v7.n9.2026

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

PESQUISA OPERACIONAL EM TRANSPORTES E LOGÍSTICA: ANÁLISE SISTEMÁTICA E TEMÁTICA DO CAMPO

OPERATIONS RESEARCH IN TRANSPORT AND LOGISTICS: A SYSTEMATIC AND THEMATIC ANALYSIS OF THE FIELD

INVESTIGACIÓN OPERATIVA EN TRANSPORTE Y LOGÍSTICA: ANÁLISIS SISTEMÁTICO Y TEMÁTICO DEL CAMPO

Rivelinho Manuel Mohamade[1], Selma Agnir Sérgio Nuaila Varinde[2], Amina de Fátima Muzé Massina[3], Teresa de Fátima Olima[3], Alima Alexandre Xavier[4]

e798866
https://doi.org/10.47820/recima21.v7i9.8866

PUBLICADO: 09/2026

RESUMO

A produção científica sobre Pesquisa Operacional aplicada aos transportes e à logística tem-se diversificado quanto aos problemas de decisão, às estratégias de modelagem e aos contextos de aplicação, mas permanece pouco integrada no que se refere às relações entre essas dimensões. Nesse contexto, realizou-se uma revisão sistemática da literatura, orientada pelo protocolo PRISMA e complementada por uma análise temática do *corpus*, abrangendo publicações de 2015 a 2025 nas bases de dados Scopus, Web of Science e Google Scholar. Dos registros identificados, 13 estudos atenderam aos critérios de elegibilidade. Os resultados evidenciam o predomínio de problemas relacionados ao desenho e à configuração de redes, bem como ao roteamento e à distribuição, com emprego de programação matemática, otimização robusta e estocástica, heurísticas, meta-heurísticas e abordagens híbridas. A análise dos contextos de aplicação revela uma explicitação geográfica limitada em parte significativa do *corpus* e a ausência de estudos desenvolvidos em Moçambique. Como contribuição, propõe-se uma estrutura integradora que articula o problema de decisão, a estratégia de modelagem, o nível decisório e o contexto empírico. Conclui-se que o desenvolvimento do campo requer maior articulação entre modelagem, validação empírica e adequação das soluções aos diferentes contextos de aplicação.

PALAVRAS-CHAVE: Pesquisa Operacional. Transportes e Logística. Modelagem.

ABSTRACT

Scientific research on Operations Research applied to transport and logistics has diversified in terms of decision problems, modeling strategies, and application contexts, while remaining insufficiently integrated with respect to the relationships among these dimensions. Against this background, a systematic literature review was conducted following the PRISMA protocol and complemented by a thematic analysis of the corpus, covering publications from 2015 to 2025 indexed in Scopus, Web of Science, and Google Scholar. Thirteen studies met the eligibility criteria. The findings reveal a predominance of network design and configuration and routing and distribution problems, addressed through mathematical programming, robust and stochastic optimization, heuristics, metaheuristics, and hybrid approaches. The analysis of application contexts shows limited geographical specification in a substantial part of the corpus and no studies conducted in Mozambique.

[1] UniRovuma – ISTLT, doutorando.
[2] UniRovuma – ISTLT, mestre.
[3] UniRovuma – ISTLT, mestranda.
[4] UniRovuma – ISTLT, mestranda.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

As a contribution, an integrative framework is proposed to articulate decision problem, modeling strategy, decision level, and empirical context. The findings indicate that further development of the field requires stronger integration among modeling, empirical validation, and the contextual adequacy of solutions.

KEYWORDS: Operations Research. Transport and Logistics. Modeling.

RESUMEN
La producción científica sobre Investigación Operativa aplicada al transporte y la logística se ha diversificado en cuanto a los problemas de decisión, las estrategias de modelización y los contextos de aplicación, pero permanece poco integrada en lo que respecta a las relaciones entre estas dimensiones. En este contexto, se realizó una revisión sistemática de la literatura, orientada por el protocolo PRISMA y complementada por un análisis temático del *corpus*, que abarcó publicaciones de 2015 a 2025 indexadas en Scopus, Web of Science y Google Scholar. Trece estudios cumplieron los criterios de elegibilidad. Los resultados evidencian un predominio de problemas relacionados con el diseño y la configuración de redes, así como con el enrutamiento y la distribución, abordados mediante programación matemática, optimización robusta y estocástica, heurísticas, metaheurísticas y enfoques híbridos. El análisis de los contextos de aplicación revela una limitada explicitación geográfica en una parte significativa del *corpus* y ausencia de estudios desarrollados en Mozambique. Como contribución, se propone un marco integrador que articula el problema de decisión, la estrategia de modelización, el nivel decisional y el contexto empírico. Se concluye que el desarrollo del campo requiere una mayor articulación entre modelización, validación empírica y adecuación de las soluciones a los diferentes contextos de aplicación.

PALABRAS CLAVE: Investigación Operativa. Transporte y Logística. Modelación.

INTRODUÇÃO

A Pesquisa Operacional (PO) constitui uma área central de apoio à tomada de decisão em transportes e logística, abrangendo problemas de planejamento de redes, roteamento, distribuição, atribuição de fluxos e integração de sistemas. A complexidade desses problemas decorre da interação entre demanda, infraestrutura, fluxos, capacidade e restrições operacionais, exigindo modelos ajustados a diferentes níveis de decisão. Crainic e Laporte (1997) distinguem, nesse domínio, decisões estratégicas, táticas e operacionais. No desenho de redes sob incerteza, An e Lo (2015, 2016) mostram que diferentes formas de representar a variabilidade da demanda conduzem a formulações distintas. Nos problemas de roteamento, Keskin e Çatay (2016) recorrem a estratégias heurísticas para enfrentar a complexidade computacional associada ao roteamento de veículos elétricos.

Apesar dessa diversificação, permanece uma questão analítica acerca da forma como essas aplicações se articulam enquanto campo de investigação. Os estudos podem concentrar-se em problemas específicos, métodos particulares ou domínios funcionais, sem que essas

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

dimensões sejam necessariamente analisadas de forma conjunta. Anand et al. (2012), ao examinarem a logística urbana, evidenciam a relação entre os problemas de decisão e as características dos sistemas analisados. Comi et al. (2012), por sua vez, mostram a diversidade de abordagens utilizadas na modelagem da demanda de transporte de mercadorias. Essas contribuições ajudam a compreender a especificidade dos problemas, mas não permitem, isoladamente, caracterizar como a produção recente relaciona problemas de decisão, estratégias de modelagem, níveis decisórios e contextos de aplicação.

A questão ganha relevância em contextos nos quais as condições de transporte e logística diferem daquelas encontradas nos sistemas mais estudados internacionalmente. Porter (2014) evidencia que, na África Subsaariana, a acessibilidade e as condições de infraestrutura condicionam o funcionamento dos sistemas de transporte. Em Moçambique, o World Bank (2017) e o African Development Bank Group (2018) identificam desafios relacionados à infraestrutura, aos custos logísticos e à integração dos transportes. Essas diferenças tornam pertinente examinar a adequação contextual dos modelos de PO, sem assumir que uma formulação matematicamente consistente seja, por si só, adequada a diferentes sistemas de transporte e logística.

Diante desse problema, formula-se a seguinte questão de investigação: como se estrutura a literatura recente sobre aplicações da Pesquisa Operacional em transportes e logística?

O objetivo geral é analisar a estrutura da literatura sobre aplicações da Pesquisa Operacional em transportes e logística no período de 2015 a 2025, considerando os problemas de decisão, as estratégias de modelagem, os níveis decisórios e os contextos de aplicação.

Para concretizar esse objetivo, definem-se os seguintes objetivos específicos: (i) identificar os principais problemas de decisão abordados na literatura selecionada; (ii) caracterizar as estratégias de modelagem e os métodos de solução utilizados; (iii) analisar as relações entre problemas, métodos e níveis decisórios; e (iv) caracterizar os contextos empíricos e identificar as principais lacunas evidenciadas pelo *corpus*.

A investigação adota uma revisão sistemática da literatura, complementada por uma análise temática exploratória dos termos e categorias identificados no *corpus*. Como contribuição, propõe-se uma estrutura integradora que relaciona problema de decisão, estratégia de modelagem, nível decisório e contexto empírico, oferecendo uma base analítica para interpretar conjuntamente a diversidade das aplicações identificadas e as lacunas evidenciadas pela literatura.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

1. REFERENCIAL TEÓRICO

1.1. Delimitação conceitual da Pesquisa Operacional em transportes e logística

A Pesquisa Operacional (PO) constitui um campo científico orientado ao apoio à tomada de decisão por meio da modelagem matemática, da otimização e da análise de sistemas complexos. Dantzig (1998) destaca a programação linear como um dos fundamentos da área, particularmente na alocação de recursos. Nos transportes e na logística, a complexidade resulta da interação entre redes, fluxos, demanda, capacidade e restrições operacionais. Sheffi (1985) evidencia a importância dos modelos de rede na análise de transportes, enquanto Rodrigue (2020) destaca a interdependência entre infraestruturas, fluxos e cadeias logísticas. Nesse domínio, Toth e Vigo (2002) e Irnich et al. (2014) sistematizam problemas estruturantes, entre os quais o desenho de redes e o roteamento de veículos.

A ampliação dos objetivos de decisão também introduziu dimensões ambientais e energéticas em determinadas formulações, associando eficiência operacional a critérios de sustentabilidade (Sabet & Farooq, 2022). A PO aplicada aos transportes e à logística abrange, assim, problemas com diferentes estruturas, objetivos e níveis de decisão, exigindo estratégias de modelagem ajustadas às características de cada problema.

1.2. Evolução metodológica e organização do campo

A complexidade dos problemas de transporte e logística tem sido acompanhada pela diversificação das estratégias de modelagem e solução. Birge e Louveaux (2011) enquadram a programação estocástica como abordagem para decisões sob incerteza, enquanto Gendreau e Potvin (2010) destacam a relevância das heurísticas e meta-heurísticas diante de problemas de elevada complexidade combinatória. No roteamento, Vidal et al. (2020) mostram a expansão das formulações mediante a incorporação de novos atributos, objetivos e decisões.

Essa diversificação estende-se aos domínios de aplicação. Anand et al. (2012) e Comi et al. (2012) evidenciam, respectivamente, a diversidade dos problemas de logística urbana e de transporte de mercadorias. Mais recentemente, a aproximação entre otimização, simulação e métodos computacionais tem ampliado as possibilidades de tratamento de sistemas dinâmicos e adaptativos (De la Torre et al., 2021; Adamo et al., 2024).

A diversidade metodológica e temática constitui um avanço da PO, mas também distribui a literatura por diferentes problemas e subdomínios. Torna-se, por isso, relevante examinar não apenas os métodos utilizados, mas também sua relação com os problemas de decisão, os níveis decisórios e os contextos de aplicação.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

1.3. Posicionamento analítico e lacuna da investigação

O presente estudo adota uma perspectiva analítica que compreende a organização da PO em transportes e logística a partir da relação entre quatro dimensões: problema de decisão, estratégia de modelagem, nível decisório e contexto empírico. Essa perspectiva permite sistematizar a diversidade da literatura sem pressupor uma trajetória metodológica única ou estabelecer uma hierarquia entre abordagens.

Embora a literatura apresente ampla especialização em desenho de redes, roteamento, logística urbana e gestão de fluxos (Anand et al., 2012; Comi et al., 2012), permanece relevante uma leitura integrada das relações entre problemas, estratégias de modelagem, níveis decisórios e contextos de aplicação. É nessa lacuna analítica que se posiciona o presente estudo.

Com base nessa perspectiva, propõe-se uma estrutura integradora da PO em transportes e logística. A estrutura não pretende constituir uma nova taxonomia universal, mas uma proposição analítica derivada das evidências do *corpus* para relacionar as quatro dimensões identificadas e orientar a interpretação da diversidade das aplicações e das lacunas da literatura.

2. METODOLOGIA

Foi realizada uma revisão sistemática da literatura, complementada por análise temática exploratória, para caracterizar aplicações da Pesquisa Operacional (PO) em transportes e logística segundo quatro dimensões analíticas: problemas de decisão, estratégias de modelagem, níveis decisórios e contextos empíricos. A revisão seguiu procedimentos explícitos de identificação, seleção, extração e síntese, conforme Booth et al. (2016), e o processo de seleção foi reportado de acordo com as recomendações do PRISMA 2020 (Page et al., 2021).

A pesquisa foi realizada nas bases Scopus, Web of Science e Google Scholar e abrangeu publicações de 2015 a 2025. A estratégia combinou termos relativos à PO e à otimização, aos transportes e à logística e às abordagens de modelagem: *("operations research" OR "optimization" OR "mathematical programming") AND ("transportation" OR "logistics" OR "urban freight" OR "vehicle routing" OR "network design") AND ("robust" OR "stochastic" OR "heuristic" OR "metaheuristic")*. A expressão foi ajustada para eliminar resultados fora do escopo, mantendo os limites temporal e temático definidos, em consonância com o princípio de transparência da estratégia de busca destacado por Kitchenham (2004).

Foram incluídos artigos de periódicos com revisão por pares, publicados entre 2015 e 2025, que abordassem problemas de transporte ou logística mediante modelagem matemática, otimização ou outro procedimento formal de PO e apresentassem informação suficiente para extração e codificação. Foram excluídos estudos fora do período ou do domínio temático, sem

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

procedimento formal de PO, literatura cinzenta, publicações sem descrição metodológica suficiente e estudos cuja informação não permitisse codificação consistente. A aplicação dos critérios resultou em 13 estudos no *corpus* final.

Tabela 1. Fluxo PRISMA de seleção dos estudos

Etapa	Descrição	Número de registros	Critério de decisão
Identificação	Registros identificados nas bases Scopus, Web of Science e Google Scholar	212	Aplicação da estratégia de busca
Identificação	Registros após remoção de duplicados	138	Exclusão de duplicações
Triagem	Registros analisados por título e resumo	138	Aplicação dos critérios de seleção
Triagem	Registros excluídos	97	Fora do escopo ou sem modelagem em PO
Elegibilidade	Artigos avaliados em texto completo	41	Leitura integral
Elegibilidade	Artigos excluídos	28	Informação metodológica insuficiente ou impossibilidade de codificação consistente
Inclusão	Estudos incluídos no *corpus* final	13	Cumprimento dos critérios

Fonte: Elaboração própria (2026).

Os estudos foram codificados em uma matriz de extração composta por **oito variáveis**: tipo de problema, domínio funcional, método de solução, nível decisório, tipo de dados, procedimento de validação, contexto geográfico e objetivo do modelo. Essas variáveis de extração não correspondem a oito dimensões analíticas independentes, mas operacionalizam as quatro dimensões que estruturam a análise. O tipo de problema correspondeu à decisão modelada; o domínio funcional, ao sistema considerado; o método de solução, à técnica ou família de técnicas utilizada; e o nível decisório, à natureza estratégica, tática ou operacional. Registraram-se ainda o tipo de dados, o procedimento de validação, o contexto geográfico explicitamente identificado e o objetivo do modelo. A matriz fundamentou o Quadro 1 e a agregação dos problemas apresentada na Tabela 2.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

A análise temática incidiu sobre as regularidades identificadas nas relações entre problemas de decisão, métodos de solução, níveis decisórios e domínios funcionais. Braun e Clarke (2021) apresentam a análise temática como uma abordagem sistemática para desenvolver e interpretar padrões de significado no material analisado. Neste estudo, essa orientação foi adaptada ao *corpus* documental mediante a codificação e a agregação dos estudos, das quais resultaram cinco categorias: desenho/configuração de redes; roteamento e distribuição; gestão e atribuição de fluxos; mobilidade sob demanda; e preços e roteamento dinâmicos.

Para apoiar a representação temática, foram considerados termos dos títulos, resumos e palavras-chave, com normalização de abreviaturas, variações linguísticas e formas gramaticais equivalentes. A Figura 1 apresenta a organização temática dos termos e categorias identificados no *corpus*, articulada à matriz de codificação. A análise possui caráter exploratório e não pretende produzir inferências quantitativas sobre a totalidade da literatura da área.

A dimensão empírica considerou o tipo de dados, o procedimento de validação e o contexto geográfico explicitamente indicado nos estudos. Quando o contexto geográfico não estava identificado, foi registrado como não especificado, sem inferência baseada na afiliação dos autores ou em fontes externas.

A síntese relacionou problema de decisão, estratégia de modelagem, nível decisório e contexto empírico, permitindo identificar convergências, divergências e tensões e fundamentar a estrutura integradora apresentada na Figura 2. Essa estrutura constitui uma proposição analítica derivada do *corpus*, e não uma taxonomia universal da PO.

A consistência foi assegurada pela aplicação uniforme dos critérios de elegibilidade e das categorias de extração aos 13 estudos, mantendo a correspondência entre questão de investigação, seleção, extração e síntese, conforme Snyder (2019). Os resultados são delimitados pelo período, pelas bases consultadas, pela estratégia de busca, pelos critérios de elegibilidade e pela dimensão do *corpus*. A análise temática possui, por isso, caráter exploratório e não pretende representar exaustivamente a produção científica sobre PO em transportes e logística.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Estrutura analítica do *corpus* e caracterização dos problemas de decisão

O *corpus* final reúne 13 estudos, codificados segundo o tipo de problema, o método de solução, o nível decisório e o domínio funcional. O Quadro 1 apresenta a caracterização individual dos estudos.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Quadro 1. Estrutura analítica dos estudos do *corpus*

Obra	Tipo de problema	Método de solução	Nível decisório	Domínio funcional
An e Lo (2015)	Desenho/ configuração de redes de transporte	Otimização robusta + programação inteira mista	Estratégico	Transporte público multimodal
An e Lo (2016)	Desenho/ configuração de redes de transporte	Programação estocástica em duas fases + busca em vizinhança	Estratégico	Transporte público
Cacchiani et al. (2020)	Planejamento integrado de paradas e horários	Programação inteira mista + *Light Robustness*	Estratégico	Transporte ferroviário
Hornstra et al. (2020)	Roteamento e distribuição	Programação inteira mista + *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS)	Operacional	Logística e distribuição
Keskin e Çatay (2016)	Roteamento de veículos elétricos	Programação inteira mista + *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS)	Operacional	Transporte elétrico e logística
Keyvanshokooh et al. (2016)	Desenho de redes de cadeia de abastecimento	Programação robusta-estocástica híbrida + decomposição de Benders	Estratégico	Cadeia de abastecimento
Liu e Zhou (2016)	Desenho de redes de transporte público	Programação inteira + decomposição de Lagrange	Estratégico/ tático	Transporte público
Pi et al. (2019)	Gestão e atribuição de fluxos	Desigualdade variacional + projeção por gradiente	Tático/ operacional	Transporte multimodal
Qiu e Wang (2016)	Desenho de redes de cadeia de abastecimento	Otimização robusta + programação linear/cone de segunda ordem	Estratégico	Cadeia de abastecimento
Ulmer (2020)	Preços e roteamento dinâmicos	Processo de decisão de Markov + aproximação de função de valor	Operacional	Logística urbana
Vidal (2022)	Roteamento e distribuição	*Hybrid Genetic Search* + busca local	Operacional	Logística e distribuição
Zhang et al. (2019)	Mobilidade sob demanda	Teoria das filas + programação linear/ otimização não linear	Estratégico/ operacional	Mobilidade urbana

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Obra	Tipo de problema	Método de solução	Nível decisório	Domínio funcional
Zhou et al. (2021)	Configuração de linhas e determinação de frequência	Programação não linear inteira mista + aproximação externa	Estratégico/ tático	Transporte ferroviário urbano

Fonte: Elaboração própria (2026).

Para identificar a distribuição dos problemas sem repetir a caracterização individual, os estudos foram agregados em cinco categorias, apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Frequência dos estudos por tipo de problema

Tipo de problema	Desenho/ configuração de redes	Roteamento e distribuição	Gestão e atribuição de fluxos	Mobilidade sob demanda	Preços e roteamento dinâmicos	Total
N	6	3	2	1	1	13
%	46,2	23,1	15,4	7,7	7,7	100

Fonte: Elaboração própria (2026).

A concentração em desenho e configuração de redes não significa, contudo, homogeneidade metodológica. Os seis estudos abrangem transporte público, transporte ferroviário e redes de cadeia de abastecimento e mobilizam formulações robustas, estocásticas, inteiras e híbridas. O resultado aproxima-se da organização dos problemas de transporte segundo níveis estratégico, tático e operacional apresentada por Crainic e Laporte (1997), mas o *corpus* analisado mostra uma presença particularmente forte das decisões estruturais sob condições de incerteza.

A segunda concentração, em roteamento e distribuição, apresenta uma lógica distinta. Hornstra et al. (2020), Keskin e Çatay (2016) e Vidal (2022) tratam problemas operacionais de elevada complexidade combinatória, mas não recorrem à mesma estratégia de solução. A coexistência de procedimentos exatos, *Adaptive Large Neighborhood Search* e *Hybrid Genetic Search* mostra que a categoria do problema, por si só, não determina um único método.

O resultado mais relevante desta caracterização é, portanto, a existência de uma relação entre estrutura do problema e estratégia de modelagem, sem correspondência rígida entre domínio funcional e método de solução. Essa relação constitui a base para a análise da organização metodológica do *corpus*.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

3.2. Evolução metodológica das aplicações de Pesquisa Operacional

Os 13 estudos não evidenciam uma sucessão linear de métodos, mas uma diversificação das estratégias de solução em função das características dos problemas de decisão. A programação matemática permanece transversal ao *corpus*, enquanto a representação da incerteza e a complexidade computacional justificam o uso de otimização robusta e estocástica, heurísticas, meta-heurísticas e abordagens híbridas.

Nos problemas de desenho ou configuração de redes, a incerteza ocupa posição central. An e Lo (2015) utilizam otimização robusta para representar a incerteza da demanda, enquanto An e Lo (2016) adotam programação estocástica em duas fases. Cacchiani et al. (2020) recorrem à *Light Robustness* para limitar os efeitos da incerteza sobre a demanda de passageiros. Esses estudos mostram que a incerteza pode ser representada por diferentes estruturas, com implicações distintas para a formulação e a solução.

Nos problemas de roteamento, a ênfase desloca-se para a eficiência computacional. Keskin e Çatay (2016) empregam *Adaptive Large Neighborhood Search* no roteamento de veículos elétricos com janelas de tempo, enquanto Vidal (2022) utiliza *Hybrid Genetic Search* no CVRP. Hornstra et al. (2020) combinam formulação matemática e ALNS para tratar problemas de coleta e entrega simultâneas com custos de manuseio. Essa diversidade confirma que a complexidade combinatória requer estratégias diferenciadas de exploração do espaço de soluções.

A relação entre incerteza e complexidade computacional torna-se particularmente evidente em Keyvanshokooh et al. (2016), que articulam otimização robusta e estocástica no desenho de redes de cadeia de abastecimento e utilizam decomposição de Benders. Qiu e Wang (2016), por sua vez, formulam modelos robustos para redes de cadeia de abastecimento sob incerteza da demanda e interrupções de fornecimento, com reformulações em programação linear e programação cônica de segunda ordem.

Os resultados mostram, portanto, que os métodos não se distribuem aleatoriamente pelo *corpus*: concentram-se em determinados problemas e níveis decisórios. Essa associação sustenta a análise temática seguinte, na qual a organização das aplicações é examinada para além da classificação individual dos estudos.

3.3. Organização temática do *corpus*

A análise temática complementa a caracterização individual dos estudos ao mostrar como os problemas investigados se distribuem no interior do *corpus*. A Figura 1 apresenta essa organização a partir das categorias definidas na codificação dos 13 estudos.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

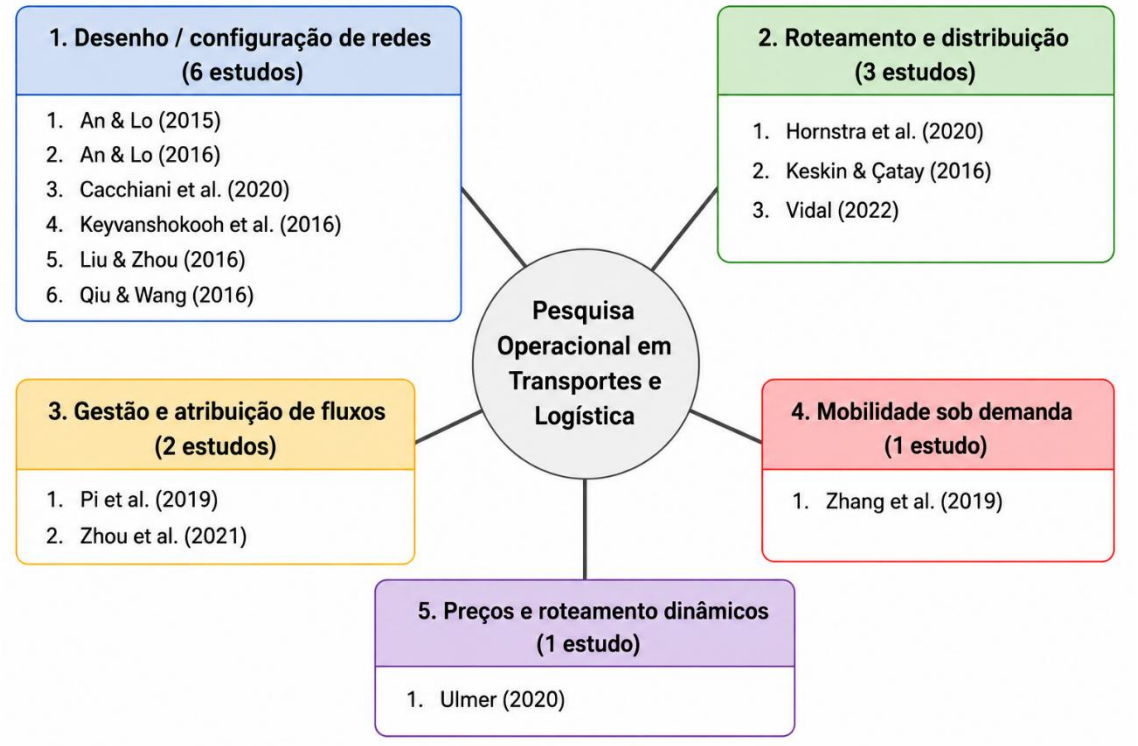
A organização reúne cinco categorias, com frequências distintas: desenho/configuração de redes, roteamento e distribuição, gestão e atribuição de fluxos, mobilidade sob demanda e preços e roteamento dinâmicos. A maior frequência corresponde ao desenho/configuração de redes, com seis estudos, seguida pelo roteamento e distribuição, com três. As demais categorias correspondem, respectivamente, a dois, um e um estudo. Essas frequências descrevem a composição do *corpus* e não permitem estabelecer uma hierarquia de importância científica entre os temas.

A distribuição temática evidencia uma primeira diferenciação entre decisões estruturais e decisões operacionais. Os estudos sobre desenho/configuração de redes concentram-se na definição de serviços, redes e estruturas logísticas, enquanto os estudos de roteamento e distribuição tratam predominantemente da alocação operacional de recursos. Essa distinção é compatível com a organização dos problemas de transporte segundo diferentes níveis de decisão discutida por Crainic e Laporte (1997). No *corpus* analisado, contudo, os problemas estruturais incorporam frequentemente demanda incerta e outras formas de variabilidade, enquanto os problemas operacionais recorrem a estratégias destinadas a obter soluções computacionalmente eficientes.

Uma segunda diferenciação resulta da presença de problemas nos quais fluxo, demanda e decisões operacionais são tratados de forma dinâmica. Pi et al. (2019) formulam uma atribuição dinâmica multimodal que integra diferentes classes de veículos, transporte público e estacionamento. O modelo é formulado como um problema de desigualdade variacional e resolvido mediante projeção por gradiente. Zhang et al. (2019) analisam sistemas de mobilidade sob demanda mediante uma abordagem baseada na teoria das filas, com formulações de programação linear e otimização não linear. Ulmer (2020) articula preços e roteamento no contexto de entregas no mesmo dia, modelando o problema como processo de decisão de Markov.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 1. Mapa temático dos termos e categorias identificados no *corpus*



Fonte: Elaboração própria (2026).

A literatura sobre roteamento sistematizada por Toth e Vigo (2002) fornece uma referência para compreender a diversidade estrutural dos problemas de alocação de veículos. No *corpus* desta revisão, essa diversidade aparece associada a extensões que incorporam recarga de veículos elétricos, coleta e entrega simultâneas e procedimentos avançados de busca. Por sua vez, Dekker et al. (2012) mostram que as aplicações da Pesquisa Operacional em logística podem integrar decisões de planejamento, transporte e sustentabilidade. No *corpus* analisado, contudo, os objetivos ambientais não constituem uma categoria temática dominante.

A organização temática identificada permite reconhecer simultaneamente a especialização dos problemas e a aproximação entre decisões relacionadas. Essa característica mostra que a diversidade das aplicações não se explica apenas pelos domínios funcionais, mas também pela relação entre o tipo de decisão e a estratégia de modelagem adotada.

3.4. Convergências, divergências e tensões na evolução do campo

Os estudos convergem no uso de modelagem quantitativa para estruturar problemas de decisão em transportes e logística, mas divergem quanto à representação da incerteza, às

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

estratégias de solução e à escala decisória. Essas diferenças mostram que a evolução do campo não ocorre por substituição linear de métodos, mas por sua diferenciação segundo as características dos problemas.

A primeira tensão refere-se ao tratamento da incerteza. An e Lo (2015) utilizam otimização robusta no desenho de redes sob incerteza da demanda, enquanto An e Lo (2016) adotam programação estocástica em duas fases. Cacchiani et al. (2020) também recorrem à otimização robusta no planejamento ferroviário. A convergência está no tratamento explícito da incerteza; a divergência, na forma de sua representação e nas decisões às quais os modelos são aplicados.

Nos problemas de roteamento, a tensão desloca-se para a relação entre qualidade da solução e esforço computacional. Keskin e Çatay (2016) empregam *Adaptive Large Neighborhood Search* no roteamento de veículos elétricos; Hornstra et al. (2020) combinam formulação inteira, procedimentos exatos e heurísticos; e Vidal (2022) utiliza *Hybrid Genetic Search* e busca local. A diversidade decorre das estruturas específicas dos problemas e das exigências computacionais, e não de uma substituição entre métodos.

Outra tensão ocorre entre especialização e integração das decisões. Pi et al. (2019) integram diferentes classes de veículos, transporte público e estacionamento em uma formulação de atribuição dinâmica multimodal; Zhang et al. (2019) relacionam demanda, capacidade e controle em sistemas de mobilidade sob demanda; e Ulmer (2020) articula preços e roteamento em entregas no mesmo dia. Essas aplicações mostram maior interdependência entre decisões, embora a especialização permaneça predominante no *corpus*.

A transferibilidade constitui uma terceira questão. A adequação de uma formulação depende não apenas de sua estrutura matemática, mas também dos dados disponíveis, das condições operacionais e das características do sistema estudado. Como observam Anand et al. (2012), problemas de logística urbana são condicionados pelas características concretas dos sistemas em que são formulados. No *corpus* analisado, essa relação entre modelo e contexto é particularmente relevante diante da diversidade dos ambientes empíricos considerados.

Em síntese, o campo combina especialização das estratégias de modelagem e crescente interdependência entre determinadas decisões. Essa evidência fundamenta o *framework* integrador proposto, que relaciona problema de decisão, estratégia de modelagem, nível decisório e contexto empírico. Trata-se de uma estrutura analítica derivada do *corpus*, e não de uma nova taxonomia universal ou de um método de otimização.

Para Moçambique, o *framework* orienta investigações futuras sem pressupor a transferência direta de modelos desenvolvidos em outros contextos. Sua aplicação requer

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

consideração da natureza da decisão, das características do sistema, dos dados disponíveis e das condições concretas de operação.

3.5. Evidência empírica e distribuição geográfica do conhecimento

A dimensão empírica evidencia diferentes formas de contextualização dos estudos. Entre os 13 trabalhos analisados, cinco apresentam localização geográfica explícita, enquanto os demais utilizam redes hipotéticas, instâncias computacionais, dados de referência ou ambientes de simulação sem localização geográfica real identificada. A Tabela 3 sistematiza essa distribuição.

Tabela 3. Contexto geográfico e natureza da evidência empírica

Contexto geográfico ou ambiente de experimentação	Nº de estudos
Wuhan–Guangzhou, China	1
Hangzhou, China	1
Pittsburgh e Fresno, Estados Unidos	1
Manhattan, Estados Unidos, e Hangzhou, China	1
Hong Kong	1
Redes hipotéticas/experimentais, sem localização geográfica real	3
Instâncias computacionais/de referência (benchmark), sem localização geográfica real	3
Instâncias geradas aleatoriamente, sem localização geográfica real	1
Ambiente computacional/simulação, sem localização geográfica específica	1
Total	13

Fonte: Elaboração própria (2026).

A distribuição evidencia que a localização geográfica é explicitamente incorporada em cinco estudos, enquanto oito utilizam ambientes experimentais ou computacionais sem localização geográfica real. Essa característica limita a avaliação da transferibilidade dos modelos para sistemas com condições operacionais distintas.

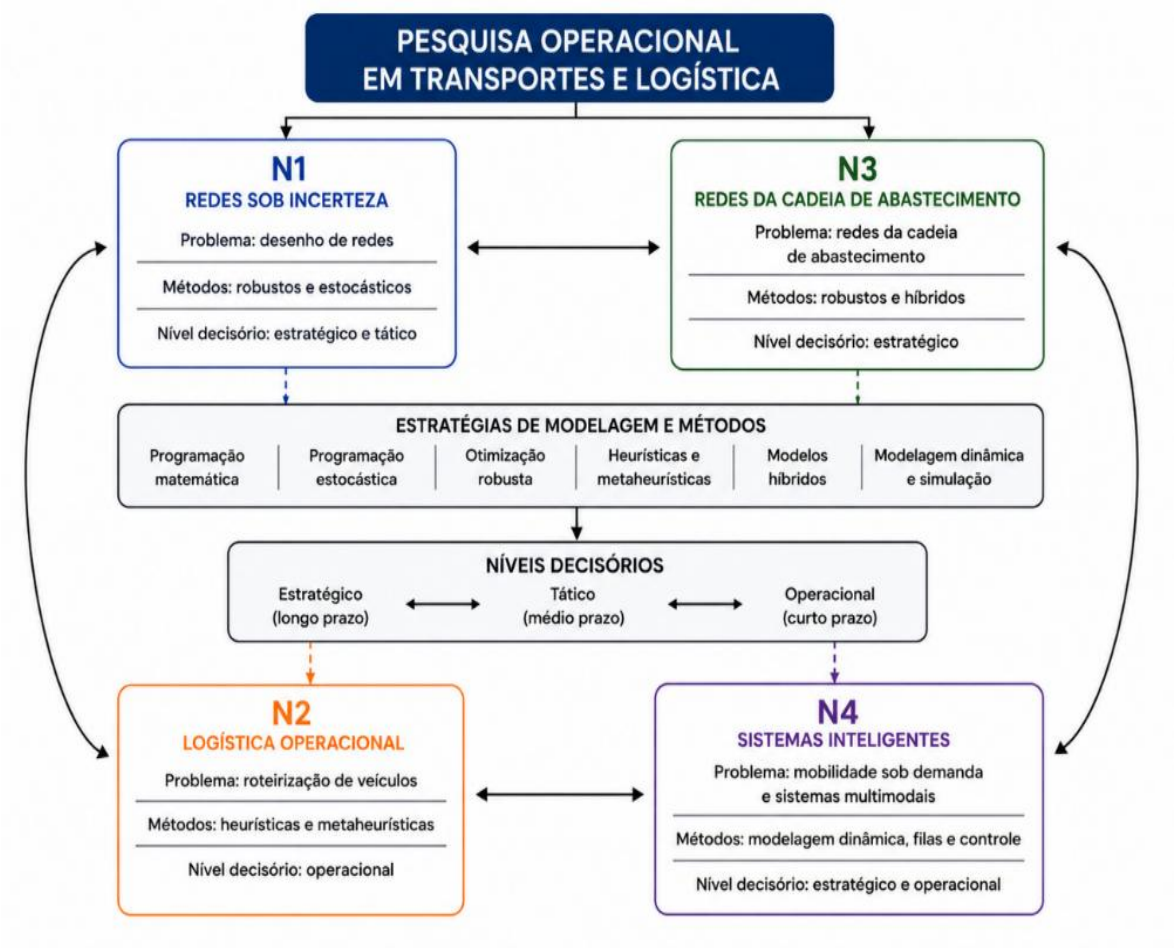
Não foi identificado estudo desenvolvido em Moçambique entre os 13 trabalhos selecionados. Esse resultado indica uma lacuna de representação do contexto moçambicano no *corpus* analisado, sem permitir afirmar a inexistência de investigação nacional sobre o tema. Para Moçambique, futuras aplicações da Pesquisa Operacional deverão considerar as características dos sistemas locais, a disponibilidade de dados e as condições concretas de operação.

3.6. Implicações para investigação futura

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

A análise conjunta do *corpus* mostra que a PO em transportes e logística pode ser interpretada pela relação entre quatro dimensões recorrentes: problema de decisão, estratégia de modelagem, nível decisório e contexto empírico. A articulação dessas dimensões fundamenta o *framework* integrador apresentado na Figura 2.

Figura 2. *Framework* integrador da Pesquisa Operacional em transportes e logística



Fonte: Elaboração própria (2026).

A primeira implicação refere-se à coexistência de decisões estratégicas, táticas e operacionais, predominantemente tratadas de forma especializada. Isso sugere oportunidades de investigação que integrem configuração de redes, planejamento de serviços e operações de curto prazo no mesmo sistema de transporte ou logística.

A segunda decorre da diversidade das estratégias de solução. A presença de programação matemática, programação estocástica, otimização robusta, heurísticas, meta-

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

heurísticas e abordagens híbridas indica que a escolha metodológica depende da estrutura do problema e das exigências computacionais. Estudos futuros deverão, portanto, avaliar em que condições diferentes estratégias produzem soluções adequadas aos problemas e níveis decisórios considerados, em vez de buscar uma técnica universal.

A terceira implicação relaciona-se à evidência empírica. A ausência de localização geográfica real em oito dos 13 estudos limita a apreciação da transferibilidade dos modelos. Aplicações futuras deverão explicitar as características dos sistemas estudados, as fontes de dados, as restrições consideradas e os procedimentos de validação. No contexto moçambicano, essa questão é particularmente relevante: a ausência de estudos nacionais no *corpus* não demonstra inadequação dos modelos existentes, mas deixa em aberto sua adequação às condições locais, cuja avaliação requer dados e situações operacionalmente identificáveis.

O contributo específico da revisão consiste, assim, na integração dessas quatro dimensões em uma estrutura analítica que incorpora a avaliação da solução como mecanismo de retroalimentação do processo decisório. O *framework* constitui, portanto, uma proposição analítica derivada do *corpus*, cuja validade externa deverá ser examinada em estudos posteriores, especialmente em sistemas de transporte e logística ainda pouco representados na literatura.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo analisou a organização da Pesquisa Operacional aplicada aos transportes e à logística na literatura publicada entre 2015 e 2025, considerando problemas de decisão, estratégias de modelagem, níveis decisórios e contextos de aplicação. A análise dos 13 estudos selecionados evidenciou diversidade de problemas e métodos, acompanhada de limitada explicitação dos contextos empíricos em parte significativa do *corpus*.

O principal resultado interpretativo é que a diversificação metodológica não se traduz, no mesmo grau, em integração entre problemas, níveis decisórios e contextos de aplicação. Predomina a especialização das estratégias de solução segundo as características dos problemas, embora algumas aplicações articulem decisões de diferentes dimensões. A análise evidencia, assim, que compreender a organização do campo requer relacionar o que se decide, como se modela, em que nível e em que contexto a solução é avaliada.

Com base nessa relação, propôs-se um *framework* integrador que articula essas quatro dimensões e incorpora a avaliação da solução como mecanismo de retroalimentação do processo decisório. Seu contributo não está na introdução de um novo algoritmo ou de uma

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

taxonomia universal, mas na sistematização analítica das relações identificadas no *corpus*. Sua validade em outros contextos permanece, contudo, como questão empírica a ser examinada.

Não foi identificado estudo desenvolvido em Moçambique entre os trabalhos selecionados. Esse resultado não permite afirmar a inexistência de investigação nacional sobre o tema, mas evidencia uma lacuna na representação empírica do contexto moçambicano e reforça a necessidade de estudos baseados em dados locais para avaliar a adequação e a transferibilidade de modelos desenvolvidos em outros sistemas.

Os resultados devem ser interpretados considerando o período analisado, as bases consultadas, os critérios de elegibilidade e a dimensão do *corpus*. A análise temática possui caráter exploratório e não pretende representar exaustivamente a produção científica internacional sobre Pesquisa Operacional em transportes e logística.

Investigações futuras poderão testar o *framework* em diferentes contextos, particularmente africanos e moçambicanos, articulando modelagem matemática, dados observacionais e validação das soluções. Esse desenvolvimento poderá aproximar as estratégias de Pesquisa Operacional das condições concretas em que as decisões de transporte e logística são formuladas e implementadas.

REFERÊNCIAS

Adamo, T., Gendreau, M., Ghiani, G., & Guerriero, E. (2024). A review of recent advances in time-dependent vehicle routing. *European Journal of Operational Research, 319*(1), 1–15. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2024.06.016

African Development Bank Group. (2018). *Mozambique: Country strategy paper 2018–2022*. African Development Bank Group. https://www.afdb.org/en/documents/document/mozambique-country-strategy-paper-2018-2022-103013

An, K., & Lo, H. K. (2015). Robust transit network design with stochastic demand considering development density. *Transportation Research Part B: Methodological, 81*, 737–754. https://doi.org/10.1016/j.trb.2015.05.019

An, K., & Lo, H. K. (2016). Two-phase stochastic program for transit network design under demand uncertainty. *Transportation Research Part B: Methodological, 84*, 157–181. https://doi.org/10.1016/j.trb.2015.12.009

Anand, N., Quak, H., Van Duin, R., & Tavasszy, L. (2012). City logistics modeling efforts: Trends and gaps: A review. *Procedia - Social and Behavioral Sciences, 39*, 101–115. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.03.094

Birge, J. R., & Louveaux, F. (2011). *Introduction to stochastic programming* (2nd ed.). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0237-4

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Booth, A., Sutton, A., & Papaioannou, D. (2016). *Systematic approaches to a successful literature review* (2nd ed.). Sage.

Braun, V., & Clarke, V. (2021). *Thematic analysis: A practical guide*. SAGE Publications. https://www.sagepub.com/shop/buy-a-book/thematic-analysis-1-248481

Cacchiani, V., Qi, J., & Yang, L. (2020). Robust optimization models for integrated train stop planning and timetabling with passenger demand uncertainty. *Transportation Research Part B: Methodological, 136*, 1–29. https://doi.org/10.1016/j.trb.2020.03.009

Comi, A., Delle Site, P., Filippi, F., & Nuzzolo, A. (2012). Urban freight transport demand modelling: A state of the art. *European Transport / Trasporti Europei, 51*, 1–17. https://hdl.handle.net/10077/6123

Crainic, T. G., & Laporte, G. (1997). Planning models for freight transportation. *European Journal of Operational Research, 97*(3), 409–438. https://doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00298-6

Dantzig, G. B. (1998). *Linear programming and extensions*. Princeton University Press.
De la Torre, R., Corlu, C. G., Faulin, J., Onggo, B. S., & Juan, A. A. (2021). Simulation, optimization, and machine learning in sustainable transportation systems: Models and applications. *Sustainability, 13*(3), Article 1551. https://doi.org/10.3390/su13031551

Dekker, R., Bloemhof, J., & Mallidis, I. (2012). Operations research for green logistics: An overview of aspects, issues, contributions and challenges. *European Journal of Operational Research, 219*(3), 671–679. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.11.010

Gendreau, M., & Potvin, J.-Y. (Eds.). (2010). *Handbook of metaheuristics* (2nd ed.). Springer.
Hornstra, R. P., Silva, A., Roodbergen, K. J., & Coelho, L. C. (2020). The vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery and handling costs. *Computers & Operations Research, 115*, Article 104858. https://doi.org/10.1016/j.cor.2019.104858

Irnich, S., Toth, P., & Vigo, D. (2014). The family of vehicle routing problems. In P. Toth & D. Vigo (Eds.), *Vehicle routing: Problems, methods, and applications* (2nd ed., pp. 1–33). SIAM. https://doi.org/10.1137/1.9781611973594.ch1

Keskin, M., & Çatay, B. (2016). Partial recharge strategies for the electric vehicle routing problem with time windows. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 65*, 111–127. https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.01.013

Keyvanshokooh, E., Ryan, S. M., & Kabir, E. (2016). Hybrid robust and stochastic optimization for closed-loop supply chain network design using accelerated Benders decomposition. *European Journal of Operational Research, 249*(1), 76–92. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.08.028

Kitchenham, B. (2004). *Procedures for performing systematic reviews*. Keele University.
Liu, J., & Zhou, X. (2016). Capacitated transit service network design with boundedly rational agents. *Transportation Research Part B: Methodological, 93*, 225–250. https://doi.org/10.1016/j.trb.2016.07.015

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

(2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ, 372*, n71. https://doi.org/10.1136/bmj.n71

Pi, X., Ma, W., & Qian, Z. S. (2019). A general formulation for multi-modal dynamic traffic assignment considering multi-class vehicles, public transit and parking. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 104*, 369–389. https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.05.011

Porter, G. (2014). Transport services and their impact on poverty and growth in rural sub-Saharan Africa: A review of recent research and future research needs. *Transport Reviews, 34*(1), 25–45. https://doi.org/10.1080/01441647.2013.865148

Qiu, R., & Wang, Y. (2016). Supply chain network design under demand uncertainty and supply disruptions: A distributionally robust optimization approach. *Scientific Programming, 2016*, Article 3848520. https://doi.org/10.1155/2016/3848520

Rodrigue, J. P. (2020). *The geography of transport systems* (5th ed.). Routledge.
Sabet, S., & Farooq, B. (2022). Green vehicle routing problem: State of the art and future directions. *IEEE Access, 10*, 101622–101642. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3208899

Sheffi, Y. (1985). *Urban transportation networks: Equilibrium analysis with mathematical programming methods*. Prentice-Hall.

Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research, 104*, 333–339. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039

Toth, P., & Vigo, D. (Eds.). (2002). *The vehicle routing problem*. SIAM. https://doi.org/10.1137/1.9780898718515

Ulmer, M. W. (2020). Dynamic pricing and routing for same-day delivery. *Transportation Science, 54*(4), 1016–1033. https://doi.org/10.1287/trsc.2019.0958

Vidal, T. (2022). Hybrid genetic search for the CVRP: Open-source implementation and SWAP* neighborhood. *Computers & Operations Research, 140*, Article 105643. https://doi.org/10.1016/j.cor.2021.105643

Vidal, T., Laporte, G., & Matl, P. (2020). A concise guide to existing and emerging vehicle routing problem variants. *European Journal of Operational Research, 286*(2), 401–416. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.10.010

World Bank. (2017). *Mozambique urbanization review: Accelerating inclusive and resilient urban growth*. World Bank. https://openknowledge.worldbank.org/server/api/core/bitstreams/b70b7f31-0a2c-517f-bb92-11293efb128b/content

Zhang, R., Rossi, F., & Pavone, M. (2019). Analysis, control, and evaluation of mobility-on-demand systems: A queueing-theoretical approach. *IEEE Transactions on Control of Network Systems, 6*(1), 115–126. https://doi.org/10.1109/TCNS.2018.2800403

Zhou, Y., Yang, H., Wang, Y., & Yan, X. (2021). Integrated line configuration and frequency determination with passenger path assignment in urban rail transit networks. *Transportation Research Part B: Methodological, 145*, 134–151. https://doi.org/10.1016/j.trb.2021.01.002

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.