das políticas de mobilidade e da pesquisa em logística urbana sustentável.

3. Materiais e método

Esta pesquisa implementa um fluxo de trabalho automatizado para a roteirização multimodal para entregas última-milha em favelas, utilizando ferramentas de automatização de processos em ambiente SIG. Nas subseções seguintes são apresentados os materiais utilizados na pesquisa, a área de estudo e método proposto para solução do problema.

3.1. Materiais

Neste estudo, foram utilizados três conjuntos de dados geoespaciais: o sistema viário, um modelo digital do terreno (MDT) e dados de entregas. A rede viária foi extraída da base do OpenStreetMap, complementada por imagens do GeoSampa, a fim de incorporar vias secundárias e acessos que não constavam na base original.

Além disso, foi empregado um Modelo Digital do Terreno (MDT), o qual foi utilizado no cálculo da largura e da declividade das vias. Essa etapa foi fundamental para caracterizar as restrições físicas que afetam o desempenho de diferentes modais de transporte na área de estudo.

Também foram utilizados dados reais de entregas, fornecidos por uma empresa de logística de entregas de mercadorias, contendo informações sobre localização, peso e dimensões dos pacotes. Esses dados possibilitaram a simulação dos cenários de roteirização.

Em termos de software, foi empregado o ArcGIS Pro como principal plataforma para integração dos dados geoespaciais, extração dos parâmetros geométricos da malha viária, alocação das entregas multimodais e roteirização.

3.2. Área de estudo

Como área de estudo, foi selecionada a região de Paraisópolis, na zona sul da cidade de São Paulo (SP), considerada a maior favela da capital, com aproximadamente uma área de 1 km², caracterizada por alta densidade urbana, topografia irregular e infraestrutura viária complexa (Figura 1).

Segundo o Censo Demográfico 2022, realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Paraisópolis tinha 58.527 habitantes no momento da coleta de dados, sendo a terceira comunidade mais populosa do país (IBGE, 2024). Além disso, Paraisópolis está situada em proximidade imediata a bairros de padrão elevado, como Morumbi e Vila Sônia, gerando um contraste socioespacial acentuado e evidenciando uma segregação logística, enquanto zonas nobres são atendidas por entregas diretas, a comunidade vizinha sofre com barreiras de acesso.

Em termos de articulação urbana, ao redor da favela existem avenidas importantes (por exemplo, Avenida Hebe Camargo, Avenida Guilherme Gronchi, entre outras) que contornam ou margeiam a área de estudo (ver Figura 1). Assim, evidencia-se que Paraisópolis reúne condições de singularidade logística (alto adensamento, relevo complexo, incompleto atendimento de entregas diretas) que justificam o uso de um modelo de roteirização adaptado às restrições locais.

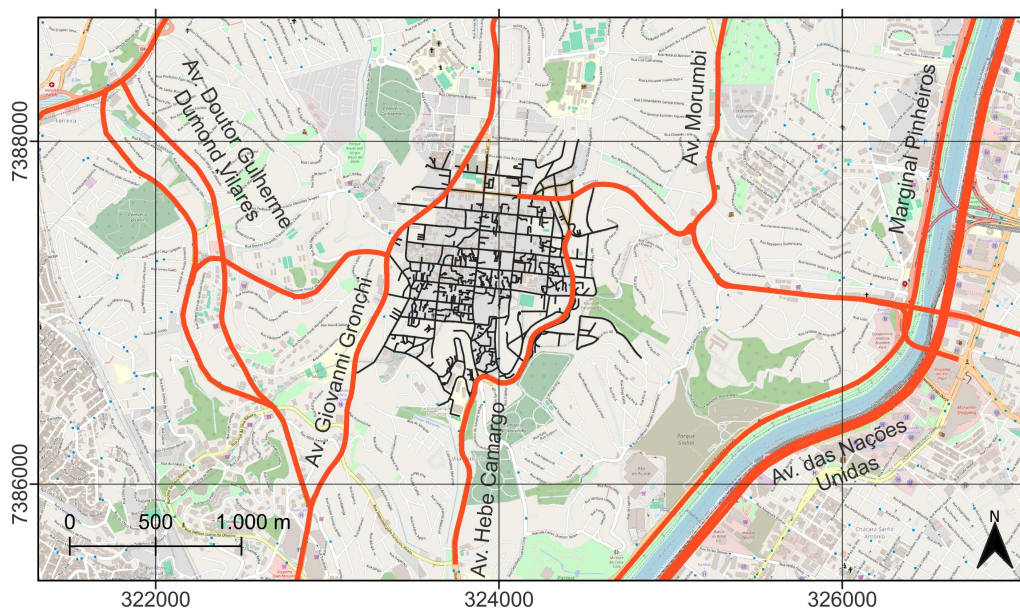


Figura 1 • Área de estudo

3.3. Método proposto

A metodologia adotada organiza-se em três etapas principais: (1) preparação dos dados de entrada, com destaque para o cálculo automatizado da declividade e da largura das vias; (2) classificação das entregas por modo de transporte, considerando as restrições físicas das vias e as características das encomendas; e (3) roteirização de dois cenários de entrega, seguida da análise comparativa da emissão de poluentes, permitindo avaliar os ganhos ambientais do modelo multimodal em relação ao unimodal (Figura 2).

Um dos principais diferenciais desta abordagem é a utilização de dados LiDAR para definir as características geométricas das vias, como largura e declividade. Esse recurso torna-se especialmente

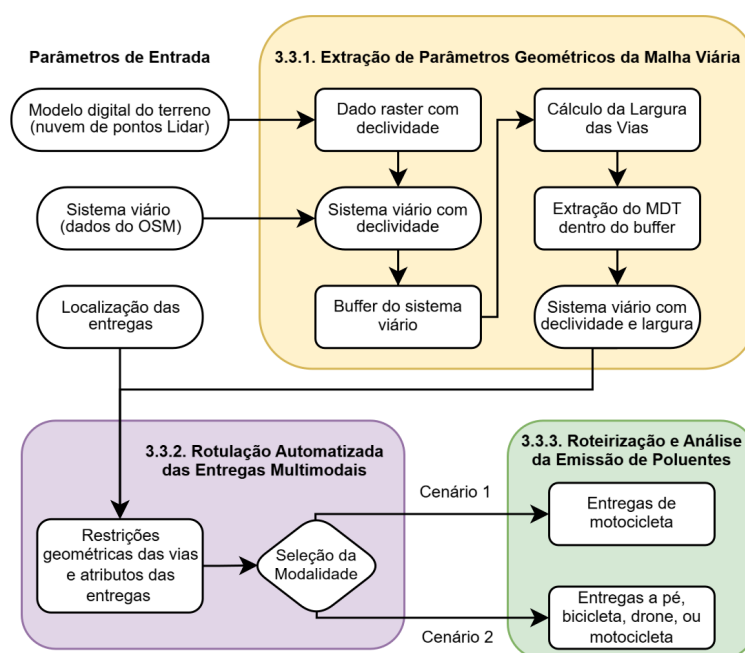


Figura 2 • Etapas da metodologia

relevante diante da ausência de mapeamentos das vielas em favelas, que frequentemente não estão representadas nas bases cartográficas oficiais. A metodologia proposta, portanto, supre essa lacuna ao permitir a caracterização da infraestrutura de circulação por meio de técnicas de sensoriamento remoto integradas ao processamento espacial automatizado.

3.3.1. Extração de parâmetros geométricos da malha viária

A primeira etapa do processamento consistiu na estruturação da base cartográfica da área de estudo em ambiente SIG. Como referência inicial da malha viária, foram utilizados dados do OpenStreetMap (OSM), posteriormente complementados com trechos ausentes identificados por meio de imagens do GeoSampa. Essa etapa foi fundamental para assegurar a completude do sistema viário, diante da ausência de mapeamento oficial detalhado das vielas da região.

Em seguida, foi incorporada a nuvem de pontos LiDAR correspondente ao Modelo Digital do Terreno (MDT) da área de Paraisópolis. A partir desse conjunto de dados, gerou-se um raster de inclinação, do qual foram extraídos os valores máximos de declividade para cada segmento viário. Esses valores foram então associados à representação geométrica das vias, compondo o atributo de declividade máxima.

Para o cálculo da largura das vias, foi criado um buffer de 5 metros em ambos os lados do eixo viário, com o objetivo de isolar os pontos da nuvem LiDAR contidos nessa faixa. Em seguida, calcularam-se as distâncias perpendiculares entre os pontos e o eixo, e, por meio de um script em Python integrado ao fluxo automatizado via Toolbox, foram selecionados os 5% dos pontos mais distantes de cada via. A média dessas distâncias foi então multiplicada por dois, assumindo-se uma distribuição aproximadamente simétrica, para estimar a largura total dos segmentos viários. Como resultado, obteve-se uma malha viária com os atributos de declividade e largura associados, que foram utilizados como restrições na etapa de rotulação das entregas multimodais.

Rotulação automatizada das entregas multimodais

A segunda etapa refere-se à classificação das entregas de acordo com o modo de transporte mais adequado. Para viabilizar a aplicação e o teste do modelo de roteirização, foi necessário definir um cenário de demanda. Considerou-se um único dia típico de operação, representado por 609 pontos de entrega. Os pontos utilizados são dados reais de entregas, fornecidos por uma empresa de logística de distribuição de mercadorias. O conjunto de dados inclui informações sobre a localização geográfica dos destinatários, bem como peso e dimensões dos pacotes.

Considerando-se a localização espacial desses pontos de entrega, foi gerado um mapa de calor para identificar a zona com maior concentração de demanda (via mapa de densidade). A partir dessa análise, definiu-se o ponto ótimo de parada da van de distribuição.

Na etapa seguinte, cada entrega foi analisada individualmente, considerando simultaneamente os atributos geométricos das vias associadas (largura e declividade) e os parâmetros físicos das encomendas (dimensões, peso e distância). Os critérios para a classificação modal foram definidos com base em limites operacionais técnicos e de segurança, extraídos da literatura especializada e de especificações de fabricantes. A Tabela 1 sintetiza essas restrições, que atuam como regras de decisão no modelo automatizado.

Cada coluna representa um atributo crítico para a decisão:

- **Dimensão Máxima e Peso Máximo:** Definem a capacidade de carga de cada modo, baseada em equipamentos comumente disponíveis no mercado (ex.: bicicletas de carga padrão) e em limites de ergonomia para entregadores a pé;
- **Altura de Voo:** Especifica a altitude operacional padrão para drones, baseada em regulamentações emergentes e boas práticas de segurança;
- **Inclinação Máxima:** Estabelece a inclinação topográfica máxima que o modo consegue superar de forma segura e eficiente, um fator crucial no contexto de favelas;
- **Largura Mínima:** Define a largura livre mínima da via necessária para a passagem do modo, considerando manobras e margens de segurança;

Tabela 1 • Restrições de entrega

Modalidade	Dimensão Máxima	Peso Máximo	Altura de Voo ou Inclinação Máxima	Largura Mínima	Distância Máxima
Drone	37 cm	6,5 kg	120 m	—	—
Fonte ou justificativa: O ICA 100-40 estabelece que o piloto remoto (ou o operador do sistema RPAS) é responsável por evitar colisões com obstáculos, aeronaves e pessoas. E também estabelece categorias que determinam as restrições de operação e o nível de risco, e o peso máximo inclui a carga transportada.					
A pé	60 cm	8 kg	20%	0,6 m	8 km
Fonte ou Justificativa: Inclinação: limite de ergonomia para deslocamentos em aclives transportando carga; Largura: adequação à circulação em escadas, becos e vielas estreitas; Distância: alcance operacional máximo estimado para um entregador a pé ao longo de uma jornada diária de trabalho; Capacidade: volume e peso compatíveis com o transporte manual contínuo.					
Bicicleta	70 cm	15 kg	8%	2 m	25 km
Fonte ou justificativa: Inclinação: limite para operação eficiente de bicicleta de carga em vias com aclive; Largura: espaço mínimo para circulação e manobras; Distância: alcance operacional máximo estimado para uma jornada diária de entregas por bicicleta; Capacidade: baseada na capacidade de carga de bicicletas utilizadas em operações logísticas urbanas.					
Motocicleta	70 cm	40 kg	15%	2 m	—
Fonte ou justificativa: Inclinação: Limite de segurança e tração em subidas com carga; Largura: Largura mínima para tráfego seguro; Capacidade: Baseada na capacidade média de motofretes.					

- **Distância Máxima:** Para modos ativos (a pé e bicicleta), define-se uma área de serviço máxima de operação a partir do ponto de parada da van, baseada em critérios de eficiência e esforço físico;
- **Fonte ou Justificativa:** Detalha a origem e a lógica por trás de cada valor específico.

Roteirização e análise da emissão de poluentes

A terceira e última etapa refere-se à execução da roteirização e à análise comparativa do impacto ambiental associado a dois cenários logísticos distintos. Para isso, utilizaram-se ferramentas de análise de rede em ambiente SIG que possibilitaram a geração de rotas a partir da malha viária com os atributos geométricos calculados nas etapas anteriores.

No primeiro cenário, todas as entregas foram simuladas exclusivamente por motocicleta, representando o modelo tradicional de distribuição. Já no segundo cenário, aplicou-se a lógica de roteirização multimodal, com a alocação eficiente dos diferentes meios de transporte previamente atribuídos. As rotas geradas foram avaliadas em termos da distância total percorrida por veículos motorizados.

A estimativa das emissões de poluentes foi realizada com base nos fatores de emissão disponibilizados pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2024). Considerou-se um modelo-padrão de motocicleta amplamente utilizado no setor de entregas urbanas. A equação geral utilizada para o cálculo das emissões totais é apresentada na Equação 1:

$$E = I_u \cdot F_e \cdot F_r \quad (1)$$

em que E é a massa de poluente emitida no período considerado (g/ano); I_u é a intensidade média anual de utilização do veículo (km/ano); F_e é o fator de emissão do tipo de veículo, poluente e combustível utilizado (g/km); e F_r é a frota circulante, por tipo de veículo e por ano (número de veículos).

4. Resultados

O fluxo de trabalho automatizado completo e resultados destacados abaixo, desde a preparação dos dados até a geração das rotas para os dois cenários, foi executado em aproximadamente 10 minutos em uma estação de trabalho com processador Intel i7 de 7ª. geração e 8 GB de RAM. Este tempo demonstra a viabilidade prática e a eficiência computacional da heurística proposta para fins de planejamento logístico.

4.1. Parâmetros geométricos da malha viária

Foram calculados dois atributos geométricos e integrados à malha viária da região de Paraisópolis: declividade máxima e largura dos segmentos viários. A análise indicou que aproximadamente 35% dos trechos apresentam declividade superior a 15%, valor considerado como restrição para entregas por motocicleta no modelo otimizado. Além disso, cerca de 3,7% dos segmentos possuem largura inferior a 2 metros, o que inviabiliza o tráfego de veículos e restringe a atuação a pedestres ou drones.

4.2. Rotulação das entregas

A Figura 3 apresenta o ponto de parada da van, definido a partir de uma análise de rede combinada ao mapeamento da densidade dos pontos de entrega. Também estão representados os 609 pontos de entrega, classificados segundo o modo de distribuição mais adequado, com base em critérios técnicos – como dimensões e peso das encomendas – e atributos geoespaciais, incluindo declividade e largura das vias.

Como resultado do processo de classificação, foram atribuídas 103 entregas ao modo pedestre, 137 ao de bicicletas, 214 ao de drone e 155 ao de motocicleta. Apenas uma entrega não foi alocada a nenhum dos modais considerados, por exceder o limite máximo de peso estabelecido. Este tipo de situação mostra a necessidade e importância de outras estratégias associadas a este tipo de operação logística, como por exemplo a disponibilização de *smart lockers* (PUDO - *Pick-Up Drop-Off*) na entrada das favelas para que a retirada seja feita diretamente pelo consumidor.

4.3. Roteirização e análise da emissão de poluentes

No Cenário 1, adota-se o modelo tradicional de entrega, em que a totalidade das 609 encomendas é distribuída exclusivamente por motocicleta. A roteirização correspondente resultou em um percurso total de 17,5 km, conforme ilustrado na Figura 4.

Já no Cenário 2, em que as entregas foram alocadas priorizando a utilização do modo mais sustentável disponível em cada ponto, com base nas restrições de peso, dimensão, declividade e largura da via, obteve-se um percurso total de 11,9 km, como representado na Figura 5.

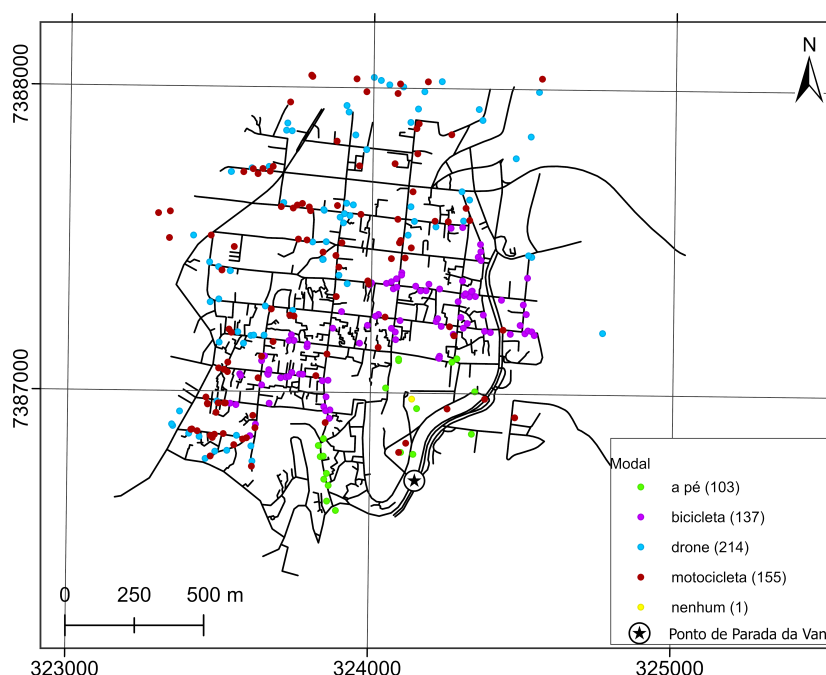


Figura 3 • Classificação das modalidades de transporte

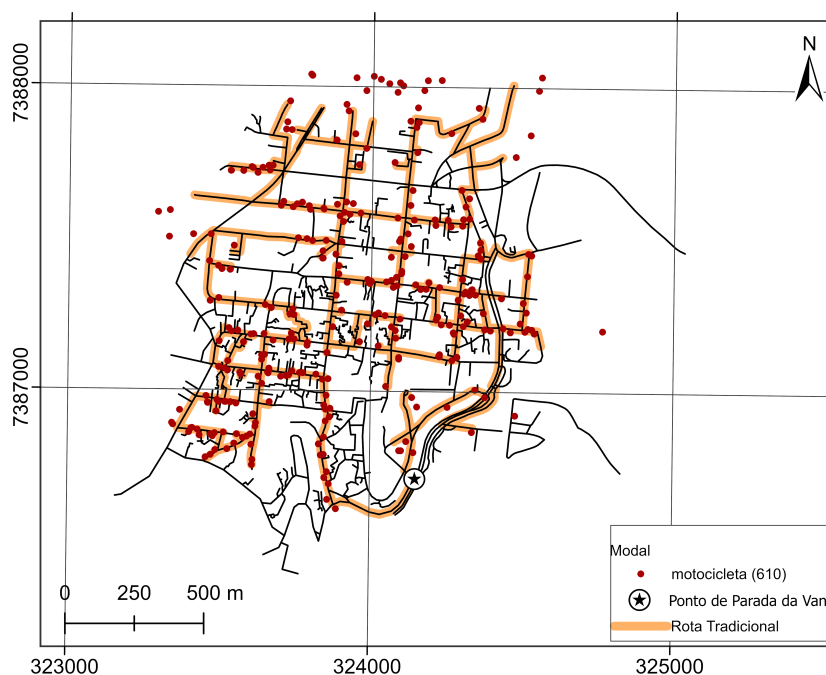


Figura 4 • Cenário 1 – modelo de entrega tradicional

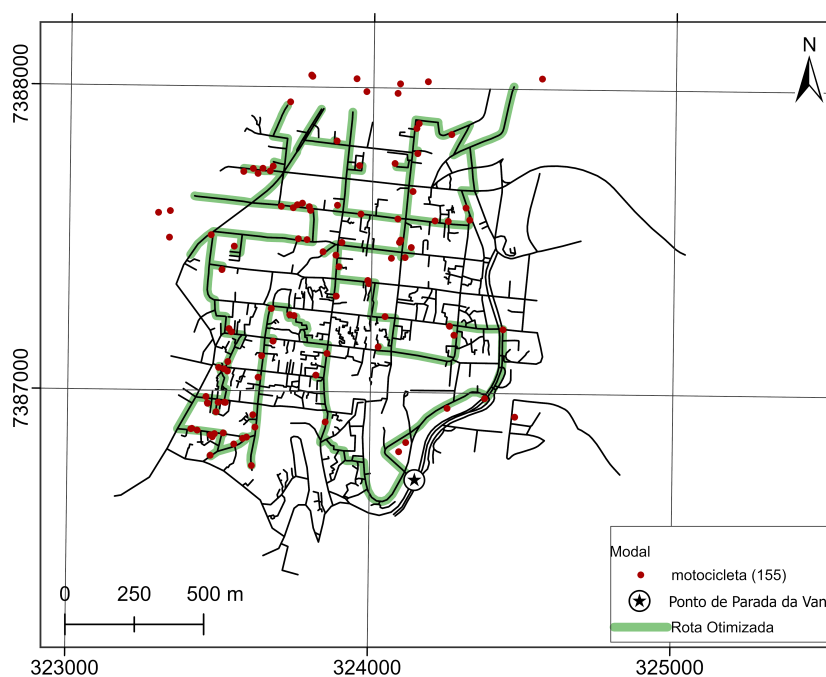


Figura 5 • Cenário 2 – modelo de entrega considerando diferentes modalidades

A Figura 6 apresenta a diferença espacial entre as rotas consideradas nos dois cenários, evidenciando os trechos que deixaram de ser percorridos após a aplicação do modelo de roteirização mais sustentável.

A estimativa da emissão de dióxido de carbono equivalente (CO_2eq) foi realizada com base nos fatores de emissão disponibilizados pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2024). Para o cálculo foram considerados dois cenários: (1) utilizando exclusivamente motocicletas e (2) considerando diferentes modais (a pé, bicicleta, drone e motocicleta), conforme destaca a Tabela 2.

Para o primeiro cenário considerou-se um modelo padrão de motocicleta com motorização de 160 cilindradas, com cinco anos de uso, abastecida com gasolina do tipo flex. Os resultados do segundo

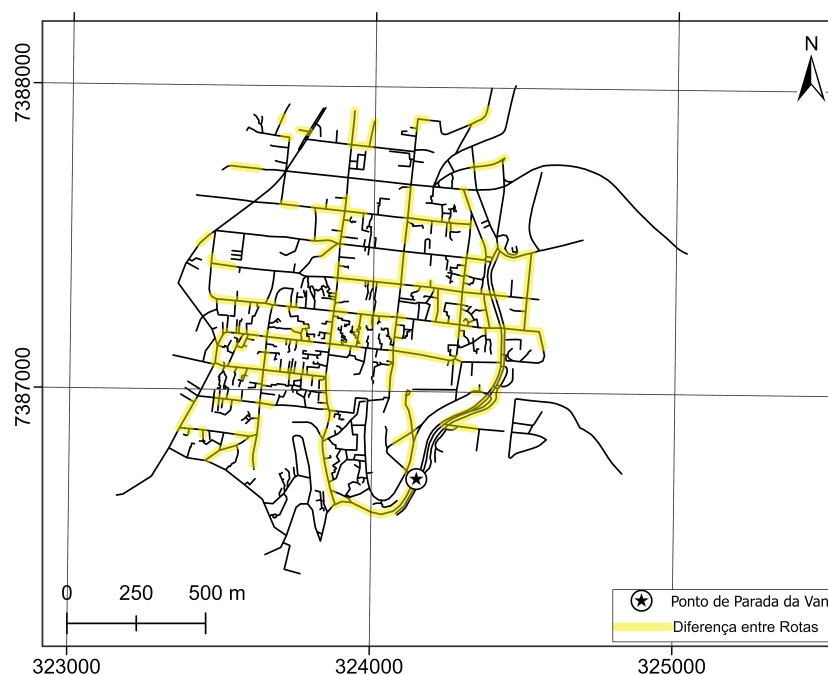


Figura 6 • Diferenças entre as rotas dos dois cenários

Tabela 2 • Comparação da emissão de CO₂ equivalente

	Cenário 1	Cenário 2	Redução
Distância percorrida (km)	17,5	11,9	5,6 (32%)
Emissão de CO ₂ eq (g)	868,4	590,8	277,5 (32%)

cenário mostram uma redução de 5,6 km percorridos e 277,5 g de CO₂eq, o que corresponde a uma diminuição percentual de 32%. Esse valor evidencia o potencial de otimização logística e a consequente mitigação dos impactos ambientais por meio da adoção de uma abordagem multimodal mais sustentável.

5. Discussão: viabilidade e desafios para implementação prática

Os resultados demonstram o potencial teórico da roteirização multimodal para otimizar a última-milha em favelas. No entanto, a implementação prática deste modelo, particularmente a incorporação de tecnologias emergentes como os drones, apresenta uma série de desafios que devem ser considerados. Esta seção discute essas implicações, oferecendo uma perspectiva crítica sobre a transição do modelo para a operação real.

5.1. Viabilidade operacional do cenário proposto

A viabilidade de entregar a quantidade de encomendas considerada no cenário multimodal em um único dia é sustentada pela estratégia multimodal e pela estrutura da operação, conforme detalhado a seguir.

5.1.1. Divisão multimodal da carga

As 609 entregas não são atribuídas a um único veículo de carga que é responsável por levar as mercadorias até o ponto de distribuição (Ponto de Parada da Van). O modelo automatizado distribuiu essa demanda entre diferentes modos com base em critérios técnicos e geográficos:

- **Drones (214 entregas):** Responsáveis por 35% do volume, operando de forma aérea e independente das restrições de tráfego terrestre;

- **Bicicletas (137 entregas) e Pedestres (103 entregas):** Realizam entregas de curto alcance a partir de um ponto de parada estratégico, focado em vielas e áreas de alta declividade;
- **Motocicletas (155 entregas):** Atuam apenas em trechos acessíveis e para encomendas que excedem a capacidade das outras modalidades.

5.1.2. Estrutura da operação (*Micro-Hub*)

A operação foi estruturada utilizando o conceito de *Micro-Hub*. O “Ponto de Parada da Van” identificado no SIG serve como uma base logística temporária onde a carga é fracionada. A partir desse ponto, múltiplos entregadores (locais ou da empresa) iniciam suas rotas simultaneamente em diferentes direções, o que viabiliza o volume total no período de um dia. A Figura 7 ilustra como poderia ser a operação a partir desse *Micro-Hub*.

5.1.3. Capacidade da frota

Embora o foco do artigo tenha sido a automatização das rotas e a redução de emissões, a simulação assume uma frota compatível com a demanda. No Cenário 2, a redução da distância percorrida pelas motocicletas para 11,9 km (uma queda de 32% em relação ao modelo tradicional) demonstra que a operação se torna mais ágil, permitindo que o mesmo número de entregas seja realizado em menos tempo ou com menos veículos motorizados.

5.1.4. Uso de dados reais

É importante ressaltar que os 609 pontos utilizados foram distribuídos espacialmente de forma aleatória dentro da favela, mas refletem um valor médio de entregas em uma comunidade desse porte, considerando pesquisa de campo realizada pelos autores em comunidades do Rio de Janeiro que possuem empresas operando nesse tipo de serviço.

5.2. Aplicação contextual dos drones

O drone destacou-se no modelo por sua capacidade de ignorar restrições de declividade e largura de vias, sendo alocado para 214 entregas (35% do total). Este resultado quantifica seu potencial como solução para os trechos de acesso críticos. Contudo, sua viabilidade operacional é condicionada à superação de obstáculos significativos, que o posicionam, no curto e médio prazo, como um modo



Figura 7 • Simulação do *Micro-Hub* na van de entregas

complementar de alto valor agregado para casos específicos (a exemplo de medicamentos e encomendas de alto valor), e não como uma solução de massa. Contudo, sua viabilidade operacional é condicionada à superação de obstáculos significativos:

- **Regulatório:** A regulamentação de voos de drones para entrega de mercadorias em áreas urbanas densas é incipiente no Brasil. Agências como a ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil) e a DECEA (Departamento de Controle do Espaço Aéreo) ainda desenvolvem *frameworks* para operações fora do campo visual (*beyond visual line of sight* - BVLOS). A autorização para voos autônomos sobre aglomerados populacionais é um pré-requisito crítico.
- **Operacional e de Segurança:** Estabelecer uma operação segura exige a definição de corredores aéreos, pontos de pouso seguros (*drone ports*) e protocolos para falhas, como pouso de emergência. A alta densidade de fios elétricos aparentes, comum em favelas, representa um risco considerável que demanda sistemas avançados de detecção e evitamento de obstáculos.
- **Logística e Aceitação Social:** A entrega via drone não é “porta-a-porta” no sentido tradicional. É necessária uma solução de “último-metro”, onde o drone entrega em um ponto seguro (uma laje, um pequeno pátio ou *drone port*), de onde um entregador local ou o próprio morador faz a retirada. Além disso, a aceitação da comunidade em relação ao ruído, à privacidade e à segurança dos drones é fator determinante para o sucesso.

Dada esta complexidade, o drone não deve ser visto como uma substituição, mas como um modo complementar estratégico para casos muito específicos: entregas de medicamentos, pequenas encomendas de alto valor ou acesso a pontos geograficamente críticos, onde o custo-benefício justifique a operação complexa.

Além dos desafios técnicos e geográficos, a introdução de drones em favelas brasileiras enfrenta barreiras críticas de segurança pública. O uso dual dessa tecnologia – que em 2025 foi protagonista de episódios de monitoramento e conflito em complexos de favelas no Rio de Janeiro – gera um estigma que pode comprometer operações logísticas. Em territórios sob influência de grupos armados ou em áreas de frequentes operações policiais, um drone de entrega pode ser erroneamente identificado como ferramenta de vigilância, expondo o equipamento e a comunidade a riscos. Portanto, a viabilidade da última-milha aérea nessas regiões não depende apenas da automatização da rota, mas de um modelo de governança colaborativa. Isso envolve o uso de identificação visual clara, horários de voo coordenados e, fundamentalmente, a mediação com organizações comunitárias para garantir que a tecnologia seja percebida como um serviço de utilidade pública e não como uma ameaça à segurança local.

5.3. A sinergia dos modos terrestres e a logística local

Enquanto a estratégia de inclusão do modo aéreo é estudada e avaliada, a combinação dos modais terrestres (a pé, bicicleta e motocicleta) já apresenta uma oportunidade de ganho imediato. Como por exemplo:

1. **Criação de Micro-Hubs e Geração de Emprego:** O ponto de parada da van, identificado no estudo, pode funcionar como um *micro-hub*. A partir dele, entregadores locais, familiarizados com a geografia e a dinâmica social da comunidade, podem realizar as entregas finais a pé ou de bicicleta. Esta abordagem não só otimiza a logística, mas também gera renda e fortalece a economia local, aumentando a aceitação das operações.
2. **Integração com PUDO:** Como indicado pelos resultados, uma encomenda não pôde ser entregue devido ao excesso de peso. Esta situação reforça a necessidade de soluções complementares. A instalação deles em locais estratégicos e seguros na periferia da favela surge como uma solução complementar viável. Esta abordagem resolve o problema de encomendas volumosas ou pesadas, funcionando como um ponto de consolidação e coleta. No entanto, sua implementação bem-sucedida depende de uma análise que vá além da técnica, considerando: Viabilidade Operacional - Custo de implantação, manutenção e gerenciamento dos *lockers*; Segurança - A escolha do local deve priorizar a segurança dos equipamentos e, principalmente, dos usuários durante a retirada; e Aceitação Social - A adesão dos moradores é crucial. É necessário garantir conveniência (horários

de acesso, proximidade) e confiança na integridade das encomendas. A parceria com associações de bairro pode ser um fator chave para o sucesso.

5.4. Dimensionamento operacional e janela temporal

Para a validação da exequibilidade do modelo, foi realizada uma análise da dimensão temporal necessária para o cumprimento das 609 entregas. Adotando-se a velocidade média de 30 km/h para vias locais, conforme estabelecido pela regulamentação vigente para o município de São Paulo (CET, 2026), e um tempo médio de serviço de 1 minuto por ponto de parada, parâmetro justificado pela alta densidade de paradas característica de aglomerados subnormais, onde a contiguidade das edificações reduz o tempo de deslocamento marginal entre clientes vizinhos (Novaes, 2015), a operação totalizaria aproximadamente 10 horas e 45 minutos. Este tempo de serviço é um componente crítico na logística de última-milha, pois em zonas de alta densidade, o entregador consegue realizar múltiplas descargas em um raio espacial mínimo.

É importante ressaltar que o modelo utilizou uma única unidade de transporte e não considerou restrições de capacidade de carga física do veículo para fins de simplificação da heurística, focando na mensuração da eficiência das rotas e no potencial de mitigação de emissões. Embora o resultado aponte para uma jornada de trabalho completa, ele confirma a capacidade técnica do sistema em absorver a demanda total. Na prática operacional, esse volume seria distribuído em múltiplos distritos ou ondas de reabastecimento via *micro-hubs*, estratégias que confeririam maior folga temporal à operação sem invalidar os ganhos de sustentabilidade identificados.

5.5. O papel da automação e da governança

O fluxo automatizado desenvolvido nesta proposta é a espinha dorsal que torna este modelo replicável. Ele permite que gestores públicos ou operadores logísticos adaptem rapidamente as rotas a mudanças na malha viária ou no padrão de demanda. No entanto, a implementação bem-sucedida exige uma governança colaborativa entre poder público, empresas de logística e lideranças comunitárias para tratar de questões como segurança, padronização de processos e manutenção da infraestrutura de apoio.

6. Conclusão

Os resultados deste estudo demonstram que a abordagem de roteirização multimodal proposta representa mais do que um exercício de modelagem; ela constitui um roteiro factível para uma logística de última-milha mais inclusiva e sustentável. A implementação prática deste modelo, no entanto, deve ser conduzida de forma gradual e adaptativa, priorizando a sinergia entre tecnologia, contexto socioterritorial e a geração de valor para as comunidades residentes.

A pesquisa comprovou que a aplicação de um fluxo de trabalho automatizado para o planejamento logístico em favelas é viável metodologicamente, operacionalmente eficiente e gera benefícios ambientais tangíveis, com uma redução de 32% nas emissões de CO₂eq em comparação ao cenário tradicional baseado apenas em motocicletas. A integração estratégica de dados LiDAR com o OpenStreetMap mostrou-se decisiva para superar a carência de mapeamento detalhado, permitindo a caracterização geométrica da malha viária com os atributos de declividade e largura, os quais foram fundamentais como restrições realistas para a busca de soluções eficientes.

A metodologia desenvolvida foi concebida com alto potencial de replicabilidade e escalabilidade. O fluxo automatizado construído no ModelBuilder do ArcGIS Pro opera como um template, cuja aplicação em outras favelas ou contextos urbanos de difícil acesso demanda essencialmente a substituição das camadas de entrada – malha viária local e pontos de entrega –, preservando a lógica central de processamento. As regras de alocação modal (Tabela 1) podem ser adaptadas para refletir normas locais, novas modalidades ou condições operacionais específicas, posicionando esta ferramenta como um recurso valioso para o planejamento logístico em diversos cenários de infraestrutura precária.

É imperativo, contudo, reconhecer as limitações inerentes a este trabalho. O modelo foi validado com um conjunto de dados de entrega sintéticos, e sua implementação em escala real, notadamente a operação de drones, enfrenta barreiras substantivas – abrangendo aspectos regulatórios, de infraestrutura para voos seguros, de custo e de aceitação social –, os quais foram discutidos em profundidade na seção anterior. Tais limitações, longe de invalidar a contribuição do estudo, realçam a necessidade de se abordar a transição do modelo para a prática como um processo multifacetado, que integra inovação tecnológica, governança colaborativa e engajamento comunitário. Para investigações futuras, três direções principais se destacam:

1. A validação empírica por meio de um projeto-piloto controlado, permitindo a coleta de dados operacionais reais, a mensuração de tempos de entrega e o teste da integração prática das modalidades;
2. A expansão da análise de viabilidade, incorporando explicitamente os custos operacionais (CAPEX - *Capital Expenditure* e OPEX - *Operational Expenditure*) de cada modalidade na comparação entre cenários, de modo a consolidar a sustentabilidade não apenas ambiental, mas também econômica da solução;
3. A investigação de modelos de negócio inovadores e de arranjos de parceria público-privada-comunitária que possam viabilizar operacional e financeiramente a implantação deste sistema logístico inclusivo.

Dessa forma, este trabalho oferece à academia, ao setor público e aos operadores logísticos não apenas um modelo técnico replicável, mas também um quadro de discussão crítica e um roteiro estratégico para pesquisas e ações futuras, destinadas a transformar a logística de última-milha em territórios de favelas em um sistema verdadeiramente eficiente, sustentável e socialmente integrador.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) do Brasil pelos financiamentos 405498/2023-3 e 309518/2025-3, assim como ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas pela infraestrutura que possibilitou o desenvolvimento desta pesquisa.

Declaração de contribuição de autoria CRediT

Lara Silva: Curadoria de Dados, Análise Formal, Investigação, Metodologia, Software, Visualização, Redação — Rascunho original; Milena de Campos Soares: Curadoria de Dados, Metodologia, Recursos, Software, Redação — Rascunho original; Orlando Fontes Lima Júnior: Conceituação, Metodologia, Validação, Redação — Revisão e edição; Janaina Antonino Pinto: Conceituação, Metodologia, Validação, Redação — Revisão e edição; Henrique Candido de Oliveira: Conceituação, Metodologia, Validação, Redação — Revisão e edição; Luciano Aparecido Barbosa: Conceituação, Metodologia, Administração do Projeto, Supervisão, Validação, Redação — Revisão e edição.

Uso de tecnologia assistida por inteligência artificial

Os autores declaram que foi utilizada a ferramenta de inteligência artificial Google Gemini para a geração de uma figura incluída neste artigo (Figura 7), com o objetivo de elucidar as explicações apresentadas no tópico de discussão. Os autores assumem total responsabilidade pelo uso de tais ferramentas.

Declaração de conflitos de interesse

Os autores declaram não haver conflito de interesses a ser informado.

Declaração de disponibilidade de dados

Os dados, modelos e códigos que suportam os resultados deste estudo estão disponíveis mediante solicitação ao autor correspondente, Lara Silva.

References

- Allen, J., T. Bektas, T. Cherrett, O. Bates, A. Friday, F. McLeod, M. Pieczyk, M. Piotrowska, T. Nguyen, & S. Wise (2018). The scope for pavement porters: addressing the challenges of last-mile parcel delivery in London. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2672(9), 184–193. DOI:10.1177/0361198118794535.
- Alves, R. T., R. S. Lima, D. C. Sena, A. F. Pinho, & J. Holguín-Veras (2019). Agent-based simulation model for evaluating urban freight policy to e-commerce. *Sustainability* 11(15), 4020. DOI:10.3390/su11154020.
- CET (2026). *Perguntas Frequentes: quais as velocidades máximas admitidas nas vias urbanas onde não existe sinalização de regulamentação?* São Paulo: Companhia de Engenharia de Tráfego. URL: <https://www.cetsp.com.br/perguntas-frequentes.aspx> [visitado 6/8/2026].
- CETESB (2024). *Emissões veiculares no Estado de São Paulo 2023*. São Paulo: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. URL: https://www.cetesb.sp.gov.br/cetesb/qualidade_ambiental/emissao_veicular/publicacoes_e_relatorios [visitado 6/8/2026].
- Chrapa, L. & M. Vallati (2023). Centralised vehicle routing for optimising urban traffic: a scalability perspective. In *Anais do 2023 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Anchorage, AK, USA, pp. 1–6. IEEE. DOI:10.1109/IV55152.2023.10186707.
- Comi, A. & L. Savchenko (2021). Last-mile delivering: analysis of environment-friendly transport. *Sustainable Cities and Society* 74, 103213. DOI:10.1016/j.scs.2021.103213.
- Duarte, V., F. Macau, C. F. e. Silva, & L. M. Sanches (2019). Last-mile delivery to the bottom of the pyramid in Brazilian slums. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 49(5), 473–493. DOI:10.1108/IJPDLM-01-2018-0008.
- Elbert, R. & J. Rentschler (2022). Freight on urban public transportation: a systematic literature review. *Research in Transportation Business & Management* 45, 100679. DOI:10.1016/j.rtbm.2021.100679.
- Garcia, P. B. M., O. F. Lima Jr., J. A. Pinto, H. C. Oliveira, L. A. Barbosa, & E. Divieso (2024). Técnicas e práticas aplicadas na logística em favelas. In *Anais do 10º Congresso Luso-Brasileiro para o Planejamento Urbano, Regional, Integrado e Sustentável – PLURIS 2024*, Guimarães, Portugal. URL: <https://www.civil.uminho.pt/planning/Pluris2024/Atas/Papers/Paper702.pdf> [visitado 24/06/2025].
- Hirakawa, A. P. R. (2019). Logística urbana em favelas: Estudo de casos múltiplos. Mestrado (dissertação), Universidade Estadual de Campinas, Campinas. DOI:10.47749/T/UNICAMP.2019.1094517.
- Hirakawa, A. P. R., E. D. R. Rodrigues, & O. F. Lima Jr. (2018). Logística urbana em favelas e áreas precárias: uma revisão sistemática da literatura. In *Anais do XXXII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes – ANPET*, Gramado, RS. URL: https://www.anpet.org.br/anais32/documentos/2018/Logistica/Logistica%20Urbana%20II/1_374_AC.pdf [visitado 24/06/2025].
- Holguín-Veras, J., T. Encarnación, C. A. González-Calderón, J. Winebrake, C. Wang, S. Kyle, N. Herazo-Padilla, L. Kalahasthi, W. Adarme, V. Cantillo, H. Yoshizaki, & R. Garrido (2018). Direct impacts of off-hour deliveries on urban freight emissions. *Transportation Research Part D, Transport and Environment* 61, 84–103. DOI:10.1016/j.trd.2016.10.013.
- IBGE (2024). *Censo Demográfico 2022 – Favelas e Comunidades Urbanas: Resultados do universo*. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. URL: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/tipologias-do-territorio/15788-favelas-e-comunidades-urbanas.html> [visitado 24/06/2025].
- Maniatis, P. (2023). Exploring the viability of last-mile delivery solutions for sustainable supply chains. *Preprints.org*. DOI:10.20944/preprints202306.0982.v1.
- McLeod, F. N., T. J. Cherrett, T. Bektas, & L. M. Sanches (2020). Quantifying environmental and financial benefits of using porters and cycle couriers for last-mile parcel delivery. *Transportation Research Part D, Transport and Environment* 82, 102311. DOI:10.1016/j.trd.2020.102311.
- Navarro, H. A. R., J. G. V. Vieira, & J. C. Fransoo (2021). Understanding urban logistics and consumer behavior in São Paulo city. *Case Studies on Transport Policy* 9(4), 1630–1640. DOI:10.1016/j.cstp.2021.06.017.
- Novaes, A. G. (2015). *Logística e Gerenciamento da Cadeia de Distribuição* (4 ed.). Rio de Janeiro: Elsevier.
- Oliveira, H. C., R. C. Santos, L. A. Barbosa, O. F. Lima Jr., J. A. Pinto, & D. C. Costa (2024). Mapeamento de vias em favelas baseado em dados de sistema de varredura a laser aerotransportado. In *Anais do 10º Congresso Luso-Brasileiro para o Planejamento Urbano, Regional, Integrado e Sustentável – PLURIS 2024*, Guimarães, Portugal. URL: <https://www.civil.uminho.pt/planning/Pluris2024/Atas/Papers/Paper733.pdf> [visitado 24/06/2025].
- Pereira, C. A., M. H. P. Zuidgeest, & R. Lima (2025). How about including urban informal settlements in city logistics? An equity comparative analysis of e-commerce last mile deliveries. *International Journal of Logistics Management* 36(4), 1326–1345. DOI:10.1108/IJLM-05-2024-0304.
- Pongeluppe, L. (2022). The favela effect: spatial inequalities and firm strategies in disadvantaged urban communities. *Strategic Management Journal* 43(13), 2777–2808. DOI:10.1002/smj.3414.

- Özbekler, T. M. & A. Karaman Akgül (2020). Last mile logistics in the framework of smart cities: a typology of city logistics schemes. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLIV-4/W3-2020*, 335–337. DOI: [10.5194/isprs-archives-XLIV-4-W3-2020-335-2020](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIV-4-W3-2020-335-2020).
- Švadlenka, M., L. Chrpa, & M. Vallati (2023). Improving the scalability of automated planning-based vehicle routing via smart routes identification. In *8th International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS)*, Nice, France, pp. 1–6. IEEE. DOI: [10.1109/MT-ITS56129.2023.10241639](https://doi.org/10.1109/MT-ITS56129.2023.10241639).