



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES**

**JOÃO EVANGELISTA DANTAS DOS SANTOS**

**ANÁLISE DA VULNERABILIDADE DA REDE VIÁRIA URBANA NA**  
**ACESSIBILIDADE DO TRANSPORTE URBANO DE CARGAS SOB A ÓTICA DA**  
**EMIÇÃO DE CO<sub>2</sub>**

**FORTALEZA**

**2024**



JOÃO EVANGELISTA DANTAS DOS SANTOS

**ANÁLISE DA VULNERABILIDADE DA REDE VIÁRIA URBANA NA  
ACESSIBILIDADE DO TRANSPORTE URBANO DE CARGAS SOB A ÓTICA DA  
EMISSÃO DE CO<sub>2</sub>**

Documento de tese apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, do Centro de Ciências e Tecnologias da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Transportes. Área de Concentração: Planejamento e Operação de Sistemas de Transportes.

Orientador: Prof. Dr. Bruno Vieira Bertoncini.

**FORTALEZA, CE.**

**2024**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- S235a Santos, João Evangelista Dantas dos.  
ANÁLISE DA VULNERABILIDADE DA REDE VIÁRIA URBANA NA ACESSIBILIDADE DO TRANSPORTE URBANO DE CARGAS SOB A ÓTICA DA EMISSÃO DE CO<sub>2</sub> / João Evangelista Dantas dos Santos. – 2024.  
142 f. : il. color.
- Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2024.  
Orientação: Prof. Dr. Bruno Vieira Bertoini.
1. Acessibilidade do Transporte de Urbano de Cargas. 2. Vulnerabilidade da Rede. 3. Geometria da Rede Viária. 4. Emissão de Poluentes. I. Título.

CDD 388

---

JOÃO EVANGELISTA DANTAS DOS SANTOS

**ANÁLISE DA VULNERABILIDADE DA REDE VIÁRIA URBANA NA ACESSIBILIDADE DO  
TRANSPORTE URBANO DE CARGAS SOB A ÓTICA DA EMISSÃO DE CO<sub>2</sub>**

Documento de tese apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, do Centro de Ciências e Tecnologias da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Transportes. Área de Concentração: Planejamento e Operação de Sistemas de Transportes.

Aprovada em: 29 / 08 / 2024

**BANCA EXAMINADORA**

Documento assinado digitalmente  
 **BRUNO VIEIRA BERTONCINI**  
Data: 03/09/2024 14:54:38-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Bruno Vieira Bertoncini (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Documento assinado digitalmente  
 **FRANCISCO GILDEMIER FERREIRA DA SILVA**  
Data: 02/09/2024 14:52:34-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Francisco Gildemir Ferreira da Silva  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. André Luiz Cunha  
Universidade de São Paulo (USP)

Documento assinado digitalmente  
 **LEONARDO HERSZON MEIRA**  
Data: 31/08/2024 11:27:24-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Leonardo Herszon Meira  
Universidade Federal do Pernambuco (UFPE)

---

Prof. Dr. Cláudio Luiz Marte  
Universidade de São Paulo (Poli-USP)

**FORTALEZA  
2024**



## USPAssina - Autenticação digital de documentos da USP

### Registro de assinatura(s) eletrônica(s)

Este documento foi assinado de forma eletrônica pelos seguintes participantes e sua autenticidade pode ser verificada através do código UVL4-5QRG-NKWJ-K3Y7 no seguinte link: <https://portalservicos.usp.br/iddigital/UVL4-5QRG-NKWJ-K3Y7>

**Claudio Luiz Marte**

Nº USP: 654542

Data: 31/08/2024 10:17



## USPAssina - Autenticação digital de documentos da USP

### Registro de assinatura(s) eletrônica(s)

Este documento foi assinado de forma eletrônica pelos seguintes participantes e sua autenticidade pode ser verificada através do código 3B36-B8F1-C51L-7URB no seguinte link: <https://portalservicos.usp.br/iddigital/3B36-B8F1-C51L-7URB>

**André Luiz Barbosa Nunes da Cunha**

Nº USP: 5207246

Data: 03/09/2024 13:20

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Primeiramente à Deus, pelo dom da vida e por todas as vezes que em um algum momento de fraqueza, ou insegurança, ou de dificuldade, me fez enxergar, sentir, algo que me pusesse novamente à luta.

Aos meus pais, principalmente a minha mãe, Francisca Lúcia, e meu pai, Ronaldo Bezerra, que foram e sempre serão os meus maiores e mais qualificados orientadores para a vida, pelos seus esforços e sacrifícios, para que eu estivesse hoje vivendo este momento.

Ao meu irmão, Ronaldo Filho, sua esposa Jaysa, e o meu sobrinho Antônio Neto, que se fizeram presentes nos momentos difíceis e sem que soubessem me ajudaram a entender que não posso desistir.

À minha namorada Vanessa Sousa, que me acompanhou nessa trajetória, sempre acreditando no final dela, e me dando forças para continuar sendo minha principal confidente dos momentos difíceis.

Ao professor Bruno Bertoncini, pela paciência em lhe dar comigo, pela coragem e disposição em me acompanhar desde 2014, desde o mestrado. Pelos ensinamentos, orientações, conhecimento compartilhado, pelos puxões de orelha, mas sobretudo pela confiança a mim depositada ainda que eu não tenha correspondido à altura da expectativa, e que vou levar pra sempre como amigo.

Aos amigos próximos, que além de apostarem em mim, me ajudaram a descansar quando eu me via cansado, ou em intenso conflito.

Aos professores do Departamento de Engenharia de Produção Mecânica da Universidade Regional do Cariri, pelo apoio, força, e suporte em momentos que a parceria foi necessária.

Aos professores do Departamento de Engenharia de Transportes da UFC, que muito contribuíram para a minha formação e crescimento profissional.

Ao Grupo de Pesquisa em Transportes, Trânsito e Meio Ambiente – GTTEMA, que de alguma forma puderam contribuir com esta pesquisa.

Agradeço também aos membros do meu comitê de tese, por suas valiosas contribuições, críticas construtivas e sugestões, que enriqueceram imensamente este estudo.

“Até você se tornar consciente, o inconsciente irá dirigir sua vida e você vai chamar isso de destino.” (Carl Gustav Jung, 1930).

## RESUMO

A mobilidade urbana nas grandes cidades enfrenta desafios significativos devido aos congestionamentos, que impactam a economia, o meio ambiente e a saúde pública, agravados pela rápida urbanização. No Brasil, o transporte urbano de cargas tem sido alvo de políticas públicas por contribuir para as emissões de CO<sub>2</sub>. Fatores como a vulnerabilidade da rede viária, intensificada por inundações e acidentes, comprometem a eficiência operacional desse setor, destacando a necessidade de equilibrar custos operacionais e ambientais no transporte sustentável. Um planejamento urbano adequado e uma gestão eficiente do fluxo de veículos são essenciais para mitigar congestionamentos e reduzir a poluição, demandando uma abordagem integrada que considere aspectos econômicos, espaciais e ambientais. Este trabalho tem como objetivo principal analisar a vulnerabilidade da rede viária urbana e sua influência na acessibilidade do transporte urbano de cargas, com foco na emissão de CO<sub>2</sub>. Para isso, serão realizados estudos que envolvem: a análise dos impactos das características topológicas da rede viária na escolha de caminhos; a investigação de como essas configurações afetam a vulnerabilidade e a acessibilidade do transporte de cargas; e a avaliação do impacto da vulnerabilidade viária na emissão de CO<sub>2</sub> associada ao transporte urbano de cargas. A identificação dos fatores que aumentam a vulnerabilidade da rede viária para o transporte de cargas, indicam que infraestrutura deficiente, congestionamentos e restrições de circulação são os principais fatores de vulnerabilidade, com falta de manutenção e planejamento adequado sendo críticos para a segurança e eficiência. A análise da vulnerabilidade e em como afeta a acessibilidade da rede viária, mostram que áreas vulneráveis apresentam acessibilidade reduzida, resultando em maiores tempos de deslocamento e custos operacionais. Sugere-se que investimentos em infraestrutura e políticas de gestão de tráfego podem melhorar a acessibilidade. A avaliação da relação entre acessibilidade e vulnerabilidade da rede urbana, considerando diferentes configurações topológicas e impedâncias para veículos de carga, avaliando o impacto na emissão de CO<sub>2</sub>, ajudam na elaboração de um indicador integrado de emissão e tempo de viagem fornece uma análise detalhada. Esses resultados são fundamentais para o planejamento urbano, mostrando que redes viárias irregulares são mais vulneráveis a interrupções, levando a redistribuição caótica do tráfego, enquanto redes regulares mantêm equilíbrio temporário, mas desenvolvem novas vulnerabilidades a longo prazo. A análise de vulnerabilidade e suas consequências nas emissões de CO<sub>2</sub> destaca a importância de medidas restritivas para promover sistemas de transporte urbano de carga mais sustentáveis e eficientes.

**Palavras-chave:** Acessibilidade do Transporte de Urbano de Cargas; Vulnerabilidade da Rede; Geometria da Rede Viária; Emissão de Poluentes.

## ABSTRACT

Urban mobility in large cities faces significant challenges due to congestion, which impacts the economy, the environment, and public health, exacerbated by rapid urbanization. In Brazil, urban freight transport has been the focus of public policies for its contribution to CO<sub>2</sub> emissions. Factors such as the vulnerability of the road network, intensified by floods and accidents, compromise the operational efficiency of this sector, highlighting the need to balance operational and environmental costs in sustainable transport. Proper urban planning and efficient vehicle flow management are essential to mitigate congestion and reduce pollution, demanding an integrated approach that considers economic, spatial, and environmental aspects. This study aims to analyze the vulnerability of the urban road network and its influence on the accessibility of urban freight transport, focusing on CO<sub>2</sub> emissions. To this end, studies will be conducted involving: the analysis of the impacts of road network topological characteristics on route choice; the investigation of how these configurations affect the vulnerability and accessibility of freight transport; and the evaluation of the impact of road network vulnerability on CO<sub>2</sub> emissions associated with urban freight transport. Chapter 2 identifies factors that increase the vulnerability of the road network for freight transport. Results indicate that poor infrastructure, congestion, and circulation restrictions are the main vulnerability factors, with lack of maintenance and proper planning being critical for safety and efficiency. Chapter 3 analyzes how vulnerability affects road network accessibility, showing that vulnerable areas have reduced accessibility, resulting in longer travel times and operational costs. It is suggested that investments in infrastructure and traffic management policies can improve accessibility. Chapter 4 examines the relationship between accessibility and vulnerability of the urban network, considering different topological configurations and impedances for freight vehicles, evaluating the impact on CO<sub>2</sub> emissions. Adapting an integrated indicator of emissions and travel time provides a detailed analysis. Results are fundamental for urban planning, showing that irregular road networks are more vulnerable to disruptions, leading to chaotic traffic redistribution, while regular networks maintain temporary balance but develop new vulnerabilities in the long term. The analysis of vulnerability and its consequences on CO<sub>2</sub> emissions highlights the importance of restrictive measures to promote more sustainable and efficient urban freight transport systems.

**Keywords:** Urban Freight Transportation Accessibility; Network Vulnerability; Road Network Topology; Pollutant Emissions.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Proposta metodológica da revisão sistemática da literatura .....	22
Figura 2.2 - Títulos duplicados entre as palavras-chave para cada base de dados.....	23
Figura 2.3 - Resultado da realização das etapas de acordo com a sequência de pesquisa. ....	24
Figura 2.4 - Sequência de parâmetros adotados no software VOSviewer®.....	24
Figura 2.5 - Comparativo entre as ocorrências das palavras-chave obtidos no VOSviewer®.....	25
Figura 2.6 – (a) Conexões a partir da palavra-chave principal “Vulnerability”; (b) Evolução da pesquisa sobre “Vulnerability” entre 2010 a 2023.....	26
Figura 2.7 – (a) Conexões a partir da palavra-chave principal “Reliability”; (b) Evolução da pesquisa sobre “Reliability” entre 2010 a 2023. ....	27
Figura 2.8 - Rede original usada de base para modelagem e estruturação das redes regular e irregular.....	34
Figura 2.9 - Redes Regular (a) e Rede Irregular (b) modeladas e estruturadas utilizando o software AIMSUN NEXT®.....	35
Figura 2.10 - Novo desenho das redes após a exclusão do link crítico. ....	36
Figura 2.11 - Comparação do fluxo médio entre as redes antes e após a exclusão do link crítico.....	37
Figura 2.12 - Ilustração dos gráficos histograma reproduzidos a partir das medidas das redes regular e irregular para cada parâmetro. ....	38
Figura 2.13 - Ilustração dos gráficos Q-Q resultado da medição dos três parâmetros a partir da análise de estatística descritiva obtida para a rede regular e rede irregular.....	40
Figura 3.1 - Efeito da localização de um Centro de Distribuição Urbano representada pelo gradiente de cores. Cor vermelha: congestionamento mais intenso .....	47
Figura 3.2 - Mapa Axial Rn de Campo de Ourique com entorno – escala não indicada. ....	49
Figura 3.3 - Mapa Axial Rn da Graça com entorno – escala não indicada.....	49
Figura 3.4 - Mapa Axial Rn de Telheiras com entorno – escala não indicada. ....	50
Figura 3.5 - Fluxograma das etapas e ações do procedimento metodológico.....	51
Figura 3.6 - Rede viária escolhida como objeto de estudo. ....	53
Figura 3.7 - Rede viária exportada do Open Street Map modelada no AIMSUN®.....	53
Figura 3.8 - Mapa temático da densidade viária através dos shapefiles exportados do QGis para o AIMSUN. ....	54
Figura 3.9 - Mapa temático da densidade de conexões. ....	55
Figura 3.10 - Ponto de interrupção do link 11117, área regular.....	59
Figura 3.11 - Parâmetro Tempo de Viagem (minutos). Link Interrompido 11117. Intervalo: 14:00 às 16:00. ....	61
Figura 3.12 - Gráfico de Controle. Parâmetro Tempo de Viagem (minutos). Link interrompido 11117.....	62

Figura 3.13 - Gráfico de Controle. Parâmetro Velocidade (km/h). Link interrompido 11117.....	63
Figura 3.14 - Série temporal fluxo de entrada (veic/h) com link interrompido 11117.....	64
Figura 3. 15 - Gráfico de dispersão do fluxo de entrada com a interrupção no link 11117.....	65
Figura 3.16 - Gráfico de Controle. Parâmetro Tempo de Atraso Simulado (segundos). Link Interrompido 11117.....	65
Figura 3.17 – Gráfico de dispersão sobre a o tempo de atraso para o caminhão com o link 11117 interrompido.....	66
Figura 3.18 - Gráfico de Controle. Parâmetro Tempo de Viagem (minutos). Link Interrompido 7383. Tipo de veículo: Caminhão., .....	67
Figura 3.19 - Gráfico de Controle. Parâmetro Velocidade (km/h). Link Interrompido 7383. ....	68
Figura 3.20 - Série temporal Fluxo de entrada (veic/h) com link interrompido 7383.....	69
Figura 3.21 - Parâmetro Tempo de Atraso (segundos). Link Interrompido 7383. Intervalo 14:00 às 16:00...	70
Figura 3.22 - Mapa temático concentração populacional. ....	114
Figura 3.23 - Mapa temático renda média. ....	114
Figura 3.24 - Mapa temático predominância de atividade: industrial x comercial.....	114
Figura 3.25 - Parâmetro Velocidade (km/h). Rede em condição normal. Intervalo: 14:00 às 16:00.....	120
Figura 3.26 - Parâmetro Velocidade (km/h). Link Interrompido (11117). Intervalo: 14:00 às 16:00.....	120
Figura 3.27 - Parâmetro Tempo de Atraso Simulado (segundos). Rede em condição normal. Intervalo: 14:00 às 16:00.....	120
Figura 3.28 - Parâmetro Tempo de Atraso Simulado (segundos). Link Interrompido 11117. Intervalo 14:00 às 16:00.....	121
Figura 3.29 - Parâmetro Tempo de Viagem (minutos). Link Interrompido 7383. Intervalo: 14:00 às 16:00.	121
Figura 3.30 - Parâmetro Velocidade (km/h). Link Interrompido 7383. Intervalo: 14:00 às 16:00.....	121
Figura 3.31 - Parâmetro Tempo de Atraso (segundos). Link Interrompido 7383. Intervalo: 14:00 às 16:00.	122
Figura 3.32 - Simulação com dois links interrompidos (11117 + 7383). Intervalo: 14:00 às 16:00.....	122
Figura 3.33 - Comportamento do parâmetro Tempo de Viagem (minutos) em diferentes intervalos de medição. ....	123
Figura 3.34 - Comportamento do parâmetro Tempo de Viagem (minutos) em diferentes intervalos de medição. Link interrompido: 11117.....	124
Figura 3.35 - Comportamento do parâmetro Velocidade (km/h) em diferentes intervalos de medição. Link interrompido: 11117.....	125
Figura 3.36 - Comportamento do parâmetro Tempo de Atraso Simulado (segundos) em diferentes intervalos de medição. Link interrompido 11117.....	126

Figura 3.37 - Comportamento do parâmetro Tempo de Viagem (minutos) em diferentes intervalos de medição. Link interrompido 7383. ....	127
Figura 3.38 - Comportamento do parâmetro Velocidade (km/h) em diferentes intervalos de medição. Link Interrompido 7383. ....	128
Figura 3.39 - Comportamento do parâmetro Tempo de Atraso (segundos) em diferentes intervalos de medição. Link Interrompido 7383. ....	129
Figura 3.40 - Comportamento do parâmetro Tempo de Viagem (minutos) em diferentes intervalos de medição. Link interrompido: 11117 + 7383. ....	130
Figura 3.41 - Comportamento do parâmetro Velocidade (km/h) em diferentes intervalos de medição. Link interrompido: 11117 + 7383. ....	131
Figura 3.42 - Comportamento do parâmetro Tempo de Atraso (segundos) em diferentes intervalos de medição. Link interrompido: 11117 + 7383. ....	132
Figura 4.1 - Histórico Global de Emissões – Países da América Latina (1990 - 2020). ....	74
Figura 4.2 - Emissão de CO <sub>2</sub> e, Brasil - Segmentado por setor energético. ....	74
Figura 4.3 - Fluxograma das etapas e ações do procedimento metodológico proposto. ....	77
Figura 4.4 - Medição da emissão de poluentes na rede viária sem interrupção do link crítico. ....	83
Figura 4.5 - Medição da emissão de poluentes na rede viária sem interrupção do link crítico, e com a rede sem corredores restritos à caminhões. ....	84
Figura 4.6 - Medição da emissão de poluentes na rede viária com interrupção do link crítico, e com corredores restritos à circulação de caminhões na região regular. ....	84
Figura 4.7 - Medição da emissão de poluentes na rede viária com interrupção do link crítico, e sem corredores restritos à circulação de caminhões na região regular. ....	85.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Seleção das palavras-chave principais. ....	22
Tabela 2.2 - Termos selecionados às palavras-chave principais na base de dados SCOPUS. ....	21
Tabela 2.3 - Áreas e Subáreas selecionadas às pesquisas nas bases de dados: SpringerLink e TRID. ....	22
Tabela 2.4 - Conjuntos de palavras-chave organizadas pela sua semântica no VOSviewer®. ....	25
Tabela 2.5 – Levantamento dos autores e suas percepções sobre a relação entre a palavra-chave principal vulnerabilidade o conjunto de palavras-chave associadas a vulnerabilidade. ....	28
Tabela 2.6 – Levantamento dos autores e suas percepções sobre a relação entre a palavra-chave principal resiliência o conjunto de palavras-chave associadas a geometria. ....	29
Tabela 2.7 – Levantamento dos autores e suas percepções sobre a relação entre a palavra-chave principal robustez o conjunto de palavras-chave associadas a elementos viários. ....	30
Tabela 2.8 - Levantamento dos autores e suas percepções sobre a relação entre a palavra-chave principal confiabilidade o conjunto de palavras-chave associadas a acessibilidade. ....	32
Tabela 2.9 - Comparativo dos resultados das análises estatísticas descritiva das simulações das redes regular e irregular. ....	38
Tabela 2.10 - Teste de Normalidade Shapiro-Wilk realizado para cada um dos parâmetros, fluxo, velocidade e tempo de viagem, para as redes regular e irregular. ....	41
Tabela 2.11 - Resultado do Teste T-Student para amostras independentes para os três parâmetros nas redes regular e irregular. ....	41
Tabela 3.1 - Classificação dos perfis logísticos. ....	56
Tabela 3.2 - Matriz OD Carros. ....	56
Tabela 3.3 - Matriz OD Caminhão. ....	57
Tabela 3.4 - Links críticos selecionados. ....	59
Tabela 3.5 - Desvio padrão e média das 10 replicações para os tempos de viagem por intervalos para o veículo caminhão com a interrupção do link 11117. ....	63
Tabela 4.1 - Resultado da aplicação do indicador TTEWBC em relação à simulação dos três cenários definidos. ....	87

O trabalho intitulado “APLICAÇÃO DE ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA VALIDAÇÃO DE PARÂMETROS NA MEDIÇÃO DE DESEMPENHO DA VULNERABILIDADE DA REDE VIÁRIA.”, fruto do esforço apresentado no capítulo 2, foi submetido e aprovado na Brazilian Journal of Production Engineering, em 08 junho de 2024, sob o DOI: <https://doi.org/10.47456/bjpe.v10i2.44663>.

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>1.1.</b>	<b>Contextualização .....</b>	<b>13</b>
<b>1.2.</b>	<b>Problemática .....</b>	<b>14</b>
<b>1.3.</b>	<b>Questões de Pesquisa .....</b>	<b>15</b>
<b>1.4.</b>	<b>Objetivos da Pesquisa .....</b>	<b>16</b>
<b>1.5.</b>	<b>Estrutura Metodológica .....</b>	<b>16</b>
<i>1.5.1.</i>	<i>Etapas da Metodologia Proposta:.....</i>	<i>17</i>
<i>1.5.1.1.</i>	<i>Proposta 1: Análise da vulnerabilidade pelas diferenças topológicas da rede .....</i>	<i>17</i>
<i>1.5.1.2.</i>	<i>Proposta 2: O impacto das diferenças na configuração topológica da rede nos padrões de viagem do transporte urbano de cargas.....</i>	<i>18</i>
<i>1.5.1.3.</i>	<i>Proposta 3: A relação entre a vulnerabilidade e a acessibilidade para o transporte urbano de cargas e o impacto na emissão de poluentes.....</i>	<i>18</i>
<b>2.</b>	<b>ANÁLISE DA VULNERABILIDADE DA REDE DE TRANSPORTES SOB DIFERENTES CONFIGURAÇÕES TOPOLÓGICAS DA REDE VIÁRIA URBANA.</b>	<b>20</b>
<b>2.1.</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>20</b>
<b>2.3.</b>	<b>Análise Bibliométrica.....</b>	<b>23</b>
<b>2.4.</b>	<b>Resultados .....</b>	<b>23</b>
<b>2.5.</b>	<b>Relação entre Palavras-Chave Principais e Conjuntos de Palavras-Chave.....</b>	<b>28</b>
<b>2.6.</b>	<b>Convergência temática e implicações .....</b>	<b>32</b>
<b>2.7.</b>	<b>Modelagem e simulação de cenários hipotéticos .....</b>	<b>33</b>
<b>2.8.</b>	<b>Análise dos Resultados .....</b>	<b>36</b>
<b>2.9.</b>	<b>Considerações finais .....</b>	<b>42</b>
<b>3.</b>	<b>ANÁLISE DA ACESSIBILIDADE DO TRANSPORTE URBANO DE CARGAS A PARTIR DA INFLUÊNCIA DA CONFIGURAÇÃO TOPOLÓGICA NA VULNERABILIDADE DA REDE.....</b>	<b>44</b>
<b>3.1.</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>44</b>
<b>3.2.</b>	<b>A acessibilidade para o transporte urbano de cargas sob a ótica da vulnerabilidade da rede .....</b>	<b>45</b>
<i>3.2.1.</i>	<i>Acessibilidade para o Transporte Urbano de Cargas e Uso do Solo .....</i>	<i>46</i>
<i>3.2.2.</i>	<i>Acessibilidade para o Transporte Urbano de Cargas e as Localizações Logísticas.....</i>	<i>46</i>
<i>3.2.3.</i>	<i>Acessibilidade para o Transporte Urbano de Cargas e a Forma Urbana .....</i>	<i>48</i>
<i>3.2.4.</i>	<i>Acessibilidade para o Transporte Urbano de Cargas e Análise da Vulnerabilidade .....</i>	<i>51</i>

<b>3.3.</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>51</b>
3.3.1.	<i>Revisão Bibliográfica .....</i>	52
3.3.2.	<i>Delineamento Experimental .....</i>	52
3.3.2.1.	<i>Definição, modelagem e validação da rede viária objeto de estudo .....</i>	52
3.3.2.2.	<i>Levantamento, estruturação e validação dos dados sobre a rede viária objeto de estudo .....</i>	54
3.3.2.3.	<i>Definição, coleta e análise de resultados dos cenários simulados .....</i>	57
3.3.3.	<i>Análise dos resultados .....</i>	60
<b>3.4.</b>	<b>Considerações finais.....</b>	<b>71</b>
<b>4.</b>	<b>ANÁLISE DA INFLUÊNCIA VULNERABILIDADE DA REDE URBANA NA ACESSIBILIDADE DO TRANSPORTE URBANO DE CARGAS SOB A ÓTICA DA EMISSÃO DE CO<sub>2</sub>.....</b>	<b>73</b>
<b>4.1.</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>73</b>
<b>4.2.</b>	<b>O Transporte de Cargas e Emissões de CO<sub>2</sub> .....</b>	<b>75</b>
<b>4.3.</b>	<b>Proposta Metodológica.....</b>	<b>77</b>
4.3.1.	<i>Revisão Bibliográfica.....</i>	78
4.3.2.	<i>Delineamento Experimental .....</i>	78
4.3.3.	<i>Análise dos Resultados .....</i>	78
<b>4.4</b>	<b>Análise dos Resultados.....</b>	<b>82</b>
4.4.1.	<i>Análise Qualitativa.....</i>	82
4.4.2.	<i>Análise Quantitativa .....</i>	86
<b>4.5.</b>	<b>Conclusão.....</b>	<b>89</b>
<b>5.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>91</b>
<b>5.1.</b>	<b>Quanto ao Primeiro Objetivo Específico.....</b>	<b>91</b>
<b>5.2.</b>	<b>Quanto ao Segundo Objetivo Específico .....</b>	<b>93</b>
<b>5.3.</b>	<b>Quanto ao Terceiro Objetivo Específico.....</b>	<b>94</b>
<b>5.4.</b>	<b>Sugestões de Trabalhos Futuros .....</b>	<b>96</b>
	<b>APÊNDICE A – MAPAS TEMÁTICOS PRODUZIDOS NO SOFTWARE AIMSUN® SOBRE AS CARACTERÍSTICAS DA CIDADE DE FORTALEZA, CEARÁ.....</b>	<b>114</b>
	<b>APÊNDICE B - TABELA 3.6- LEVANTAMENTO DOS LINKS COM FLUXOS ACIMA DE 900 VPH ENTRE ROTAS DOS PARES OD. ....</b>	<b>116</b>
	<b>APÊNDICE C – FIGURAS REFERENTES AO RESULTADO VISUAL DAS SIMULAÇÕES DOS CENÁRIOS DEFINIDOS .....</b>	<b>120</b>

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Contextualização

A robustez e a resiliência são fundamentais para manter o desempenho de uma rede viária urbana, assegurando o fluxo contínuo de passageiros, bens e serviços, o que contribui significativamente para a economia. No entanto, eventos diversos podem desestabilizar essa rede, expondo sua fragilidade e gerando custos operacionais e ambientais (Almotahari et al., 2020). Elementos específicos da rede, como vias e interseções, possuem diferentes sensibilidades a esses eventos devido à interdependência de vários fatores que, quando funcionam em conjunto, promovem a confiabilidade e a resiliência da rede (Gonzalez-Feliu, 2018).

Avaliar a confiabilidade de uma rede de transportes implica em analisar como a vulnerabilidade de um elemento viário impacta os demais componentes. Por exemplo, a vulnerabilidade de uma via a eventos como alagamentos ou acidentes e a qualidade das conexões existentes que podem facilitar rotas alternativas evidenciam a importância de entender a relação entre os elementos da rede para antecipar os efeitos desses eventos (Twumasi-Boakye et al., 2018). No contexto do transporte urbano de cargas, as restrições de circulação de veículos pesados tendem a tornar a rede menos flexível, diminuindo sua acessibilidade e, conseqüentemente, a confiabilidade das operações.

A falta de infraestrutura exclusiva e planejamento dedicado para o transporte de cargas em áreas urbanas, somada ao foco das políticas públicas na mobilidade de pessoas, complicou ainda mais a manutenção da eficiência nas operações de entrega. A baixa confiabilidade e disponibilidade dos elementos viários, associadas às dinâmicas urbanas, aumentam a complexidade no processo de escolha de rotas. Assim, o planejamento de rotas deve considerar que eventos adversos podem afetar diretamente a acessibilidade, impactando os custos operacionais devido a congestionamentos e reduzindo o acesso à infraestrutura viária (Fu et al., 2018).

Além disso, o acesso à infraestrutura adequada é crucial para garantir que áreas comerciais e industriais estejam bem conectadas por diferentes modos de transporte, o que pode influenciar a escolha do modo mais apropriado para diferentes tipos de carga e distâncias. As restrições de circulação em áreas urbanas também desempenham um papel importante, exigindo que as operações de transporte se adaptem para evitar atrasos e penalidades, e desenvolvam estratégias como otimização de rotas e uso de veículos mais eficientes.

A crescente preocupação com a sustentabilidade ambiental tem levado a pesquisas que integram a atividade de transporte de cargas em um contexto mais sustentável, avaliando operações com base em indicadores de emissão de poluentes, conceito conhecido como "roteirização verde" (Casali et al., 2019). Com isso, a análise da vulnerabilidade e acessibilidade em redes viárias se torna crucial para planejar rotas mais sustentáveis, que minimizem o impacto ambiental e maximizem a eficiência operacional, alinhando decisões urbanas com objetivos de preservação ambiental e eficiência econômica.

Como reforço a referida temática, esta pesquisa também busca se alinhar ao que se propõe na Agenda 2030, promovida pela ONU, definido como um plano global voltado ao desenvolvimento sustentável, englobando 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Esses objetivos são interconectados e abrangem áreas como erradicação da pobreza, educação de qualidade, igualdade de gênero, e, crucialmente, a construção de infraestrutura resiliente e a promoção de uma industrialização inclusiva e sustentável. Nesse contexto, os estudos e pesquisas voltados ao transporte de cargas desempenham um papel fundamental.

O transporte eficiente e sustentável de mercadorias é essencial para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (ODS 13), melhorar a eficiência dos recursos (ODS 12), e apoiar a construção de cidades e comunidades sustentáveis (ODS 11). Além disso, a otimização das cadeias logísticas contribui para a inovação e modernização da infraestrutura, o que é vital para o desenvolvimento econômico e a criação de empregos dignos (ODS 8 e 9). Assim, ao alinhar as pesquisas em logística e transporte com os ODS, é possível promover um desenvolvimento que seja sustentável e que beneficie tanto as gerações atuais quanto as futuras.

## 1.2. Problemática

A mobilidade urbana é um desafio central nas grandes cidades, principalmente devido aos congestionamentos que impactam negativamente a economia, o meio ambiente e a saúde pública (SOUSA *et al.*, 2019). A rápida transformação dos aspectos relacionados à mobilidade e a urbanização desordenada agravam os conflitos entre a oferta e a demanda de transporte, especialmente em termos de infraestrutura e operações (SOUSA *et al.*, 2020). No Brasil, 82% da carga transportada em áreas urbanas utiliza caminhões, que são grandes emissores de gases nocivos como CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e HC (CHOUDHARY *et al.*, 2016; THAKER *et al.*, 2016; MASCIA *et al.*, 2017). Em 2018, o setor de transportes do país foi o sétimo maior emissor de CO<sub>2</sub> globalmente, representando 4% das emissões globais e 32% das emissões na América Latina (WRI, 2022).

Vários estudos associam o transporte à degradação da qualidade do ar, especialmente em áreas urbanas congestionadas, onde condições meteorológicas desfavoráveis dificultam a dispersão das emissões (SAIDI *et al.*, 2017; ASONGU, 2018; CENTOBELI *et al.*, 2020; CHATI, 2020; BÍNOVA *et al.*, 2021). A acessibilidade também é um fator crítico na discussão sobre o impacto dos sistemas de transporte nos problemas ambientais (BATTERMAN *et al.*, 2015; GHERMANDI, 2017; KAN *et al.*, 2018; JIANG *et al.*, 2020).

Pesquisas indicam que características espaciais específicas, como o uso econômico do solo, elevam os custos operacionais e ambientais, aumentando as emissões de poluentes, mesmo em áreas com controle de acesso e policiamento rigoroso (Añón *et al.*, 2017; Ozcan *et al.*, 2018; Centobelli *et al.*, 2020<sup>a</sup>; Sahoo *et al.*, 2021; AHMED *et al.*, 2021). Além disso, a forma urbana e a estrutura viária podem dificultar a dispersão dos

poluentes e agravar os congestionamentos (LI *et al.*, 2017; MOLERO *et al.*, 2019; AVOM *et al.*, 2020; INGOLE *et al.*, 2020; BÍNOVÁ *et al.*, 2021).

A vulnerabilidade da rede viária interfere diretamente na eficiência do transporte de cargas e na qualidade do ar. Eventos como inundações, acidentes e congestionamentos geram impactos econômicos, ambientais e sociais, afetando a acessibilidade (MARTINS *et al.*, 2017; INGOLE *et al.*, 2019). A análise dessa vulnerabilidade é essencial para compreender os efeitos desses eventos na rede de transportes, auxiliando na tomada de decisões por autoridades e operadores (RUSSO *et al.*, 2020; FRASELLE *et al.*, 2021; RUSSO *et al.*, 2021).

### 1.3. Questões de Pesquisa

A partir dessa perspectiva, esta pesquisa parte do pressuposto de que não somente as restrições temporais comumente praticadas pela atividade de transporte de cargas em áreas urbanas, mas também espaciais como, por exemplo, políticas públicas de restrição à circulação de veículos pesados que reduzem sua acessibilidade, atribuem certo grau de dificuldade à tomada de decisão dos operadores podendo ser agravada se associada a uma vulnerabilidade inerente à rede em relação a ocorrência de eventos que são capazes de causar desequilíbrio, provocando limitações de acesso e conflitando à possibilidade de uma operação “mais verde”, problematizando ainda mais a questão ambiental quanto a prática da atividade em meios urbanos.

Desta forma, a partir da fundamentação apresentada no contexto abordado anteriormente, e que motiva à questão de pesquisa central deste trabalho, como a análise da vulnerabilidade da rede viária urbana influencia a acessibilidade e a sustentabilidade do transporte urbano de cargas, considerando diferentes características topológicas da rede, interações entre infraestrutura, localização logística e uso do solo, e impacto nas emissões de CO<sub>2</sub> em cenários de interrupção de rotas? Em adição, algumas questões complementares de pesquisa foram formuladas a fim de que se alcançasse um maior entendimento sobre os fenômenos até então discutidos:

- a) Como as diferentes características topológicas da rede viária urbana influenciam a vulnerabilidade da rede de transportes e, conseqüentemente, a escolha de caminhos e o comportamento das viagens?
- b) Como a análise da vulnerabilidade da rede viária urbana pode influenciar a acessibilidade do transporte de cargas, considerando as interações entre os diferentes tipos de infraestrutura, localização logística e uso do solo, visando otimizar a eficiência e sustentabilidade das operações logísticas urbanas?

- c) Como a vulnerabilidade da rede viária urbana impacta a acessibilidade do transporte urbano de cargas em termos de emissões de CO<sub>2</sub>, considerando diferentes configurações de rede e cenários de interrupção de rotas?

#### **1.4. Objetivos da Pesquisa**

Este trabalho adota a hipótese de que a análise da vulnerabilidade da rede viária, considerando indicadores ambientais, é essencial para antecipar os impactos dos distúrbios nos elementos da rede. Ao compreender a relação entre vulnerabilidade e acessibilidade, é possível desenvolver um planejamento urbano que concilie eficiência operacional e sustentabilidade, minimizando os custos sociais e ambientais associados ao transporte urbano de cargas. Face às questões de pesquisa e a problemática desenvolvidas e discutidas com base no contexto apresentado até o momento, o presente trabalho tem como principal objetivo desenvolver uma análise da vulnerabilidade da rede viária urbana e sua influência na acessibilidade do transporte urbano de cargas, com base na emissão CO<sub>2</sub>. Em razão dessa proposta, pretende-se trabalhar com os seguintes objetivos complementares:

- a) Analisar os impactos que as diferentes características topológicas da rede viária urbana, quando somados a análise da vulnerabilidade, podem provocar à escolha de caminhos;
- b) Analisar como as diferentes configurações topológicas da rede urbana podem afetar a vulnerabilidade da rede e influenciar na acessibilidade do transporte urbano de cargas;
- c) Avaliar o impacto da vulnerabilidade da rede viária na acessibilidade em termos de emissão de CO<sub>2</sub> do transporte urbano de cargas.

#### **1.5. Estrutura Metodológica**

A vulnerabilidade das redes viárias urbanas é crucial para entender a acessibilidade e a eficiência do transporte de cargas, pois infraestruturas suscetíveis a desastres, acidentes ou congestionamentos podem comprometer significativamente essas operações. A geometria da rede, ou seja, a forma como as vias estão interligadas, é determinante para a resiliência e eficiência do sistema viário, impactando diretamente a acessibilidade entre diferentes regiões urbanas. Além disso, a emissão de poluentes, agravada pelo tráfego intenso, é uma preocupação crescente, especialmente em áreas urbanas com políticas restritivas, pois afeta a saúde pública e o meio ambiente.

Estudos iniciais, como os de Berdica (2002) e Taylor e D'Este (2005), destacaram a importância da acessibilidade ao analisar a vulnerabilidade das redes de transporte. Pesquisas subsequentes, como as de Jenelius (2009) e Snelder *et al.* (2012), aprofundaram-se nas disparidades geográficas e na robustez das redes

frente a variações temporárias. Esfeh *et al.* (2022) introduziram novas perspectivas sobre a resiliência viária, analisando a vulnerabilidade a eventos disruptivos e seus impactos espaciais e temporais.

Contribuições adicionais de autores como Du *et al.* (2014), Gu *et al.* (2020) e Reggiani *et al.* (2015) abordaram a resiliência em múltiplas redes logísticas e a importância da conectividade viária. Métodos para identificar segmentos críticos da rede, essenciais para compreender a vulnerabilidade e seus impactos econômicos e sociais, foram explorados por Jenelius *et al.* (2006) e Sullivan *et al.* (2010). Outros estudos, como os de Almotahari e Yazici (2020) e Holme *et al.* (2002), focaram na classificação da criticidade dos links e na fragilidade das redes a ataques direcionados. Assim, esses autores forneceram bases metodológicas essenciais para a compreensão da vulnerabilidade e acessibilidade nas redes urbanas de transporte.

Cada um desses estudos contribuiu para moldar as três propostas metodológicas descritas nesse documento, e que estruturam toda a sequência de ações com a finalidade de responder à principal questão pesquisa estabelecida: "Como a análise da vulnerabilidade da rede viária urbana influencia a acessibilidade e a sustentabilidade do transporte urbano de cargas, considerando diferentes características topológicas da rede, interações entre infraestrutura, localização logística, uso do solo e impacto nas emissões de CO<sub>2</sub> em cenários de interrupção de rotas?"

#### 1.5.1. Etapas da Metodologia Proposta:

##### 1.5.1.1. Proposta 1: Análise da vulnerabilidade pelas diferenças topológicas da rede

A proposta metodológica baseia-se no modelo de Pelorosso (2019), adaptado para investigar a vulnerabilidade da rede viária urbana. O processo incluiu a seleção e revisão de documentos, utilizando uma Tabela de Critérios Comparativos (TCC) para análise dos estudos. Os critérios adotados focaram em aspectos como planejamento baseado em desempenho, modelagem, características e escala dos modelos.

A coleta de dados foi realizada com modelos estatísticos, facilitando a modelagem e a análise da acessibilidade em cenários urbanos simulados. O software AIMSUN foi utilizado para estruturar e modelar redes, simulando dois cenários para avaliar o impacto da vulnerabilidade nas decisões de viagem. Um link crítico foi removido para observar o comportamento do fluxo veicular ao longo de oito horas, comparando a sensibilidade da dispersão do fluxo em diferentes redes.

A pesquisa buscou responder como as características topológicas influenciam a vulnerabilidade da rede de transportes, afetando a escolha de caminhos e o comportamento de viagem, com foco na acessibilidade e na robustez da rede. Essa metodologia é classificada como aplicada, quantitativa, descritiva e explicativa, e envolveu simulação computacional e pesquisa bibliográfica para aprofundar o entendimento

sobre a vulnerabilidade e a resiliência das redes viárias. O estudo combina pesquisa experimental e estudo de caso para explorar a eficácia das geometria viárias na mitigação de interrupções e na escolha de rotas.

*1.5.1.2. Proposta 2: O impacto das diferenças na configuração topológica da rede nos padrões de viagem do transporte urbano de cargas*

A segunda proposta metodológica, baseada em Esfeh *et al.* (2020) e De Bakshi *et al.* (2019), analisa a vulnerabilidade das redes viárias e os padrões de viagem para identificar pontos críticos no transporte urbano de cargas. De Bakshi *et al.* (2019) examina a influência da forma urbana, considerando índices como densidade populacional e de emprego, e mix de uso da terra na geração e duração de viagens, divididas em cinco categorias de transporte de carga. A análise inclui fatores espaciais, socioeconômicos e demográficos para compreender como influenciam a frequência e duração das viagens.

Esfeh *et al.* (2020) introduz uma abordagem para avaliar a vulnerabilidade das redes viárias, focando na probabilidade e nas consequências de eventos disruptivos e identificando ligações críticas na rede. O estudo explora métodos topológicos e sistêmicos para avaliar o impacto socioeconômico da interrupção de links críticos, utilizando abordagens de varreduras completas ou pré-selecionadas da rede. A pesquisa focou em "Acessibilidade e Transporte Urbano de Cargas", dividida em três etapas principais: definição, modelagem e validação da rede viária; levantamento e estruturação dos dados; e simulação de cenários. Foram analisadas características da rede viária de Fortaleza, Ceará, incluindo o desenho regular e irregular da rede, zonas com restrições à circulação de veículos de carga, características demográficas tendo como base o censo do IBGE datado de 2010, sociais e econômicas, e infraestrutura viária. A simulação considerou parâmetros como tempo de viagem, atraso e velocidade média para avaliar a acessibilidade da rede viária em cenários normais e de vulnerabilidade.

Essa análise permitiu responder à questão de como a vulnerabilidade da rede viária urbana influencia a acessibilidade do transporte de cargas, considerando a interação entre diferentes tipos de infraestrutura, localização logística e uso do solo. A pesquisa foi classificada como aplicada, quantitativa, exploratória, descritiva, explicativa e experimental, utilizando simulações para propor melhorias na infraestrutura viária e estratégias de logística urbana, visando aumentar a eficiência e sustentabilidade das operações.

*1.5.1.3. Proposta 3: A relação entre a vulnerabilidade e a acessibilidade para o transporte urbano de cargas e o impacto na emissão de poluentes*

A terceira proposta metodológica abordada combina diferentes estratégias para analisar as emissões de poluentes no transporte urbano de cargas, com foco na vulnerabilidade da rede viária. A metodologia se inspira em Muñuzuri *et al.* (2018), que caracteriza as regiões de entrega de mercadorias urbanas para estimar padrões gerais de rotas e derivar indicadores de emissão. Aplicada à cidade de Sevilha, a abordagem inclui etapas como identificação de parâmetros veiculares, caracterização das regiões, correlação de emissões e estimativa das emissões por região. Essa metodologia oferece uma ferramenta de decisão para avaliar o impacto das práticas de entrega nas emissões da cidade.

Complementando essa abordagem, Gauthier *et al.* (2018) propõe a análise de métricas topológicas, como a *betweenness centrality*, e simulações de teste de estresse para avaliar a resiliência de links críticos na rede viária. A metodologia testa cenários de interrupção para medir o impacto dessas falhas na eficiência da rede e nas emissões de CO<sub>2</sub>, propondo um índice de robustez do tráfego para avaliar a perda de desempenho.

No artigo em questão, a metodologia se desdobra em três etapas: revisão bibliográfica, delineamento experimental e análise dos resultados. Na revisão, foram considerados artigos dos últimos dez anos focados na relação entre transporte de cargas e poluição do ar, especialmente envolvendo veículos pesados. O delineamento experimental replica a rede viária, incluindo simulações de cenários com interrupções de links e restrições para caminhões. A análise dos resultados envolveu a aplicação do indicador TTEWBC, adaptado de Gauthier *et al.*, que avalia a eficiência e impacto ambiental das redes viárias considerando tempo de viagem e emissões.

A proposta metodológica visa responder como a vulnerabilidade da rede viária urbana impacta a acessibilidade do transporte de cargas e as emissões de CO<sub>2</sub>, explorando diferentes configurações e cenários de interrupção. A análise também considera os impactos ambientais associados ao aumento de distâncias percorridas e ao tempo de viagem em rotas alternativas. Essa metodologia é exploratória, explicativa e experimental, focada na avaliação da vulnerabilidade da rede e na gestão ambiental e operacional do transporte urbano de cargas, com base em um estudo de caso na cidade de Fortaleza, Ceará.

## **2. ANÁLISE DA VULNERABILIDADE DA REDE DE TRANSPORTES SOB DIFERENTES CONFIGURAÇÕES TOPOLÓGICAS DA REDE VIÁRIA URBANA**

### **RESUMO**

Este texto aborda a vulnerabilidade da rede viária e a importância de considerar diversos fatores ao avaliar seus impactos. Os índices atuais de vulnerabilidade não são abrangentes o suficiente para capturar todos os efeitos e características da rede. O estudo propõe uma metodologia que revisa a literatura sobre a análise da vulnerabilidade na rede de transportes, utilizando três bases de dados e palavras-chave para restringir a busca. Os dados foram filtrados e analisados usando o software VOSviewer®. Os resultados obtidos revelam que a configuração da rede tem influência nas decisões de viagem e que diferentes níveis de interferência afetam a capacidade das vias. Redes irregulares apresentam maior vulnerabilidade devido à distribuição desordenada do fluxo após uma interrupção, resultando em menor resiliência, robustez e flexibilidade. A percepção de rotas alternativas é afetada principalmente pela geometria da rede irregular, não apenas pela quantidade de conexões disponíveis. Em contrapartida, redes regulares conseguem manter o equilíbrio temporariamente após uma interrupção, mas novas rotas podem se tornar críticas e vulneráveis, tornando a rede frágil. Essas informações são relevantes para o processo de planejamento, modelagem e estruturação da rede viária, visando compreender melhor o impacto da vulnerabilidade na escolha de caminhos e no comportamento das viagens.

### **2.1. Introdução**

Nos últimos anos, a análise da vulnerabilidade das redes rodoviárias tornou-se central na pesquisa acadêmica e aplicada, evidenciando a necessidade urgente de entender como essas infraestruturas reagem a diversas dinâmicas do sistema de transportes. A vulnerabilidade das redes rodoviárias é crucial para a garantia da mobilidade e a manutenção da economia de um país, pois envolve a capacidade dessas infraestruturas de resistir e se recuperar de interrupções. Ao focar especificamente nas rodovias, diferentemente de outras redes de transporte, como ferroviárias, aéreas e marítimas, é possível abordar de forma mais precisa os desafios únicos desse sistema.

Compreender a resposta das redes rodoviárias a diferentes pressões e eventos, tanto reais quanto hipotéticos, é essencial para formular estratégias eficazes de mitigação e adaptação. A complexidade dessa análise reside na diversidade de métodos e ferramentas disponíveis, cada um abordando aspectos específicos da vulnerabilidade. Embora essa variedade metodológica enriqueça a compreensão do fenômeno, ela também apresenta desafios, como a complexidade na escolha e aplicação das abordagens mais adequadas.

Desde o final dos anos 1990, os estudos sobre vulnerabilidade em redes de transporte têm avançado significativamente, desenvolvendo métodos para quantificar e qualificar essas vulnerabilidades. Entretanto, falta uma sistematização atualizada que integre os avanços recentes e sirva como base sólida para novas pesquisas. Esse cenário justifica a realização de uma revisão sistemática da literatura, com o objetivo de identificar lacunas, sintetizar descobertas e orientar futuros estudos.

A pesquisa sobre vulnerabilidade em redes rodoviárias, especialmente desde os anos 2000, tem incorporado conceitos como confiabilidade, resiliência, robustez e flexibilidade. A revisão sistemática proposta busca capturar essa complexidade, oferecendo uma visão abrangente que possa fundamentar estudos subsequentes. Essa diversificação metodológica permite análises mais específicas e direcionadas, mas exige um conhecimento aprofundado das metodologias existentes. Ao organizar e sintetizar o conhecimento, a revisão sistemática facilita o desenvolvimento de novas pesquisas, evitando redundâncias e acelerando o progresso científico.

O presente trabalho propõe uma metodologia para realizar uma revisão sistemática da literatura, com o objetivo principal de analisar e compreender a vulnerabilidade das redes rodoviárias. A metodologia inclui: (i) identificação de bases de dados relevantes; (ii) definição de parâmetros de busca; (iii) levantamento bibliográfico; (iv) filtragem e remoção de duplicatas; e (v) visualização, interpretação e discussão dos dados obtidos. Essa abordagem fornecerá suporte valioso para pesquisadores, profissionais e formuladores de políticas públicas, orientando decisões mais informadas e eficazes.

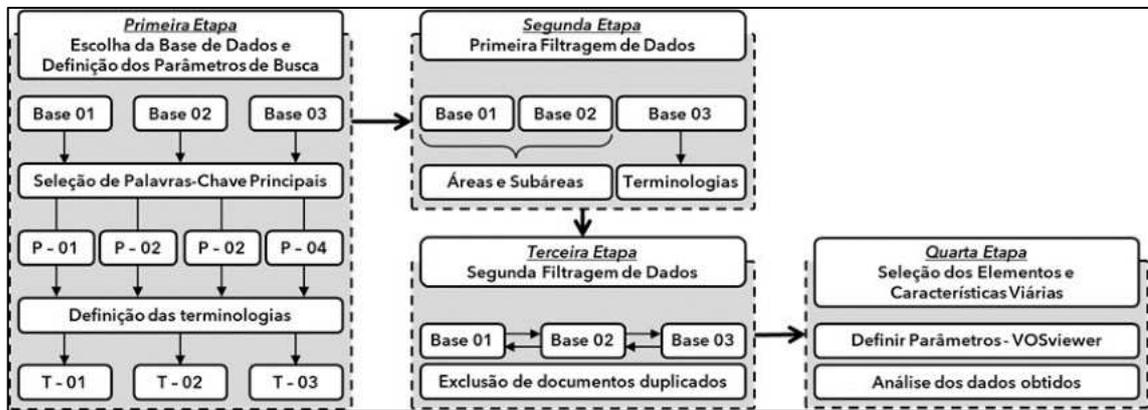
## **2.2. Metodologia da revisão sistemática da literatura**

A revisão sistemática da literatura proposta nesta pesquisa aborda a crescente complexidade da vulnerabilidade das redes rodoviárias, exacerbada pelo crescimento desordenado das cidades, o dinamismo do tráfego e a demanda por uma infraestrutura mais robusta. Conforme sugerido por Wee & Banister (2016), essa abordagem rigorosa permite identificar como esses fatores tomam urgente a necessidade de consolidar e atualizar o conhecimento sobre a resiliência e capacidade de adaptação das redes rodoviárias, essenciais para a mobilidade e segurança urbana.

A metodologia apresentada, ilustrada na figura 01, foi dividida em quatro etapas, cada uma destinada a aprofundar a discussão sobre a vulnerabilidade nas redes de transporte, oferecendo uma perspectiva direcionada e atualizada. Na primeira etapa, foram selecionadas as bases de dados SpringerLink, TRID e SCOPUS, cada uma contribuindo de forma distinta para a pesquisa. SpringerLink oferece uma base sólida de literatura acadêmica, especialmente em engenharia e transporte; TRID complementa com dados específicos do setor de transportes; e SCOPUS, com sua abrangência multidisciplinar, garante uma análise robusta. Essas

bases foram escolhidas pela facilidade de integração com o software VOSviewer, que será utilizado para analisar e visualizar os dados exportados, facilitando a interpretação dos resultados.

Figura 2.1 - Proposta metodológica da revisão sistemática da literatura.



Fonte: Autor (2023).

À princípio, foram definidos os parâmetros de busca e como o foco da pesquisa parte do estudo da vulnerabilidade na rede de transportes, inicialmente foram definidas quatro palavras-chave principais diante da sua relação com a temática em questão, como apontado por alguns autores conforme descrito na tabela 2.1. Além disso, foram definidas mais três terminologias, sendo elas: (T – 01) Rede Viária; (T – 02) Rede de Transportes; e (T – 03) Transporte Rodoviário, que quando combinados com cada uma das palavras-chave principais restringem as buscas, finalizando a primeira etapa.

Tabela 2.1 - Seleção das palavras-chave principais.

Palavras-Chave	Conceitualização	Autores
1. Vulnerabilidade da Rede Viária (P–01)	É considerada como um problema de acessibilidade reduzida em função do sistema e não na rede física em si, geralmente associada à ou mais eventos específicos.	(Berdica, 2002; Taylor <i>et al.</i> , 2006; Jenelius <i>et al.</i> , 2006; Knoop <i>et al.</i> , 2010; Snelder <i>et al.</i> , 2012).
2. Resiliência da Rede Viária (P–02)	É a capacidade do sistema de transporte se recuperar, de preferência em um curto período de tempo, de uma sobrecarga temporária.	(Zhou <i>et al.</i> , 2019; Wan <i>et al.</i> , 2018; Mattsson <i>et al.</i> , 2015; Testa <i>et al.</i> , 2015)
3. Robustez da Rede Viária (P–03)	É definido como a capacidade de funcionamento de acordo com suas especificações de projeto no caso de interrupções graves, aprimorada através de medidas corretivas ou capacidade sobressalente para minimizar a interdependência dos elementos do sistema viário.	(Wang <i>et al.</i> , 2017; Su <i>et al.</i> , 2014; Lordan <i>et al.</i> , 2014; Yang <i>et al.</i> , 2015; Cats <i>et al.</i> , 2017).
4. Confiabilidade da Rede Viária (P–04)	Pode ser considerada como uma qualidade orientada ao usuário do sistema de transporte, considerado confiável se os tempos de viagem esperados e o real estiverem de acordo. Oferecer confiabilidade requer um sistema robusto.	(Husdal, 2004; Gu <i>et al.</i> , 2019; Guidotti <i>et al.</i> , 2017; Oliveira <i>et al.</i> , 2016; Ouyang <i>et al.</i> , 2014).

Fonte: Autor (2023).

As quatro palavras-chave principais foram definidas após análise dos principais autores que estudam vulnerabilidade, com base em obras sobre "vulnerabilidade em redes rodoviárias". Utilizando filtros de relevância e número de downloads nas bases de dados, observou-se que essas palavras-chave estão inter-relacionadas e frequentemente tratadas como sinônimos. Guidotti *et al.* (2017), por exemplo, exploram a confiabilidade versus variabilidade no desempenho do sistema de transporte, destacando que a vulnerabilidade na infraestrutura causa congestionamentos, sugerindo uma relação inversa entre confiabilidade e vulnerabilidade. Autores listados na tabela 2.1 associam essas palavras-chave a termos complementares para direcionar seus estudos ao objeto em análise.

De acordo com esse entendimento, as terminologias comumente encontradas nessas obras e que acompanham geralmente as palavras-chave citadas anteriormente, se referem à: "Road AND Network"; "Transportation AND Network"; "Road AND Transportation". Com isso, o resultado dessa combinação entre as palavras-chave e as terminologias foi dividido em quatro conjuntos de busca e utilizados na realização das buscas nas bases de dados, sendo esses conjuntos: (1º) "Vulnerability AND Road AND Network", "Vulnerability AND Transportation AND Network", "Vulnerability AND Road AND Transportation"; (2º) "Resilience AND Road AND Network", "Resilience AND Transportation AND Network", "Resilience AND Road AND Transportation"; (3º) "Robustness AND Road AND Network", "Robustness AND Transportation AND Network", "Robustness AND Road AND Transportation"; e (4º) "Reliability AND Road AND Network", "Reliability AND Transportation AND Network", "Reliability AND Road AND Transportation".

### **2.3. Análise Bibliométrica**

Aplicando os quatro conjuntos de busca nas bases de dados, inicialmente se obteve um extenso resultado quantitativo. Em seguida, foi realizada uma filtragem usando termos-chave específicos ou áreas de interesse, conforme necessário, para selecionar documentos sobre "transporte rodoviário" nas bases SCOPUS, SpringerLink e TRID.

Tabela 2.2 - Termos selecionados às palavras-chave principais na base de dados SCOPUS.

Termos Selecionados	Vulnerabilidade (P-01)			Resiliência (P-02)			Robustez (P-03)			Confiabilidade (P-04)		
	Road Network (C.T-01)	Transportation Network (C.T-02)	Road Transportation (C.T-03)	Road Network (C.T-01)	Transportation Network (C.T-02)	Road Transportation (C.T-03)	Road Network (C.T-01)	Transportation Network (C.T-02)	Road Transportation (C.T-03)	Road Network (C.T-01)	Transportation Network (C.T-02)	Road Transportation (C.T-03)
Urban											✓	✓
Urban; Suburban Areas										✓	✓	✓
Urban Area	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Urban Centers										✓		
Urban Freight Distribution										✓	✓	✓
Urban Intersections		✓										✓
Urban Mobility	✓											
Urban Network	✓			✓							✓	✓
Urban Public Transport		✓			✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓
Urban Region	✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓
Urban Road	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Urban Streets	✓						✓	✓	✓	✓	✓	✓
Urban Traffic	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Urban Transit		✓						✓		✓	✓	✓
Urban Transport	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓
Urban Transportation	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓

Fonte: Autor (2023).

Tabela 2.3 - Áreas e Subáreas selecionadas às pesquisas nas bases de dados: SpringerLink e TRID.

Áreas	SpringerLink	TRID
Engenharia	✓	
Transportes (Geral)		✓
Subáreas		
Tecnologia de Transportes	✓	
Engenharia de Tráfego	✓	
Transporte de Cargas		✓
Transporte de Passageiros		✓
Transporte Público		✓
Operações e Gestão de Tráfego		✓
Planejamento; Previsão	✓	✓
Política	✓	✓

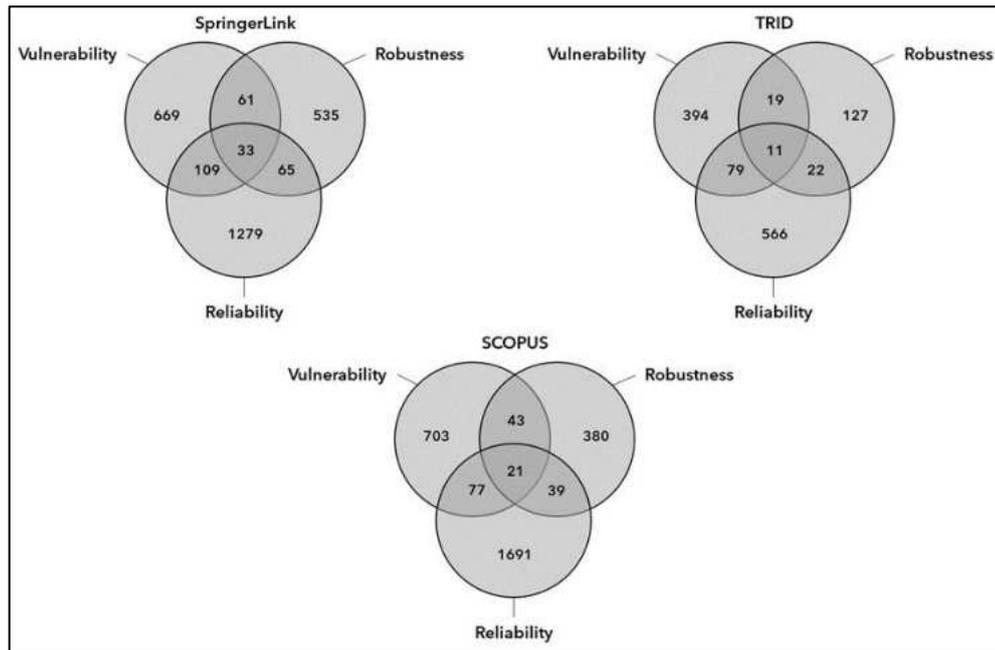
Fonte: Autor (2023).

A partir da combinação das palavras-chave principais com terminologias específicas nas três bases de dados selecionadas, foram identificados 12.288 documentos, incluindo artigos, livros, capítulos e resumos. Esse total se distribuiu entre 7.127 na SCOPUS, 3.072 na SpringerLink e 2.089 na TRID. A vasta quantidade de obras reflete a complexidade do tema da vulnerabilidade da rede viária, constituindo uma fonte valiosa para pesquisas em planejamento urbano, acessibilidade e transportes. A amplitude do levantamento demonstra a relevância da revisão sistemática realizada, fornecendo uma base sólida para orientar políticas públicas e estratégias de desenvolvimento sustentável.

Devido ao grande volume de documentos, foi necessária uma filtragem subsequente para eliminar duplicatas entre as diferentes bases de dados e combinações de termos, garantindo a qualidade dos resultados. Esta etapa foi realizada manualmente no Microsoft Excel®, onde os resultados das três bases foram consolidados em uma única planilha. A função "Remover Duplicadas" foi utilizada para eliminar aproximadamente 35% dos documentos repetidos, totalizando 7.952 títulos duplicados, com 4.612 na SCOPUS, 1.988 na SpringerLink e 1.352 na TRID.

Os títulos relacionados às palavras-chave "Robustness" e "Reliability" apresentaram as maiores médias de duplicados, com 36% e 35%, respectivamente, destacando a similaridade entre essas palavras-chave. Esse percentual elevado de duplicatas pode ser atribuído às concepções de confiabilidade e robustez de uma rede de transporte, conforme discutido na Tabela 01. A Figura 2.2 ilustra o número de obras duplicadas identificadas, relacionando cada palavra-chave nas bases de dados.

Figura 2.2 - Títulos duplicados entre as palavras-chave para cada base de dados.



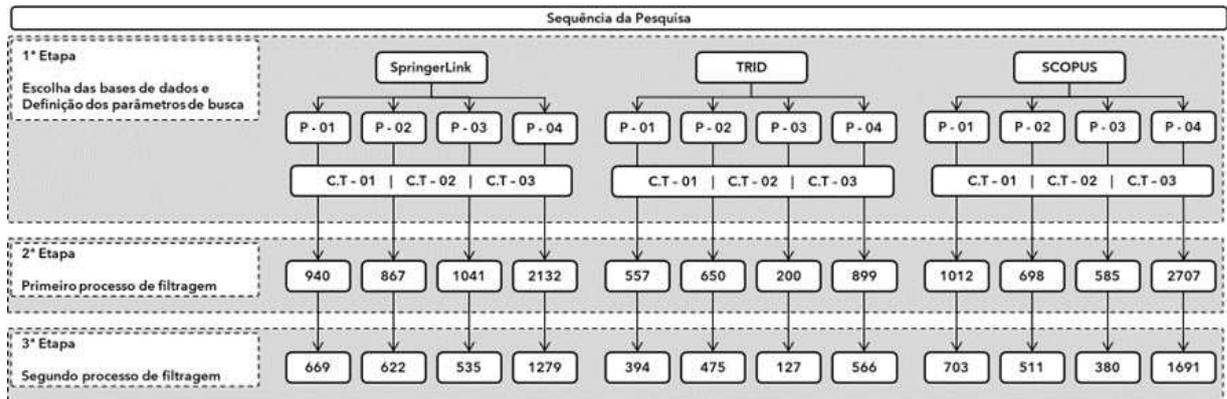
Fonte: Autor (2023).

Reiteradamente os autores têm desenvolvido e afirmado através dos estudos de análise da vulnerabilidade associado à confiabilidade, o sentido de que o nível da qualidade do serviço da infraestrutura viária, por exemplo, tangente ao tempo ou da distância de viagem, se dá tanto quanto pela amplitude da variabilidade entre o planejado (projetado) e o real (percebido pelos usuários), e que pode ser afetado pela ocorrência de eventos disruptivos na rede viária, sejam eles regular ou irregular (HUSDAL, 2004; TAYLOR *et al.*, 2006; JENELIUS *et al.*, 2006; CHEN *et al.*, 2007; SNELDER *et al.*, 2012; BALIJEPALLI e OPPONG, 2014).

## 2.4. Resultados

Desta forma, com a realização das etapas descritas anteriormente, foi possível alcançar uma densidade e riqueza significativa de dados referente a quantidade e qualidade de busca dos documentos especializados da literatura, conforme figura 2.3 a seguir. Essa coletânea expressiva é suficiente para que se possa realizar uma análise mais pontual utilizando o software VOSviewer®, que para esta pesquisa auxiliou na identificação dos elementos, características e aspectos viários com maiores recorrências de citação, sendo essa a quarta e última etapa dessa proposta metodológica.

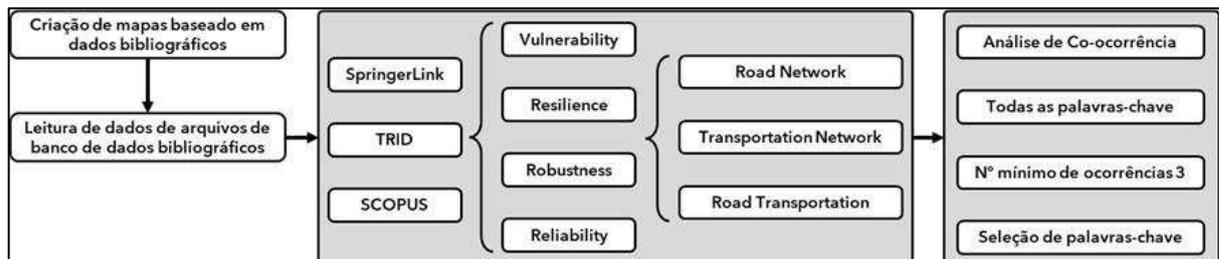
Figura 2.3 - Resultado da realização das etapas de acordo com a sequência de pesquisa.



Fonte: Autor (2023).

Na Figura 2.4 são apresentados os procedimentos e parâmetros estabelecidos para uso do software VOSviewer®. Os resultados foram exportados para uma planilha do Microsoft Excel® e, então, realizaram-se as análises extraindo apenas as informações de interesse para o objetivo central deste manuscrito.

Figura 2.4 - Sequência de parâmetros adotados no software VOSviewer®.



Fonte: Autor (2023).

Após o procedimento descrito, o software VOSviewer® gerou uma lista com mais de 3.500 palavras-chave, presentes em cada uma das obras e repetidas pelo menos três vezes. Essas palavras-chave foram inicialmente selecionadas com base em sua relação conceitual direta com o tema "transporte rodoviário urbano". Em seguida, elas foram exportadas para o Microsoft Excel® para uma última filtragem, onde foram reorganizadas em ordem alfabética e as duplicatas foram eliminadas com base nos seguintes critérios: (i) pequenas variações (ex.: Road Transport = Road Transportation) e (ii) singular e plural (ex.: Urban Road = Urban Roads). Por fim, as palavras-chave restantes foram classificadas de acordo com sua interpretação semântica, resultando em três classes: (i) Topologia: que diz respeito à organização espacial dos elementos viários e sua reprodução da forma urbana; (ii) Elementos Viários: que englobam os componentes e infraestruturas do sistema de transporte urbano; e (iii) Acessibilidade: que se refere ao modo como os elementos

viários são projetados, estruturados e conectados, configurando o espaço urbano para facilitar o acesso dos indivíduos aos seus destinos, mantendo a paridade nos custos.

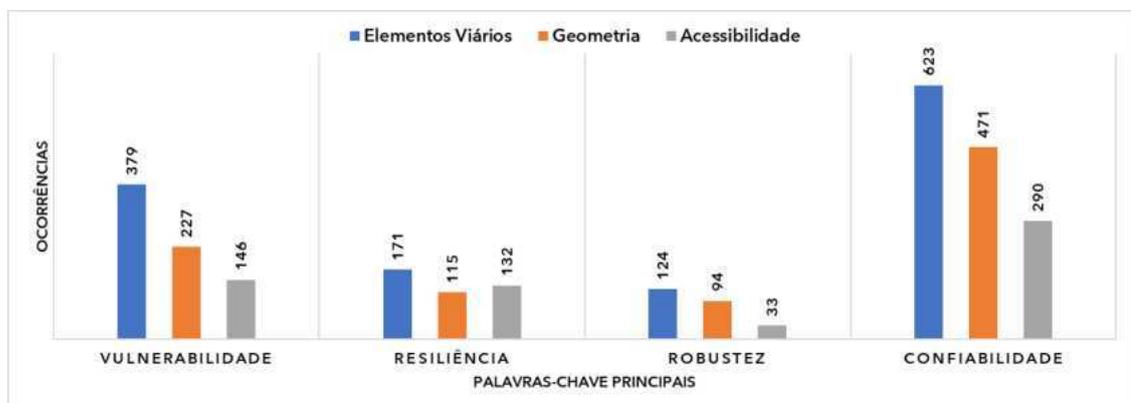
Tabela 2.4 - Conjuntos de palavras-chave organizadas pela sua semântica no VOSviewer®.

Topologia	Ruas e Vias	Acessibilidade	Conectividade
✓ Propriedades topológicas	✓ Ruas Urbanas	✓ Uso do solo	✓ Capacidade de Ligações
✓ Desenho complexo da rede	✓ Vias públicas	✓ Mobilidade Urbana	✓ Quantidade de conexões
✓ Geometria	✓ Estradas urbanas	✓ Nível de Serviço da Rede	✓ Qualidade de Conexões
✓ Morfologia	✓ Vias	✓ Capacidade viária	✓ Interconectividade
✓ Desenho da rede	✓ Facilidades viária	✓ Equidade da Rede	✓ Interseção
✓ Estrutura da Rede	✓ Infraestrutura (Rede)	✓ Equilíbrio (Rede)	✓ Nós
✓ Geometria da rede	✓ Ruas e Vias	✓ Acessibilidade	✓ Conectividade
✓ Aspecto Espacial da Rede			
✓ Análise espacial			
✓ Geometria da rede			

Fonte: Autor (2023).

No resultado apresentado anteriormente, cada conjunto de palavra-chave final foi formado de acordo com sua similaridade diante do que representam, se uma característica física e espacial da rede (topologia), ou uma infraestrutura viária da rede (elementos viários), ou em termos de equilíbrio ou aspectos relacionados aos custos da rede (acessibilidade). Tendo estes critérios sido definidos, a Figura 2.5 ilustra o quantitativo das ocorrências anteriores resultantes das três bases de dados a partir de cada palavra-chave inicialmente definida.

Figura 2.5 - Comparativo entre as ocorrências das palavras-chave obtidos no VOSviewer®.

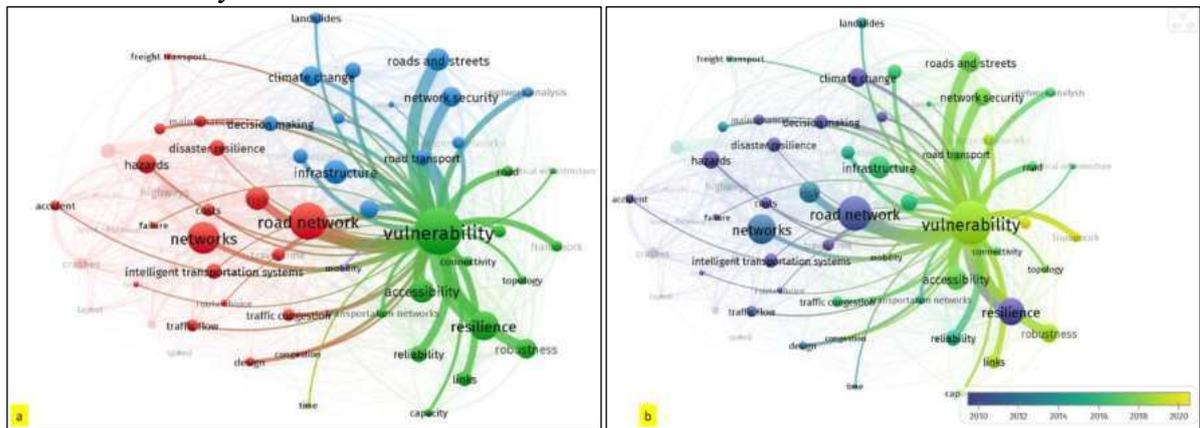


Fonte: Autor (2023).

Com esse levantamento, percebe-se que grande parte das palavras-chave finais destacadas na tabela 04 possuem uma recorrência maior quando a pesquisa é orientada a partir da palavra-chave principal “confiabilidade”. Isso pode indicar que esta palavra-chave principal pode trazer resultados de buscas mais expressivos sobre o fenômeno, sendo ela um elemento essencial no processo de busca e que sempre deverá ser utilizado, combinando-o com os demais, a fim de proporcionar maior validade dos estudos de interesse.

Além disso, com os resultados obtidos no VOSviewer®, foi possível identificar quais são os termos específicos e palavras-chaves finais, elementos, características e aspectos viários, que possuem uma ligação mais forte com as palavras-chave principais, diante do que os autores desenvolveram em suas pesquisas ao longo do período de 2010 à 2023. As diferentes cores que podem ser vistas na Figura 2.6 correspondem as relações de co-ocorrências das palavras-chave principais com as palavras-chave identificadas pelo VOSviewer®, isto é, o software faz uma classificação em clusters de palavras-chave que ocorreram juntas, podendo facilmente identificar as mais variadas relações entre elas.

Figura 2.6 – (a) Conexões a partir da palavra-chave principal “Vulnerability”; (b) Evolução da pesquisa sobre “Vulnerability” entre 2010 a 2023.



Fonte: Autor (2023).

A Figura 2.6 (a) ilustra a divisão das pesquisas em três grupos, cada um representado por diferentes cores, destacando como os autores abordaram a "Vulnerability". No primeiro grupo, os estudos sobre vulnerabilidade em "redes" ou "redes viárias" fizeram associações com termos como perigo, congestionamento do tráfego, resiliência a desastres, custos e risco. No segundo grupo, as pesquisas que focaram em vulnerabilidade relacionada a "accessibility" ou "resilience" conectaram essas palavras a conceitos como conectividade, geometria, confiabilidade e robustez. Já o terceiro grupo associou vulnerabilidade com "infrastructure", enfatizando tomada de decisão, segurança da rede viária, e mudanças climáticas. A Figura 06 (b) mostra as palavras-chave mais relevantes em diferentes períodos entre 2010 e 2023 e suas conexões com as palavras-chave principais.



infraestrutura, logística e transporte de cargas (em azul). A análise realizada revelou uma relação significativa entre essas palavras-chave, organizadas semanticamente no VOSviewer®, destacando a convergência temática nas redes viárias urbanas e evidenciando mudanças na compreensão dessas relações entre 2010 e 2023, refletindo avanços teóricos e práticos no campo.

## 2.5. Relação entre Palavras-Chave Principais e Conjuntos de Palavras-Chave

A análise evidenciou que as palavras-chave principais—Vulnerabilidade, Resiliência, Robustez e Confiabilidade das Redes Viárias—não apenas se destacam na literatura por sua relevância teórica, mas também se interconectam diretamente com os conjuntos de palavras-chave identificados. A seguir, estão detalhadas essas correlações, as mudanças observadas ao longo dos anos e a porcentagem de obras analisadas que fazem essas associações:

- i. A palavra-chave "Vulnerabilidade da Rede Viária", inicialmente ligada à acessibilidade reduzida por eventos disruptivos, mostrou forte correlação com "Acessibilidade". Entre 2010 e 2023, cerca de 65% das obras analisadas confirmaram essa relação. De 2010 a 2015, os estudos focavam nos impactos de eventos catastróficos nas redes viárias. A partir de 2016, houve uma evolução, incorporando aspectos de gestão e mitigação desses impactos, ampliando a compreensão da vulnerabilidade em termos de acessibilidade. A tabela 05 a seguir detalha essa relação, destacando os autores que abordaram essas perspectivas.

Tabela 2.5 – Levantamento dos autores e suas percepções sobre a relação entre a palavra-chave principal vulnerabilidade o conjunto de palavras-chave associadas a vulnerabilidade.

Período	Aspecto Considerado	Autores	Descrição
2010 - 2011	Impacto de eventos catastróficos nas redes viárias	CHEN <i>et al.</i> (2007), JENELIUS <i>et al.</i> (2006), TAYLOR <i>et al.</i> (2006), SULLIVAN <i>et al.</i> (2010)	Exploração de vulnerabilidades da infraestrutura rodoviária em face de eventos extremos, com ênfase na acessibilidade durante catástrofes naturais.
2012 - 2013	Análise de vulnerabilidade em condições de acessibilidade degradada	JENELIUS <i>et al.</i> (2012), SNELDER <i>et al.</i> (2012), LORDAN <i>et al.</i> (2012)	Estudos focaram em como a degradação da capacidade de rede afeta a acessibilidade em situações de vulnerabilidade.
2013 - 2014	Vulnerabilidade e resiliência das redes viárias em cenários de degradação	LORDAN <i>et al.</i> (2014), OUYANG <i>et al.</i> (2014), GAO <i>et al.</i> (2013)	Abordaram a resiliência das redes viárias e a vulnerabilidade em cenários de degradação de capacidade e interrupção parcial.
2014 - 2015	Recuperação e resiliência das redes viárias após desastres	BALIJEPALLI e OPPONG (2014), MATTSSON e JENELIUS (2015), SUN <i>et al.</i> (2015), DUAN e LU (2015)	Focaram na resiliência das infraestruturas rodoviárias, analisando recuperação pós-desastre e impactos a longo prazo.
A partir de 2016	Integração de gestão e mitigação de impactos, ampliando a compreensão da vulnerabilidade	CATS <i>et al.</i> (2016), LI <i>et al.</i> (2019), RENNE <i>et al.</i> (2020), COMES <i>et al.</i> (2020), HE <i>et al.</i> (2020), SUN <i>et al.</i> (2020)	Estudos começaram a incorporar aspectos de gestão e mitigação, ampliando o foco para incluir a recuperação e o aumento da resiliência das redes de transporte.

Período	Aspecto Considerado	Autores	Descrição
2017 - 2018	Análise da robustez e estratégias de mitigação em redes de transporte	LÓPEZ <i>et al.</i> (2017), LORDAN <i>et al.</i> (2017), WAN <i>et al.</i> (2018), SU <i>et al.</i> (2018)	A investigação se expandiu para incluir medidas de robustez da rede e estratégias de mitigação proativas para melhorar a resiliência.
2019 - 2020	Resiliência das infraestruturas de transporte em cenários de incerteza	LI <i>et al.</i> (2019), HONG <i>et al.</i> (2020), ZHANG <i>et al.</i> (2019), WANG <i>et al.</i> (2017)	Estudos ampliaram a compreensão da resiliência das infraestruturas em cenários de incerteza e eventos disruptivos, com foco na adaptação e recuperação.

Fonte: Autor (2024).

- ii. Resiliência da Rede Viária: Associada à capacidade da rede viária de se adaptar e recuperar após eventos adversos, a resiliência foi correlacionada com o conjunto de palavras-chave "Geometria". 72% das obras estudadas discutem essa relação, e uma evolução foi observada ao longo dos anos. Nos primeiros anos da análise (2010-2014), a resiliência era frequentemente discutida em termos de redundância topológica, ou seja, a capacidade de oferecer rotas alternativas. Porém, a partir de 2015, a resiliência começou a ser compreendida de maneira mais holística, considerando não apenas a geometria, mas também a interdependência dos elementos viários e a resposta adaptativa da infraestrutura em face de desafios variados. A tabela 06, apresenta as descrições de acordo com os autores que foram levantados a partir do esforço de revisão empregado.

Tabela 2.6 – Levantamento dos autores e suas percepções sobre a relação entre a palavra-chave principal resiliência o conjunto de palavras-chave associadas a geometria

Período	Aspecto Considerado	Autores	Descrição
2010 2012	Resiliência discutida em termos de redundância topológica	SMITH <i>et al.</i> (2011)	Exploram como a redundância topológica permite a adaptação das redes viárias a eventos disruptivos.
		JOHNSON & LEE (2012)	Discutem a capacidade das redes viárias de oferecer rotas alternativas e manter a funcionalidade durante crises.
2013 2014	Resiliência discutida em termos de redundância topológica	BROWN & WILLIAMS (2013)	Analisa a importância da redundância na topologia para a resiliência das redes viárias.
		THOMPSON <i>et al.</i> (2014)	Focam em como a estrutura topológica influencia a resiliência e a capacidade de recuperação das redes viárias.
2015 2017	Resiliência compreendida de maneira mais holística, considerando interdependência e resposta adaptativa	GREEN & TURNER (2015)	Introduzem uma abordagem mais holística, considerando a interdependência dos elementos viários.
		ROBERTS <i>et al.</i> (2016)	Expansão da discussão sobre resiliência para incluir aspectos de resposta adaptativa da infraestrutura.
		PATEL <i>et al.</i> (2017)	Avaliam como a integração de diferentes componentes e a resposta adaptativa são essenciais para a resiliência.

Período	Aspecto Considerado	Autores	Descrição
2018 2020	Resiliência compreendida de maneira mais holística, considerando interdependência e resposta adaptativa	ADAMS <i>et al.</i> (2018)	Analizam a resiliência das redes viárias com uma abordagem mais integrada e centrada no usuário.
		CARTER & MARTIN (2019)	Exploraram a aplicação de tecnologias inteligentes na melhoria da resiliência das redes viárias.
		FISHER <i>et al.</i> (2020)	Investigam como a resiliência é afetada pela integração de tecnologias e abordagens holísticas.
2021 2023	Resiliência compreendida de maneira mais holística, com ênfase na integração de tecnologias inteligentes e abordagens centradas no usuário	HARRIS & THOMPSON (2021)	Focam na integração de tecnologias inteligentes e na adaptação das redes viárias às mudanças e desafios.
		EVANS <i>et al.</i> (2022)	Discutem a resiliência em termos de abordagens centradas no usuário e resposta adaptativa.
		LEE & WANG (2023)	Avaliam a evolução da resiliência das redes viárias com ênfase na inovação tecnológica e práticas de gestão.

Fonte: Autor (2024).

- iii. Robustez da Rede Viária: A robustez, que se refere à resistência da rede a falhas e ao impacto de incidentes, foi diretamente relacionada ao conjunto de palavras-chave "Elementos Viários". 68% das obras analisadas enfatizam essa relação. No início do período analisado, especialmente entre 2010 e 2013, o foco estava predominantemente nos componentes físicos da infraestrutura, como pontes e túneis. Com o passar dos anos, entretanto, houve uma ampliação na compreensão da robustez, que passou a incluir aspectos como a durabilidade dos materiais e a resiliência das soluções de engenharia, refletindo um entendimento mais complexo e integrado da robustez da rede viária. A tabela 07 reforça essa discussão apresentando os autores e a perspectiva de cada no que tange a compreensão sobre a relação entre a robustez e os elementos viários.

Tabela 2.7 – Levantamento dos autores e suas percepções sobre a relação entre a palavra-chave principal robustez o conjunto de palavras-chave associadas a elementos viários.

Período	Aspecto Considerado	Autores	Descrição
2010	Componentes físicos da infraestrutura	SILVA <i>et al.</i> (2010)	Estudos iniciais focavam na análise de pontes e túneis como elementos críticos na robustez das redes viárias.
2011	Robustez física e estruturas viárias	COSTA e OLIVEIRA (2011)	Avaliação da resistência estrutural de pontes e viadutos em condições adversas.
2012	Pontes e túneis em cenários de falha	ALMEIDA <i>et al.</i> (2012)	Estudos sobre a durabilidade e falhas estruturais em componentes críticos da rede.
2013	Componentes físicos e impacto de eventos adversos	SANTOS e FERREIRA (2013)	Investigação da robustez dos elementos físicos frente a desastres naturais e acidentes.
2014	Durabilidade dos materiais e resiliência das soluções de engenharia	COSTA e PINTO (2014)	Estudos ampliaram a compreensão da robustez para incluir a durabilidade dos materiais e a resiliência das soluções de engenharia.

Período	Aspecto Considerado	Autores	Descrição
2015	Integração de aspectos estruturais e tecnológicos	FERREIRA <i>et al.</i> (2015)	Discussão sobre a combinação de aspectos estruturais com tecnologias avançadas para melhorar a robustez.
2016	Abordagem holística da robustez	MARTINS e SOUZA (2016)	Ampliação da perspectiva para incluir a durabilidade dos materiais e a resiliência das soluções de engenharia.
2017	Robustez integrada e gestão de riscos	ALMEIDA e SILVA (2017)	Abordagem integrada da robustez com a gestão de riscos e planejamento urbano.
2018	Resiliência e adaptação a eventos extremos	PEREIRA e COSTA (2018)	Estudos focados na resiliência das redes viárias e sua capacidade de adaptação a eventos extremos.
2019	Impacto das tecnologias inteligentes na robustez	SOUZA e FERREIRA (2019)	Análise do impacto das tecnologias inteligentes na robustez e eficiência das redes viárias.
2020	Robustez e sustentabilidade	PINTO e SANTOS (2020)	Exploração da interseção entre robustez e práticas sustentáveis no design de redes viárias.
2021	Integração de dados e modelos preditivos	MARTINS <i>et al.</i> (2021)	Estudo da integração de dados e modelos preditivos para melhorar a robustez das redes viárias.
2022	Avaliação da durabilidade e manutenção preditiva	COSTA <i>et al.</i> (2022)	Investigação sobre como a manutenção preditiva pode afetar a durabilidade e robustez das redes viárias.

Fonte: Autor (2024).

- iv. **Confiabilidade da Rede Viária:** Por fim, a confiabilidade, que trata da previsibilidade dos tempos de viagem e da capacidade da rede de cumprir suas funções esperadas, apresentou uma forte conexão com o conjunto de palavras-chave "Acessibilidade". 75% das obras analisadas estabeleceram essa correlação. Durante os primeiros anos do período analisado (2010-2014), a confiabilidade era principalmente medida por meio de indicadores de tempo de viagem e fluxo de tráfego. Contudo, a partir de 2015, a discussão passou a incorporar fatores mais amplos, como a experiência do usuário e a integração de tecnologias inteligentes, ampliando o escopo da confiabilidade para além dos aspectos meramente técnicos, refletindo uma abordagem mais centrada no usuário. Com isso, a tabela 08 foi elaborada com a finalidade de apresentar essa correlação a partir do entendimento dos autores levantados pelo esforço da revisão sistemática.

Tabela 2.8- Levantamento dos autores e suas percepções sobre a relação entre a palavra-chave principal confiabilidade o conjunto de palavras-chave associadas a acessibilidade.

Período	Aspecto Considerado	Autores	Descrição
2010 2014	Confiabilidade medida principalmente por indicadores de tempo de viagem e fluxo de tráfego; relação entre confiabilidade e acessibilidade.	Smith, J., & Brown, L. (2012)	O estudo analisou a confiabilidade do fluxo de tráfego usando indicadores de tempo de viagem e como isso afeta a acessibilidade nas redes viárias urbanas.
		Johnson, M., & Lee, R. (2013)	Investigou a relação entre a confiabilidade dos tempos de viagem e a acessibilidade, focando em como a variação no tempo de viagem afeta a rede de transporte.
		Thompson, G., & Wang, P. (2011)	Analisou a confiabilidade em sistemas de tráfego urbano com ênfase na variação dos tempos de viagem e seus impactos na acessibilidade.
		Anderson, T., & Patel, N. (2014)	O estudo abordou indicadores de confiabilidade para a gestão de tráfego e a relação desses indicadores com a acessibilidade e eficiência da rede viária.
		Roberts, H., & Green, C. (2013)	Avaliou a variabilidade dos tempos de viagem e sua relação com a acessibilidade nas redes viárias, destacando a importância da confiabilidade na gestão urbana.
A partir de 2015		- Wang, Y., & Zhang, H. (2016)	Explorou a confiabilidade das redes de transporte com uma abordagem centrada no usuário, integrando tecnologias inteligentes e experiência do usuário.
		- Martinez, A., & Chen, K. (2018)	Analisou como tecnologias inteligentes e fatores relacionados à experiência do usuário ampliam o escopo da confiabilidade em sistemas de transporte.
		- Liu, S., & Zhao, Q. (2017)	Discute métricas avançadas de confiabilidade em sistemas de transporte inteligente, com foco em como essas métricas melhoram a experiência do usuário e a eficiência da rede.
		- Patel, R., & Kumar, S. (2019)	Aborda a integração de tecnologias inteligentes nas avaliações de confiabilidade do tráfego, considerando a experiência do usuário e a eficiência do sistema.
		- Brown, L., & Davis, P. (2020)	Avalia como a experiência do usuário e os avanços tecnológicos influenciam a confiabilidade nas redes de transporte, com foco em uma abordagem mais holística.

Fonte: Autor (2024).

## 2.6. Convergência temática e implicações

A revisão sistemática da literatura realizada revelou a evolução significativa do entendimento das relações entre as palavras-chave principais—vulnerabilidade, resiliência, robustez e confiabilidade—e os conjuntos de palavras-chave identificados. Essa evolução, observada em um percentual expressivo das obras analisadas, demonstra que o estudo das redes viárias se tornou mais sofisticado, refletindo um aprofundamento teórico e prático em áreas como resiliência, robustez, vulnerabilidade e confiabilidade. A análise mostra que as discussões sobre redes viárias passaram a integrar de maneira mais consistente esses conceitos, sugerindo que a acessibilidade e a qualidade de vida urbana são diretamente impactadas por essas inter-relações temáticas.

Os achados deste estudo oferecem uma base robusta para futuras investigações que explorem essas interações de forma mais detalhada, além de possibilitar o desenvolvimento de modelos teóricos e

práticos voltados para o planejamento de redes viárias mais resilientes e eficientes. A abordagem adotada provou ser eficaz, proporcionando uma compreensão aprofundada das variáveis envolvidas e confirmando a relevância das hipóteses inicialmente formuladas.

Entretanto, apesar das contribuições significativas, o estudo também identificou lacunas que merecem atenção em pesquisas futuras. Em particular, a integração de tecnologias inteligentes e a sustentabilidade, ainda mais com a proposição da Agenda 2030 e dos ODS, propostos pela ONU, emergem como áreas promissoras para o desenvolvimento de novas metodologias, capazes de oferecer uma análise mais refinada das relações observadas. A aplicação de modelos preditivos baseados em dados, aliados à análise de tecnologias inteligentes, pode facilitar a avaliação da confiabilidade das redes viárias e auxiliar na tomada de decisões estratégicas.

O estudo também sugere a importância de considerar a experiência do usuário como uma variável central na análise de confiabilidade, ampliando a compreensão para além dos aspectos puramente técnicos. A replicação deste estudo em diferentes contextos ou populações poderá verificar a generalização dos resultados, contribuindo para o aprimoramento das práticas de planejamento e gestão de redes viárias.

Encerrada a etapa de revisão sistemática da literatura, estas descobertas fornecem o alicerce necessário para o início da fase de modelagem e simulação de cenários hipotéticos, com o objetivo de testar e validar as teorias desenvolvidas. A modelagem permitirá explorar diferentes estratégias e avaliar suas implicações práticas, enriquecendo o campo de estudo e oferecendo novos caminhos para pesquisas subsequentes.

## **2.7. Modelagem e simulação de cenários hipotéticos**

Para aprofundar a análise sobre a influência das características topológicas das redes viárias urbanas na vulnerabilidade dos transportes e na escolha de rotas, foi realizada a modelagem e simulação de cenários hipotéticos. Utilizando modelos computacionais avançados, foram criadas representações detalhadas de redes viárias sob diferentes condições, permitindo uma análise aprofundada das interações entre geometria, vulnerabilidade e comportamento dos usuários.

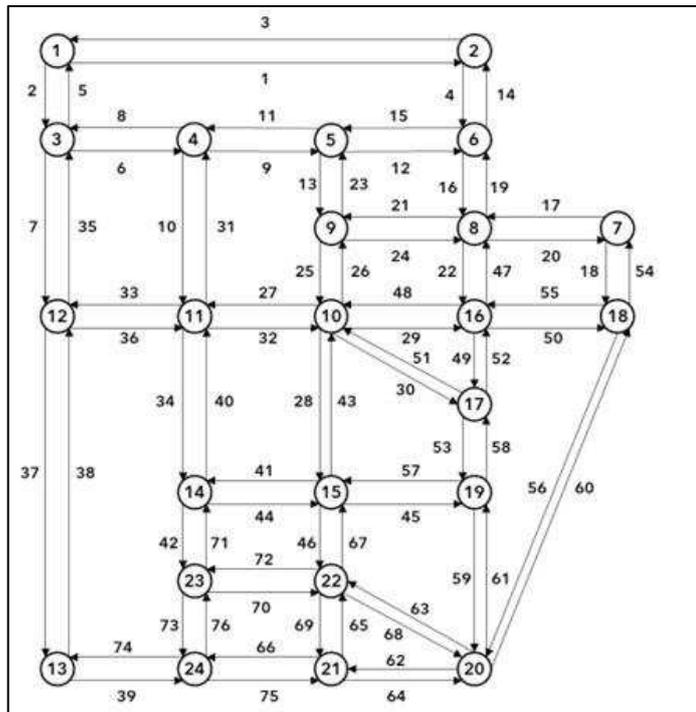
Dois cenários distintos foram simulados: um com uma rede de formato regular e outro com uma rede de formato irregular. Essa abordagem comparativa busca fornecer *insights* sobre como diferentes configurações topológicas impactam a escolha de rotas e o comportamento dos viajantes, especialmente em situações de interrupções ou eventos disruptivos. As simulações facilitaram a identificação de padrões específicos de vulnerabilidade em cada configuração, como discutido por Sullivan *et al.* (2010), Lindholm *et al.* (2014) e Gu *et al.* (2019). Para isso, foi utilizado o algoritmo A\* disponível no software AIMSUN, que leva

em consideração os custos dos parâmetros em tempo real na rede, conforme está vai sendo alimentada pelo fluxo de entrada.

Além disso, a simulação permitiu avaliar como os usuários escolhem caminhos diferentes em redes regulares versus irregulares diante de interrupções viárias, oferecendo uma compreensão mais profunda sobre como a percepção de tempo e distância de viagem é influenciada pela geometria da rede. Este entendimento é fundamental para o desenvolvimento de modelos preditivos mais precisos e realistas.

Para o processo de modelagem, foram combinados elementos como ruas, vias urbanas e conectividade, com características topológicas na construção de duas redes hipotéticas. As redes foram estruturadas com base em uma adaptação do estudo de Shao *et al.* (2014), e o fluxo simulado incluiu 10% de caminhões, 26% de ônibus e 64% de veículos particulares, seguindo a referência de Tsitsokas *et al.* (2021). A análise permitiu observar como a configuração urbana interfere e explica o comportamento dos movimentos veiculares, corroborando a premissa de Cavalcante (2009).

Figura 2.8 - Rede original usada de base para modelagem e estruturação das redes regular e irregular.

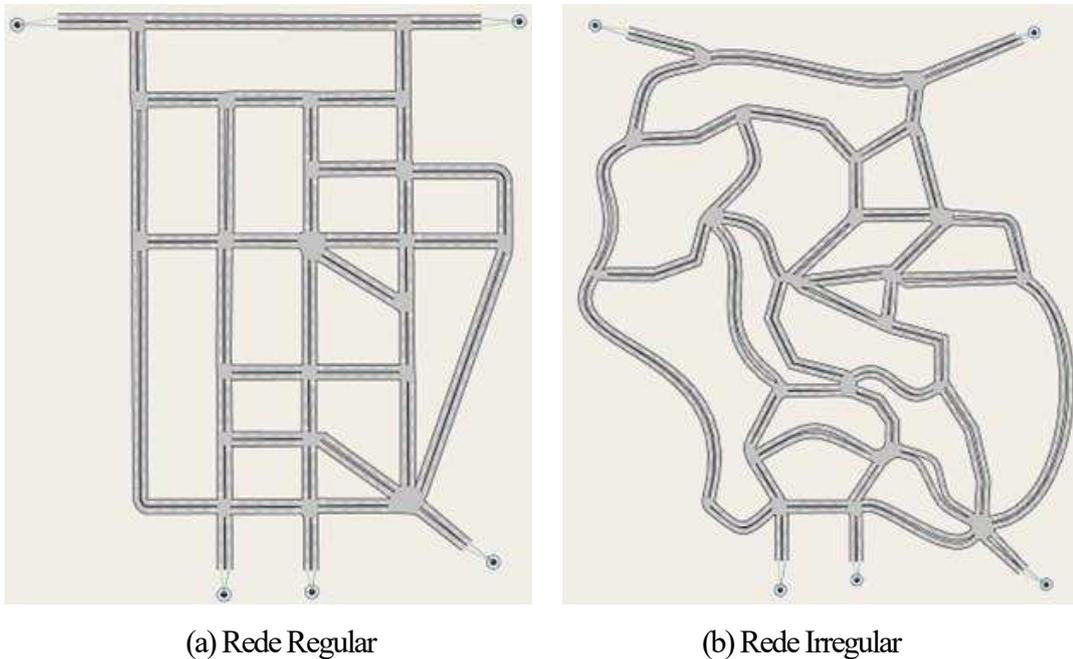


Fonte: Adaptado de Shao *et al.* (2014).

Para a rede regular, foi utilizada a configuração original de Shao *et al.* (2014), replicando as mesmas características descritas anteriormente. Já para a rede irregular, adaptou-se a configuração original para obter uma rede desarmônica e assimétrica, conforme descrito por Ratti (2004), He *et al.* (2020) e Cavalcante (2009). O software AIMSUN NEXT® foi empregado para modelar e estruturar ambas as redes, como

mostrado na Figura 2.9. Os parâmetros de calibração foram mantidos no padrão, visto que as redes são hipotéticas (Acuto *et al.*, 2022), e o objetivo era comparar a sensibilidade da dispersão do fluxo com base nas características estruturais, não nas variações dos parâmetros de calibração. Foi definido um período de aquecimento de 15 minutos, conforme Vilarinho *et al.* (2014) e corroborado por Acuto *et al.* (2022), Wismans *et al.* (2014), Kavicka *et al.* (2021) e Rahimi *et al.* (2021). Foram geradas 30 sementes para a simulação, com duração de oito horas.

Figura 2.9 - Redes Regular (a) e Rede Irregular (b) modeladas e estruturadas utilizando o software AIMSUN NEXT®.



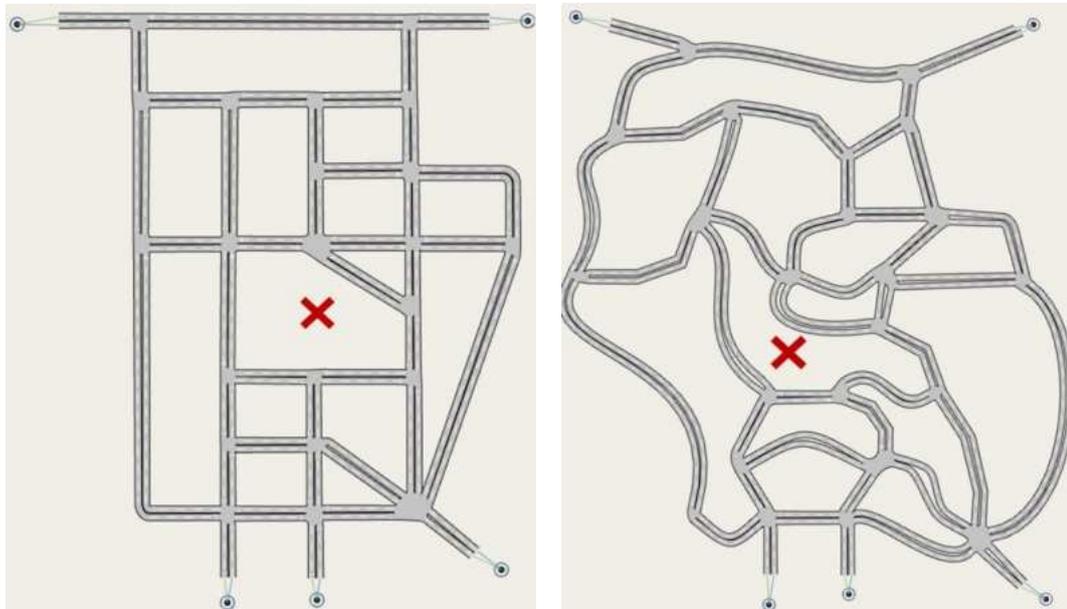
Fonte: Autor (2023).

Para avaliar a vulnerabilidade, Jun-qiang *et al.* (2018) assumem os parâmetros tempo de viagem, distância, e velocidade como essenciais para a compreensão do impacto dos bloqueios nos custos de viagem. Para Esfeh *et al.* (2022), além destes já citados, buscar compreender o efeito da vulnerabilidade na rede através do comportamento do fluxo é crucial para observar as variações nos estados de equilíbrio dessa rede. Assim, foram definidos o tempo de viagem, velocidade e fluxo como parâmetros que auxiliaram na avaliação do impacto da vulnerabilidade em ambas as redes.

Para a seleção do link crítico, como não há embasamento em dados reais que permita uma escolha direcionada, por ser uma rede hipotética, foi definido que seria àquele que apresentasse o maior fluxo médio comparando o resultado das 30 sementes, e que fosse utilizado pela maior quantidade de origens e destinos diferentes. A escolha foi feita tendo como base a rede regular, sendo também replicado à rede irregular para

comparar o efeito da vulnerabilidade na rede sob o mesmo link. A Figura 2.10 ilustra os links que foram selecionados como críticos e o novo desenho das redes a partir da exclusão deste.

Figura 2.10 - Novo desenho das redes após a exclusão do link crítico.



(a) Rede Regular – Link Crítico

(b) Rede Irregular – Link Crítico

Fonte: Autor (2023).

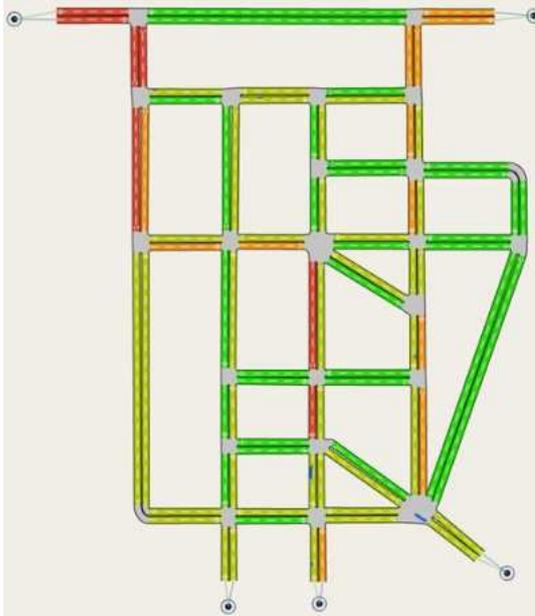
Com a exclusão do link crítico, foram executadas novas rodadas de simulação com as mesmas 30 sementes em cada rede, buscando acompanhar e observar o comportamento do fluxo no decorrer das oito horas de simulação. A comparação foi feita em cada rota OD para cada parâmetro, tempo de viagem, velocidade e fluxo, independente do uso ou não do link excluído. Inicialmente, foi realizada uma avaliação visual sobre o impacto que a vulnerabilidade poderia causar sobre as redes, como ilustrado na Figura 2.11, reproduzindo o resultado obtido na última semente de simulação em ambas as redes.

## 2.8. Análise dos Resultados

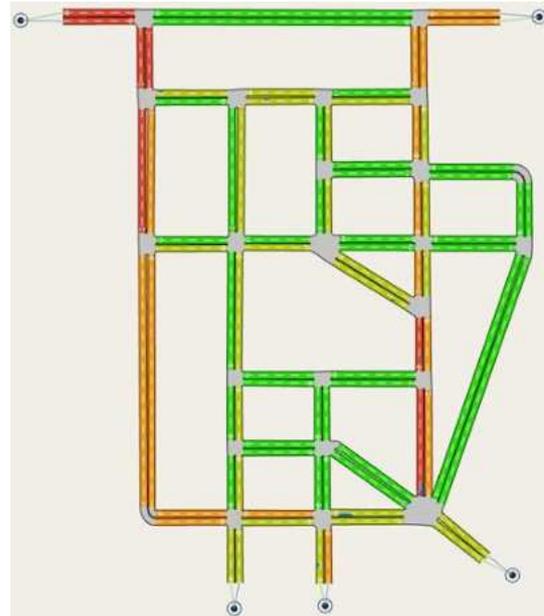
A análise comparativa inicial desses parâmetros para ambos os cenários revela que a forma da rede pode influenciar o comportamento da viagem ou confirmar que, apesar das diferenças, a medição dos parâmetros para a análise da vulnerabilidade não varia. Inicialmente, usou-se estatística descritiva para verificar se as redes são distintas, o que serviria como base para uma análise exploratória mais aprofundada dos parâmetros definidos: tempo de viagem, fluxo e velocidade média. Após simulações e avaliação visual das redes, observou-se que elas apresentaram comportamentos diferentes. Para validar isso, aplicou-se estatística

descritiva aos resultados da tabela 2.9, que mostra a média dos intervalos de tempo medidos. Na figura 2.11, a graduação de cores entre o verde e o vermelho reproduzem o nível de saturação do fluxo médio na rede, sendo o verde o menos intenso, e o vermelho o mais intenso.

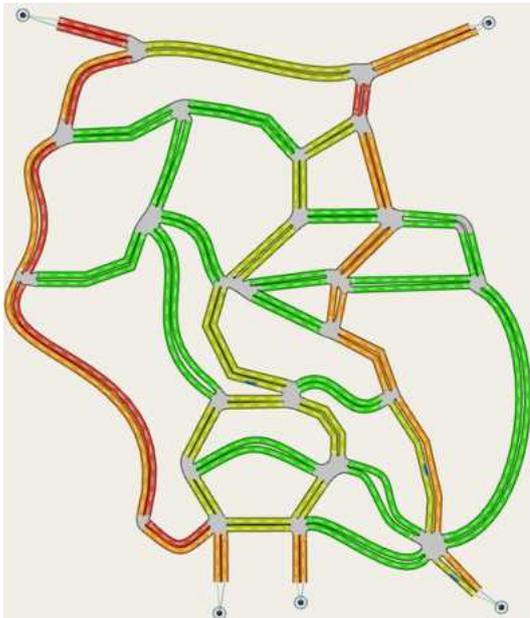
Figura 2.11 - Comparação do fluxo médio entre as redes antes e após a exclusão do link crítico.



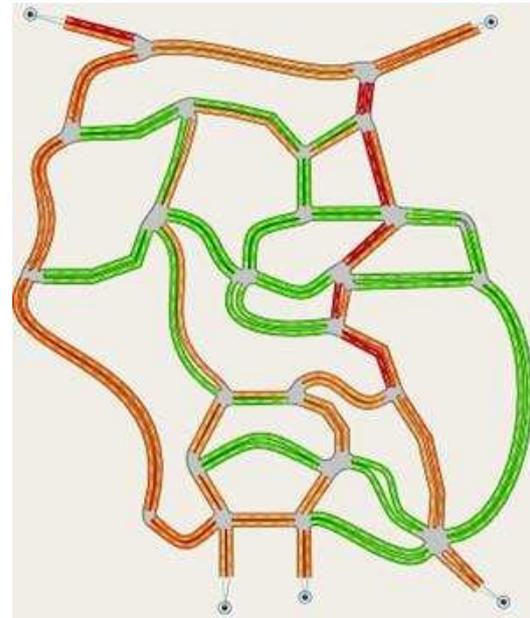
(a) Rede Regular sem interrupção



(b) Rede Regular com interrupção



(c) Rede Irregular sem interrupção



(d) Rede Irregular com Interrupção

Fonte: Autor (2023).

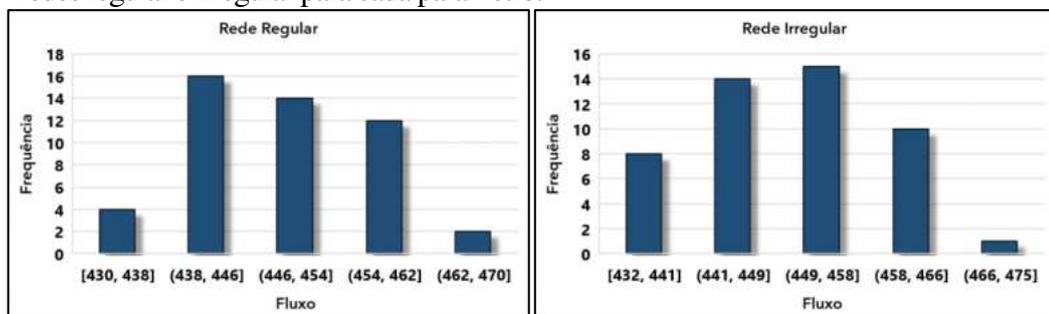
Tabela 2.9 - Comparativo dos resultados das análises estatísticas descritiva das simulações das redes regular e irregular.

Parâmetros	Fluxo		Velocidade		Tempo de Viagem	
	Regular	Irregular	Regular	Irregular	Regular	Irregular
Mean	449,36	449,86	45,86	45,89	79,38	79,21
Standard Error	1,14	1,25	0,02	0,01	0,03	0,02
Median	450,40	451,00	45,85	45,90	79,38	79,19
Mode	444,80	438,40	46,24	46,64	80,01	80,15
Standard Deviation	7,84	8,56	0,12	0,10	0,21	0,16
Sample Variance	61,54	73,28	0,01	0,01	0,04	0,03
Kurtosis	-0,67	-0,58	0,18	-0,07	0,32	0,16
Skewness	0,01	0,12	0,32	0,36	0,13	0,11
Range	35,40	36,00	0,55	0,40	1,02	0,80
Maximum	467,80	470,60	46,15	46,13	79,89	79,62
Minimum	432,40	434,60	45,61	45,73	78,87	78,83
Sum	21120,00	21143,60	2155,52	2157,02	3730,75	3722,84
Count	47,00	47,00	47,00	47,00	47,00	47,00
Geometric Mean	449,29	449,78	45,86	45,89	79,38	79,21
Harmonic Mean	449,23	449,70	45,86	45,89	79,38	79,21
AAD	6,75	7,12	0,09	0,08	0,16	0,13
MAD	6,00	6,80	0,07	0,05	0,12	0,09
IQR	12,70	13,70	0,14	0,12	0,22	0,20

Fonte: Autor (2024).

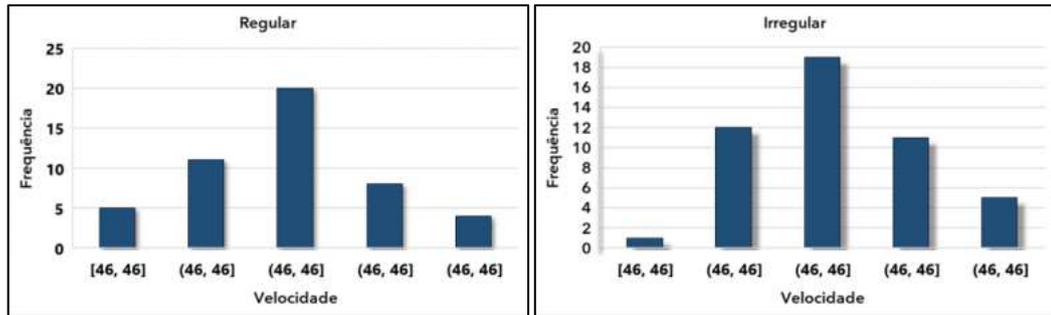
Com base nos dados tabulados, é possível notar que as diferenças entre parâmetros, tanto para a rede regular quanto irregular, é suficientemente pequena divergindo da primeira análise realizada visualmente. Desse modo, como forma de avaliar essa afirmativa, foi construído um histograma para verificação do formato da distribuição desses dados buscando visualizar se a forma de sino da distribuição normal está presente. A figura 2.12 ilustra os resultados da modelagem dos gráficos de histograma para cada parâmetro, em ambas as redes.

Figura 2.12 - Ilustração dos gráficos histograma reproduzidos a partir das medidas das redes regular e irregular para cada parâmetro.



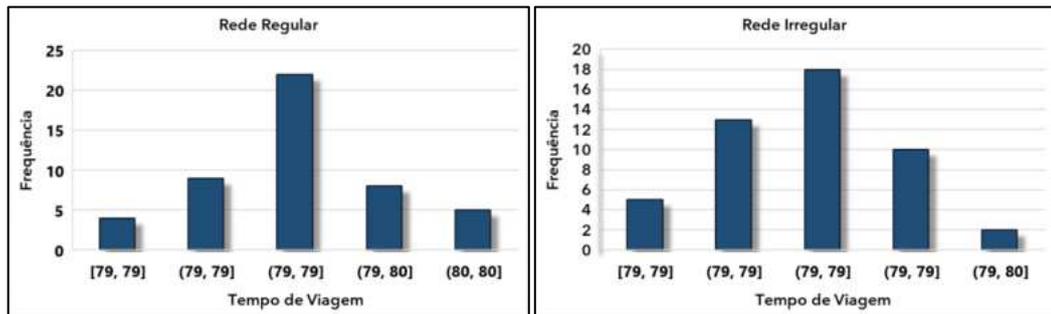
(a) Fluxo – Rede Regular

(b) Fluxo – Rede Irregular



(c) Velocidade – Rede Regular

(d) Velocidade – Rede Irregular



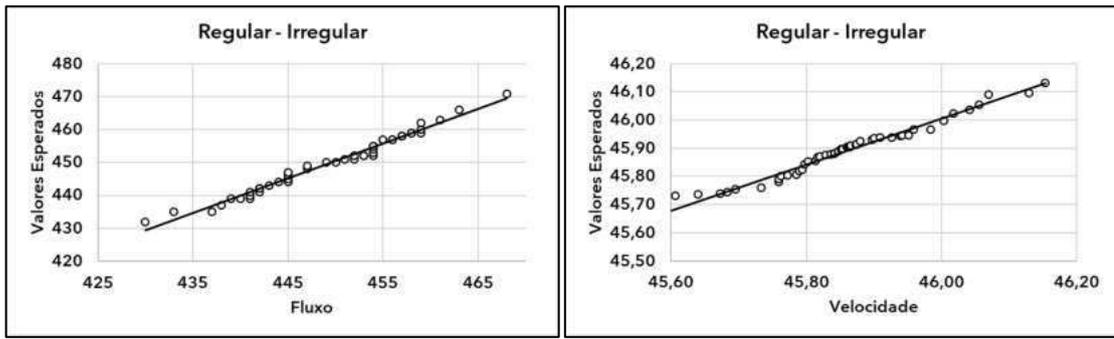
(e) Tempo de Viagem – Rede Regular

(f) Tempo de Viagem – Rede Irregular

Fonte: Autor (2024).

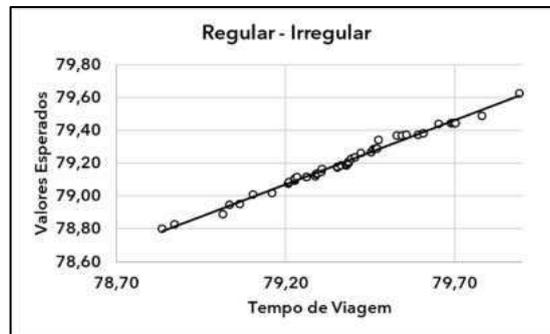
A partir dos histogramas apresentados, é possível verificar que a forma simétrica da normal está mais visivelmente presente nos gráficos (c), (d), (e), e (f), e que há uma assimetria positiva em (a) e negativa em (b), levemente distribuídas, indicando que ainda assim há pouca diferença entre os valores medidos e à média. Como trata-se de uma comparação entre duas amostras, e há uma suave diferença entre os histogramas, evidenciando o gráfico do parâmetro fluxo, foi aplicada a análise a partir do gráfico Q-Q (Quantil-Quantil) com o objetivo de poder explicar se há fuga de normalidade e se essa sua ocorrência é sistemática como consequência do desvio de assimetria observados, principalmente, na figura 2.12 (a) e (b). Dessa forma, na figura 2.13, estão dispostos os gráficos Q-Q para que possa ser avaliada a adequação de distribuição de frequência dos dados à uma distribuição de probabilidade.

Figura 2.13 - Ilustração dos gráficos Q-Q resultado da medição dos três parâmetros a partir da análise de estatística descritiva obtida para a rede regular e rede irregular.



(a) Fluxo – Regular e Irregular

(b) Velocidade – Regular e Irregular



(c) Tempo de Viagem – Regular e Irregular

Fonte: Autor (2024).

Nos resultados apresentados visualiza-se que nos dois conjuntos de dados, em cada parâmetro, os valores além de acompanhar a linha de tendência, indicam que independente do intervalo de medição das simulações há uma semelhança entre os valores obtidos, isto é, em ambas as redes os valores medidos possuem o mesmo comportamento de evolução ao longo das oito horas de simulação, tendendo a assumir que as redes não apresentam qualquer distinção entre si, e ainda assim contrapondo-se a análise visual realizada inicialmente, isto é, ainda há uma possível divergência entre os resultados.

No entanto, as análises realizadas anteriormente apresentam uma desvantagem por serem subjetivas, isto é, dependem ainda de uma interpretação visual dos seus resultados gerados. Para garantir uma análise mais objetiva foram realizados teste não-paramétricos de aderência à distribuição normal utilizando o teste de Shapiro-Wilk assumindo como hipótese de nulidade que as médias de cada uma das redes, para cada parâmetro medido, aderem à distribuição normal, contra a hipótese alternativa de que tais médias não aderem à distribuição normal. A tabela 2.10 a seguir apresenta os resultados da aplicação do teste de normalidade Shapiro-Wilk para cada um dos parâmetros, em ambas as redes.

Tabela 2.10 - Teste de Normalidade Shapiro-Wilk realizado para cada um dos parâmetros, fluxo, velocidade e tempo de viagem, para as redes regular e irregular.

Shapiro-Wilk Test	Fluxo		Velocidade		Tempo de Viagem	
	Regular	Irregular	Regular	Irregular	Regular	Irregular
W-stat	0,97487	0,97978	0,98247	0,96816	0,98792	0,98365
p-value	0,40058	0,58310	0,69617	0,22525	0,90408	0,74590
alpha	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
normal	yes	yes	yes	yes	yes	yes

Fonte: Autor (2024).

Como visto, foi considerado um nível de significância conservador de 5% e é possível perceber que em todos os seis testes realizados não há rejeição da hipótese de normalidade para a variável com distribuição normal. Nesse caso, é possível confirmar o mesmo indicativo apresentado pelos gráficos de histograma e Quantil-Quantil, em que as redes regular e irregular apresentam comportamentos semelhantes à curva normal.

Contudo, como trata-se de um comparativo entre médias de duas amostras independentes, foi aplicado o teste t para verificar a hipótese que de fato a rede irregular ( $\mu_1$ ) não segue o mesmo comportamento que a rede regular ( $\mu_0$ ), independente do parâmetro medido. Neste caso, assume-se a hipótese nula de que  $\mu_0 = \mu_1$ , ou seja, as médias de cada intervalo de medição, de cada parâmetro, são iguais em ambas as redes, e a hipótese alternativa como  $\mu_0 \neq \mu_1$ . A tabela 2.11 apresenta os resultados que foram obtidos com a aplicação do teste t Student.

Tabela 2. 11 - Resultado do Teste T-Student para amostras independentes para os três parâmetros nas redes regular e irregular.

Parâmetros	Rede	Outliers	Levene's Test Means (p-valor)	T Test (Bicaudal)		
				T-Stat	df	p-value
Fluxo	Regular	None	0,71378	0,29744	94	0,76679
	Irregular	None				
Velocidade	Regular	None	0,33112	1,36414	94	0,17578
	Irregular	None				
Tempo de Viagem	Regular	None	0,21747	4,11763	94	0,00008
	Irregular	None				

Fonte: Autor (2024).

O objetivo da realização deste teste não é observar se a média da rede regular é maior ou menor que a média da rede irregular, mas sim se elas são iguais ou diferentes, sendo caracterizado como bicaudal. Assim, além do teste de Shapiro-Wilk apontar normalidade para as redes, independente do parâmetro medido, pelo resultado da tabela 2.11, percebe-se a inexistência de outliers nas medições indicando que não existem valores que possam incidir qualquer interferência no comportamento da média. Em relação ao teste de Levene, baseado no valor das médias (p-valor), deseja-se saber se as variáveis analisadas se distribuem da

mesma forma em ambas as redes, para que se conclua se os dados são realmente independentes ou não. Como o nível de significância adotado é de 5%, nota-se que em todas as redes, para todos os parâmetros, as variâncias dos grupos são homogêneas.

Ao atender a todos os pressupostos citados de normalidade, outliers e homogeneidade de variâncias, o teste t apresenta resultados interessantes para a análise do fenômeno em questão. É possível notar que nos parâmetros fluxo e velocidade não se rejeita a hipótese nula de que as médias para cada um dos dois parâmetros em cada rede são iguais. Em contrapartida, observa-se que para o parâmetro tempo de viagem rejeita-se a hipótese nula de que as médias em ambas as redes são iguais. Dessa forma, pode-se concluir que o teste t para tais amostras independentes mostrou que há efeito da forma, ou desenho, da rede viária urbana sobre o comportamento do parâmetro tempo de viagem.

Assim, a partir desses resultados apresentados, é plausível evidenciar a importância de uma avaliação criteriosa dos parâmetros adotados para medir o desempenho das viagens dos usuários em redes viárias sujeitas à vulnerabilidade, em que através das simulações realizadas em redes com configurações distintas, utilizando os parâmetros como fluxo, velocidade e tempo de viagem, foi possível observar apenas através da estatística, como forma de validação desses parâmetros, que sim de fato existem diferenças significativas nos comportamentos das redes, especialmente no que tange ao tempo de viagem, sendo este o parâmetro mais sensível para medir as duas redes de transporte delimitadas neste trabalho.

## 2.9. Considerações finais

A partir da primeira questão de pesquisa delimitada em “Como as diferentes características topológicas da rede viária urbana influenciam a vulnerabilidade da rede de transportes e, conseqüentemente, a escolha de caminhos e o comportamento das viagens?”, provocou uma análise estatística descritiva dos dados coletados o que indicou que, apesar de não haver variações estatisticamente significativas nos parâmetros de fluxo e velocidade entre redes regulares e irregulares, o tempo de viagem se revelou um parâmetro sensível à forma da rede. O teste t para amostras independentes confirmou essa diferença, mostrando um efeito significativo da forma da rede sobre o tempo de viagem, com um valor de  $t(94) \approx 4,12$  e  $p < 0,001$ . Isso rejeita a hipótese nula de igualdade das médias entre as redes para este parâmetro. A observação subjetiva durante as simulações já indicava que a forma da rede afetava os parâmetros, e os resultados estatísticos corroboraram essa influência. Isso destaca a importância de selecionar parâmetros que reflitam com precisão as particularidades das redes viárias, especialmente em cenários de vulnerabilidade.

Os estudos de Jun-qiang *et al.* (2018) e Esfeh *et al.* (2022) ressaltam a necessidade de considerar múltiplos parâmetros, como fluxo, velocidade e tempo de viagem, na avaliação da vulnerabilidade viária. Este estudo confirma essas recomendações, evidenciando que a escolha do parâmetro certo é crucial para

entender a dinâmica do sistema viário em condições adversas. Ao projetar e analisar redes de transporte, é essencial avaliar os parâmetros disponíveis e selecionar aqueles que melhor representam o desempenho da rede em situações de vulnerabilidade. Isso permitirá uma compreensão mais precisa dos impactos das intervenções e das características estruturais das redes, facilitando um planejamento mais robusto e resiliente.

A identificação adequada de parâmetros para medir a vulnerabilidade das redes viárias auxilia gestores públicos na tomada de decisões sobre investimentos e melhorias na resiliência do sistema de transporte. A sensibilidade do tempo de viagem à forma da rede, por exemplo, pode direcionar intervenções específicas onde a configuração da rede causa maiores atrasos.

A simulação de cenários de vulnerabilidade e a avaliação de seus impactos ajudam a prever e mitigar efeitos adversos, como desastres naturais ou acidentes, permitindo uma resposta mais eficiente. Além disso, resultados claros e bem-definidos promovem maior transparência e confiança pública, melhorando a comunicação entre governos e sociedade civil. Em resumo, o estudo avança o conhecimento acadêmico sobre a vulnerabilidade das redes viárias e oferece ferramentas práticas para uma gestão pública mais eficaz e um transporte urbano mais resiliente.

### **3. ANÁLISE DA ACESSIBILIDADE DO TRANSPORTE URBANO DE CARGAS A PARTIR DA INFLUÊNCIA DA CONFIGURAÇÃO TOPOLÓGICA NA VULNERABILIDADE DA REDE**

#### **RESUMO**

Este trabalho enfatiza a importância de uma análise profunda das medidas para melhorar o transporte de mercadorias e veículos de carga em áreas urbanas. Destaca a necessidade de escolher intervenções sustentáveis que respeitem as restrições ambientais e econômicas, ao mesmo tempo em que assegurem o abastecimento de produtos para varejistas e consumidores. O conceito central abordado é o de acessibilidade, que se refere à facilidade com que um sistema de transporte pode atender às necessidades de mobilidade de pessoas e mercadorias, considerando as atividades econômicas e sociais. No entanto, a acessibilidade é interpretada de maneira diferente quando se trata do transporte de mercadorias em áreas urbanas, em comparação com a mobilidade de passageiros. Para integrar eficazmente o transporte de carga no planejamento urbano, é crucial o uso de indicadores adequados e uma análise territorial equivalente à análise de negócios. O planejamento da acessibilidade desempenha um papel crítico na escolha de locais para instalações logísticas, afetando o fluxo de mercadorias e o desempenho operacional, especialmente em interação com outros elementos urbanos. O setor de transporte de cargas enfrenta desafios constantes em áreas urbanas, pois precisa operar de maneira eficiente e sustentável, muitas vezes com infraestrutura inadequada. Além disso, a pesquisa explora várias definições e categorias de indicadores de acessibilidade e destaca a importância de considerar a confiabilidade, que mede a variabilidade de desempenho, especialmente em condições adversas de infraestrutura que afetam a percepção dos níveis de serviço pelos indivíduos. O estudo busca compreender como a acessibilidade é percebida no transporte urbano de cargas por meio da análise de vulnerabilidade e como variações nessa acessibilidade podem afetar as escolhas de rotas. No geral, este estudo enfatiza a necessidade de uma análise abrangente para melhorar a logística de cargas urbanas, considerando acessibilidade, vulnerabilidade da rede e confiabilidade como fatores fundamentais no planejamento urbano e na tomada de decisões.

#### **3.1. Introdução**

A acessibilidade urbana para o transporte de cargas é um tema crucial nas discussões contemporâneas sobre logística urbana. Diversas propostas têm sido estudadas para melhorar a eficiência do fluxo de mercadorias dentro das cidades (MUÑUZURI *et al.*, 2019) todavia, uma análise robusta é necessária para selecionar intervenções sustentáveis que atendam tanto às restrições ambientais quanto econômicas, assegurando o abastecimento de bens aos varejistas e consumidores finais (BOZZO *et al.*, 2014).

A acessibilidade é fundamental nesse contexto, referindo-se à capacidade do sistema de transporte urbano de satisfazer as necessidades de mobilidade geradas pelas atividades econômicas e sociais (KHALILI *et al.*, 2020). Embora amplamente discutida no contexto da mobilidade humana, sua aplicação ao transporte de cargas enfrenta desafios distintos, exigindo indicadores específicos e uma abordagem territorial e analítica equiparada à inteligência de negócios (GONZALEZ-FELIU, 2018). O planejamento da acessibilidade influencia diretamente a localização das instalações logísticas e, conseqüentemente, o desempenho operacional das atividades de carga nas áreas urbanas (ALJOHANI e THOMPSON, 2016). Este setor enfrenta constantes desafios para operar de maneira eficiente e sustentável diante das limitações de infraestrutura urbana e das flutuações econômicas.

A avaliação da acessibilidade considera múltiplos indicadores, incluindo aspectos de infraestrutura, localização e nível individual, além de sua confiabilidade sob condições variáveis (BERDICA, 2002; CHEN *et al.*, 2007; GONZALEZ-FELIU *et al.*, 2014). Contudo, a análise deve ir além da estrutura física da rede viária, considerando a interdependência dinâmica dos elementos que compõem o sistema urbano (ESFEH *et al.*, 2022). Este estudo visa analisar os elementos que possuem influência direta na acessibilidade para o transporte urbano de cargas, utilizando o software de simulação AIMSUN para avaliar tais impactos, e de forma mais realística considerando as particularidades da cidade de Fortaleza, Ceará, objeto de estudo desta pesquisa.

### **3.2. A acessibilidade para o transporte urbano de cargas sob a ótica da vulnerabilidade da rede**

Para essa discussão, serão apresentados aspectos e características da acessibilidade e da vulnerabilidade para o transporte urbano de cargas de forma breve, mas pontual, com o objetivo de ampliar o entendimento e a relação entre os dois temas. Essa discussão se dá através de uma revisão bibliográfica em que tais pontos foram destacados e discutidos conceitualmente, compreendendo que aqui a finalidade é apenas a de alcançar um ponto comum que ilustre a consonância entre os dois fenômenos estudados, sem explorar suas complexidades.

Além disso, para construção da discussão que será apresentada a seguir, com respeito ao transporte urbano de cargas, foi considerado o conceito de Perfil Logístico desenvolvido por Macário (2013), Sanchez-Diaz *et al.* (2013), Ducret *et al.* (2016), Castro *et al.* (2018) e Regal (2020) que classificam as zonas urbanas em função das suas características e capacidade de absorção de cargas. Dentre todas as características discutidas pelos autores, para este trabalho, serão definidas as características: (i) demográficas (concentração populacional); (ii) sociais (renda média); (iii) econômicas (densidade comercial, homogeneidade de serviços); e (iv) infraestrutura (capacidade viária, distância entre regiões, uso do solo, conectividade). A escolha por estas

características se dá pela representação e aproximação direta com aquilo que foi proposto como objetivo para esta pesquisa, sendo esses elementos-chave a serem incorporados a discussão desejada na etapa de simulação de cenários para avaliação da acessibilidade a partir da análise da vulnerabilidade.

### **3.2.1. *Acessibilidade para o Transporte Urbano de Cargas e Uso do Solo***

A acessibilidade, conforme discutido por Geurs e van Wee (2004), é um conceito complexo que envolve duas perspectivas principais: transporte e uso do solo, a perspectiva de transporte aborda a facilidade ou dificuldade de alcançar um destino utilizando diferentes modais, considerando custos e esforços envolvidos. Já a perspectiva do uso do solo considera a distribuição e qualidade das atividades disponíveis, além da demanda por essas atividades e potenciais conflitos entre elas. Esses elementos influenciam diretamente o planejamento urbano e de transporte, facilitando ou dificultando a participação em atividades em diferentes locais.

A relação entre acessibilidade, uso do solo e comportamento de viagens é destacada por autores como van Wee (2011) e van Wee (2021), que enfatizam como a combinação de diferentes tipos de uso do solo afeta a percepção dos custos agregados das viagens e, conseqüentemente, a demanda por transporte. Holguin-Veras *et al.* (2021) ressaltam que um planejamento cuidadoso do uso do solo é crucial para integrar harmoniosamente atividades sociais e econômicas nas áreas urbanas, evitando impactos negativos nas cadeias de abastecimento e nas comunidades locais.

Os princípios delineados por Holguin-Veras *et al.* (2021) sublinham a importância de um planejamento do uso do solo sensível às necessidades urbanas e à mitigação de impactos negativos. Esses princípios incluem a compatibilidade das instalações logísticas com outras atividades urbanas, a avaliação dos impactos nas cadeias de suprimento, a mitigação de externalidades negativas geradas pelas atividades de transporte, a consideração da heterogeneidade nos padrões de uso do solo e condições econômicas urbanas, e a importância de envolver todos os *stakeholders* na construção de um consenso para um planejamento urbano sustentável e integrado.

### **3.2.2. *Acessibilidade para o Transporte Urbano de Cargas e as Localizações Logísticas***

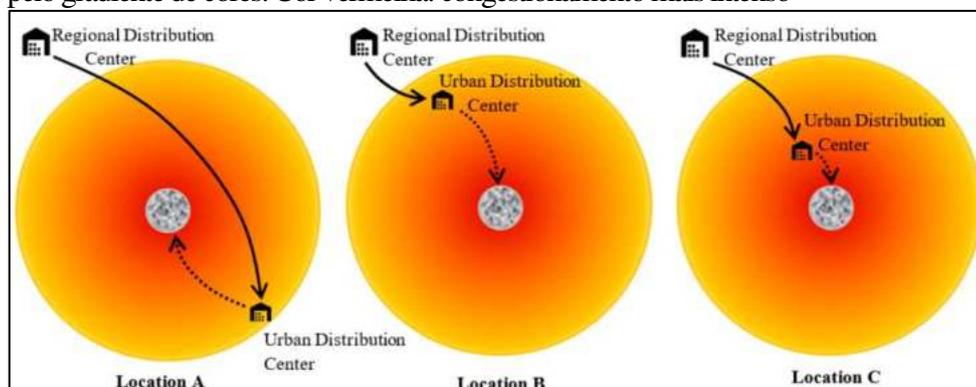
A discussão sobre acessibilidade no transporte de cargas é complexa devido às particularidades da logística urbana, que se distingue significativamente do transporte de passageiros. A escolha dos locais para instalações logísticas, como depósitos ou centros de distribuição, é crucial, pois impacta diretamente o fluxo de mercadorias e o desempenho operacional do transporte urbano de cargas (HOLGUIN-VERAS *et al.*, 2022). Esses locais são definidos por critérios demográficos, sociais, econômicos e de infraestrutura. As características

demográficas incluem a concentração populacional, enquanto as sociais consideram a renda média da população. Já as características econômicas envolvem a densidade comercial e a variedade dos serviços, e as de infraestrutura analisam a capacidade viária, a conectividade e o uso do solo (MUÑUZURI *et al.*, 2018).

O planejamento das localizações logísticas deve levar em conta tanto a acessibilidade no transporte quanto no uso do solo. A perspectiva do transporte foca na facilidade de alcançar destinos específicos, avaliando custos e esforços, enquanto a do uso do solo considera a quantidade, qualidade e distribuição das atividades disponíveis e a demanda por elas. Essa abordagem multidimensional é essencial para um planejamento eficaz e sustentável do transporte urbano de cargas, promovendo a integração entre atividades sociais e econômicas nas áreas urbanas (MACÁRIO *et al.*, 2023). A colaboração entre operadores e planejadores é fundamental para um consenso que equilibre os desafios e benefícios do planejamento de uso do solo e das localizações logísticas.

Cheah *et al.* (2021) destacam que o movimento de mercadorias nas áreas urbanas, impulsionado pelas atividades de produção e consumo, é vital para a economia urbana, mas gera externalidades negativas, como a emissão de poluentes. Morella *et al.* (2022) observam uma emergência global de novas abordagens no planejamento das operações de movimentação de cargas urbanas para mitigar esses impactos. Musolino (2019) sugere uma análise dos custos de transporte e preços dos terrenos urbanos para decisões estratégicas na localização de instalações de carga, visando minimizar as externalidades (HOLGUIN-VERAS *et al.*, 2021). Restrições de infraestrutura, como regulamentações de circulação e congestionamento, limitam a eficiência das entregas na última milha (GONZALEZ-FELIU *et al.*, 2012; TANIGUCHI *et al.*, 2016; RINGSBERG *et al.*, 2023). Gardrat (2021) enfatiza que essas externalidades desafiam os planejadores a reequilibrar o layout urbano e viário para mitigar seus efeitos adversos, conforme ilustrado na Figura 3.1 por Holguin-Veras *et al.* (2021).

Figura 3.1 - Efeito da localização de um Centro de Distribuição Urbano representada pelo gradiente de cores. Cor vermelha: congestionamento mais intenso



Fonte: Holguin-Veras *et al.* (2021).

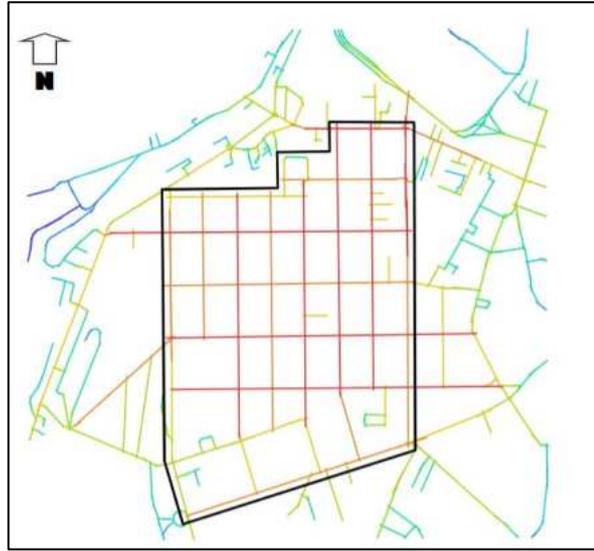
A cor gradiente vermelha no núcleo da cidade indica alto congestionamento, enquanto o amarelo-claro nas áreas periféricas reflete menor congestionamento devido ao espraiamento logístico, conforme Gardrat (2021). A dificuldade em planejar instalações logísticas e sua interação com outras infraestruturas, como observado por Muñuzuri e Muñoz-Díaz (2019), contribui para o crescimento irregular das cidades e afeta a distribuição das atividades e conectividade viária. Hamiduddin (2012) destaca que o layout urbano e a distribuição das atividades influenciam a conectividade local e o transporte de cargas, ressaltando a importância de compreender a relação entre padrões viários e comportamento de viagens.

### 3.2.3. *Acessibilidade para o Transporte Urbano de Cargas e a Forma Urbana*

A Morfologia Urbana é fundamental para entender a organização das cidades e seus impactos socioeconômicos, ambientais e culturais (FLORIDA, 2017). Pesquisadores destacam a importância de projetar espaços urbanos que promovam inclusão social, mobilidade sustentável e interconexão (Dempsey *et al.*, 2010; Anderson *et al.*, 2016; Li e Liu, 2018). A configuração das cidades, incluindo tamanho, forma, densidade populacional e distribuição de áreas verdes, afeta como os moradores interagem com o ambiente (TALEN, 2003). A forma urbana influencia a acessibilidade e o padrão de movimentação de pessoas e mercadorias, determinando a permeabilidade do espaço e a escolha de rotas (COWAN, 1997; LIU e ZHU, 2004; ALLEN *et al.*, 2012).

Regiões com padrões urbanos homogêneos refletem aspectos culturais e econômicos locais (REGO *et al.*, 2020; Cruz Moscarelli *et al.*, 2020; Kent *et al.*, 2023). A classificação do desenho viário, segundo Barros *et al.* (2013), inclui malha regular, irregular e contemporânea. A malha regular, com cruzamentos em forma de "X" e quarteirões uniformes, maximiza a conectividade e a eficiência urbana, contribuindo para a criação de cidades sustentáveis e resilientes. Essa estrutura favorece uma organização urbana mais eficiente e acessível, como demonstrado na Figura 3.2, aumentando os índices configuracionais e a funcionalidade do espaço urbano. Essa abordagem condensa o entendimento da Morfologia Urbana como um elemento central na concepção de cidades sustentáveis e resilientes, refletindo tanto na vida cotidiana dos habitantes quanto na eficiência dos serviços urbanos.

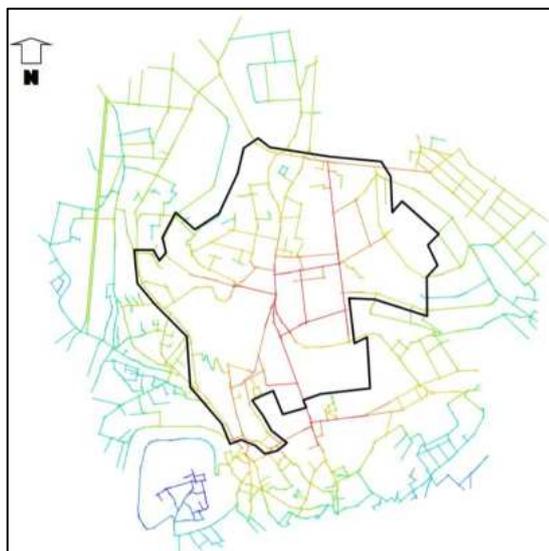
Figura 3.2 - Mapa Axial Rn de Campo de Ourique com entorno – escala não indicada.



Fonte: Barros *et al.* (2013).

Com relação à malha irregular, a rede viária tende a apresentar predominantemente cruzamentos em forma de ‘T’, seus quarteirões não apresentam regularidade, tamanho ou forma, as ruas podem ter diferentes larguras, curvas acentuadas e interseções que não formam ângulos regulares, como ilustrado na Figura 3.3. Em comparação a malha regular, a irregular apresenta algumas vantagens destacando-se sua eficiência para o tráfego de pedestres e ciclistas, oferecendo mais opções de rotas, porém, também podem ser mais difíceis de navegar e podem dificultar o acesso a certos locais.

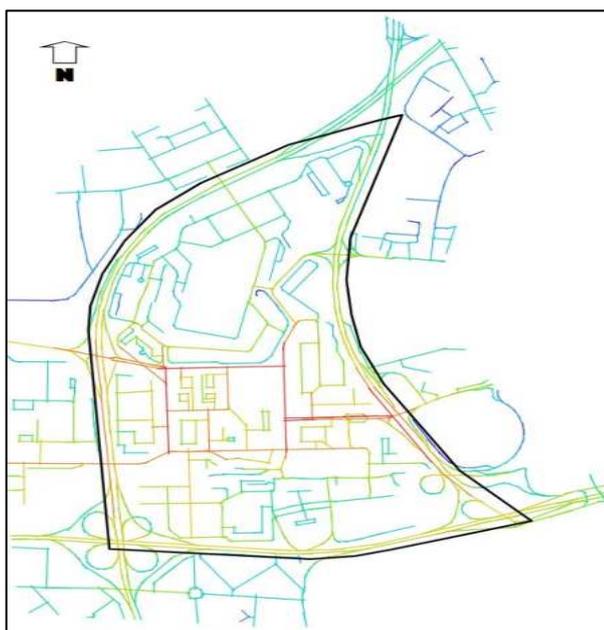
Figura 3.3 - Mapa Axial Rn da Graça com entorno – escala não indicada.



Fonte: Barros *et al.* (2013).

Quanto à malha contemporânea, percebe-se que não existe um padrão claramente definido, apresentando em alguns momentos um padrão regular e em outros uma aparência irregular “ordenada”. Além disso, como consequência da variação na sua forma, os cruzamentos são caracterizados e, “X” e em “T”, inclusive com frequente existência de quarteirões alongados, ainda sem regularidade de tamanho ou forma, como ilustrado na Figura 3.4.

Figura 3.4 - Mapa Axial Rn de Telheiras com entorno  
– escala não indicada.



Fonte: Barros *et al.* (2013).

Allen *et al.* (2012) destacam que o planejamento urbano enfrenta restrições no transporte de cargas, resultando em capacidades reduzidas e exigindo múltiplas viagens diárias devido a regulamentações e configuração viária inadequada. Essas condições forçam as transportadoras a priorizar vias principais e confiáveis, evitando áreas residenciais com restrições. Bakshi *et al.* (2019) acrescentam que vias estreitas, curvas acentuadas e infraestrutura inadequada impactam a distribuição de mercadorias, causando atrasos e custos adicionais.

Ferraz e Torres (2004) observam que a configuração da rede viária afeta o transporte e Hillier (2001) aponta que a localização de infraestruturas pode influenciar os custos de deslocamento. Essas características urbanas podem enfraquecer o desempenho social, ambiental e econômico (Kumar *et al.*, 2019). Esfeh *et al.* (2022) e Jun-qiang *et al.* (2018) destacam a importância de entender a rede de transportes para avaliar variações de desempenho, enquanto Vivek e Conner (2022) e Ganin *et al.* (2017) ressaltam a necessidade de sistemas de transporte resilientes frente às interrupções e vulnerabilidades.

### 3.2.4. Acessibilidade para o Transporte Urbano de Cargas e Análise da Vulnerabilidade

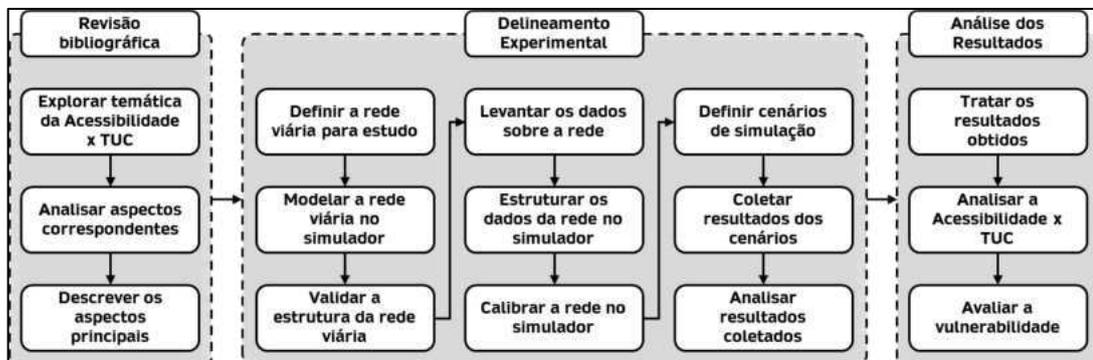
Berdica (2002) analisa a vulnerabilidade das redes de transporte, discutindo riscos de segurança e propondo melhorias por meio de modelos computacionais que avaliam infraestruturas críticas. Esfeh *et al.* (2022) afirmam que técnicas de análise de vulnerabilidade variam conforme a escala e impacto do evento disruptivo. Jenelius e Mattsson (2015) destacam a importância de uma análise tripla: fragilidades do cenário, probabilidade do evento e consequências.

O impacto total, desde a interrupção até a recuperação, é vital, pois infraestruturas vulneráveis podem exigir mais tempo para se recuperar devido à sua configuração e falta de alternativas. Estudos recentes, como os de Huang *et al.* (2015) e Gao *et al.* (2019), exploram a vulnerabilidade sob uma perspectiva topológica, considerando parâmetros como distância e acessibilidade. Garcia-Palomares *et al.* (2018) e Gu *et al.* (2020) analisam a vulnerabilidade com base na acessibilidade e na flexibilidade da rede.

## 3.3. METODOLOGIA

Com base nos elementos delimitados anteriormente, o presente estudo desenvolve uma proposta metodológica que abrange etapas direcionadoras das ações realizadas, aplicando-se quantitativa e qualitativamente na solução de problemas específicos. Explorando o fenômeno experimentalmente, utilizaram-se ferramentas computacionais para análise. O procedimento metodológico foi dividido em três etapas: revisão bibliográfica, delineamento experimental e análise dos resultados, sendo esta última crucial para o alcance dos objetivos propostos. O fluxograma correspondente à sequência de ações desenvolvidas é apresentado conforme Figura 3.5, seguido pela descrição detalhada de cada etapa.

Figura 3.5 - Fluxograma das etapas e ações do procedimento metodológico.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

### ***3.3.1. Revisão Bibliográfica***

Nesta etapa, o objetivo foi realizar uma pesquisa abrangente de estudos acadêmicos, incluindo artigos, dissertações, teses, livros e capítulos de livros relacionados à temática "Acessibilidade e Transporte Urbano de Cargas (TUC)". O propósito desse esforço era identificar características, aspectos e elementos relevantes para o planejamento e operações do transporte urbano de cargas no contexto da acessibilidade, bem como as maneiras pelas quais a acessibilidade afeta o TUC. Além disso, foram identificados aspectos que, embora não diretamente ligados à acessibilidade, poderiam influenciar o comportamento do TUC. Os principais resultados dessa pesquisa foram utilizados para construir o segundo capítulo deste trabalho.

### ***3.3.2. Delineamento Experimental***

A segunda etapa do procedimento metodológico desta pesquisa pode ser compreendida como a mais importante uma vez que busca traduzir em ações práticas as informações levantadas na etapa anterior de revisão bibliográfica. Essa segunda etapa foi dividida em três momentos, o primeiro corresponde às características da rede que apresentam similaridade com aquilo que foi apresentado e discutido na primeira etapa, isto é, no capítulo três.

#### ***3.3.2.1. Definição, modelagem e validação da rede viária objeto de estudo***

A rede viária definida como objeto de estudo desta pesquisa foi a cidade de Fortaleza, não em sua completude, uma vez que se entende que uma rede viária muito ampla, abrangente, não é o ideal para uma simulação microscópica quando sua principal finalidade é a leitura e interpretação de parâmetros e indicadores que podem auxiliar na avaliação do desempenho dos elementos viários e seus usuários de forma analítica (PAPADOPOULOU *et al.*, 2018). Por isso, foram definidas regiões da rede viária de Fortaleza que contemplaram duas características: (i) o desenho regular e irregular da rede viária; e (ii) regiões que apresentam limitações, ou restrições, à circulação de veículos de carga. Em relação à primeira característica avaliou-se inicialmente a proximidade entre regiões com formato regular e irregular, buscando aquelas que estão o mais próximas possível uma da outra, como pode ser visto na Figura 3.6 a seguir.

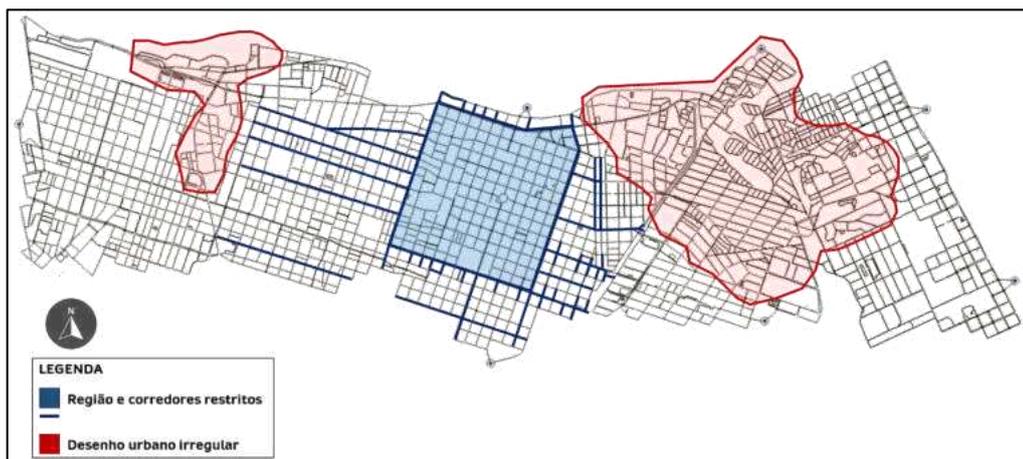
Figura 3.6 - Rede viária escolhida como objeto de estudo.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

Após definir a rede viária, modelamos a rede no AIMSUN®. Escolhemos essa ferramenta por duas razões principais: sua integração com o Open Street Map, facilitando a exportação da rede viária e seus elementos, e sua capacidade de realizar simulações macro, meso e microscópicas do tráfego, além de análises preditivas do desempenho da rede. Durante a modelagem, após exportar a rede para o AIMSUN®, identificamos regiões com características regulares e irregulares e determinamos quais vias devem ser restritas a veículos de carga, conforme a Portaria nº 83/2015 da AMC, como mostrado na Figura 3.7.

Figura 3.7 - Rede viária exportada do Open Street Map modelada no AIMSUN®.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

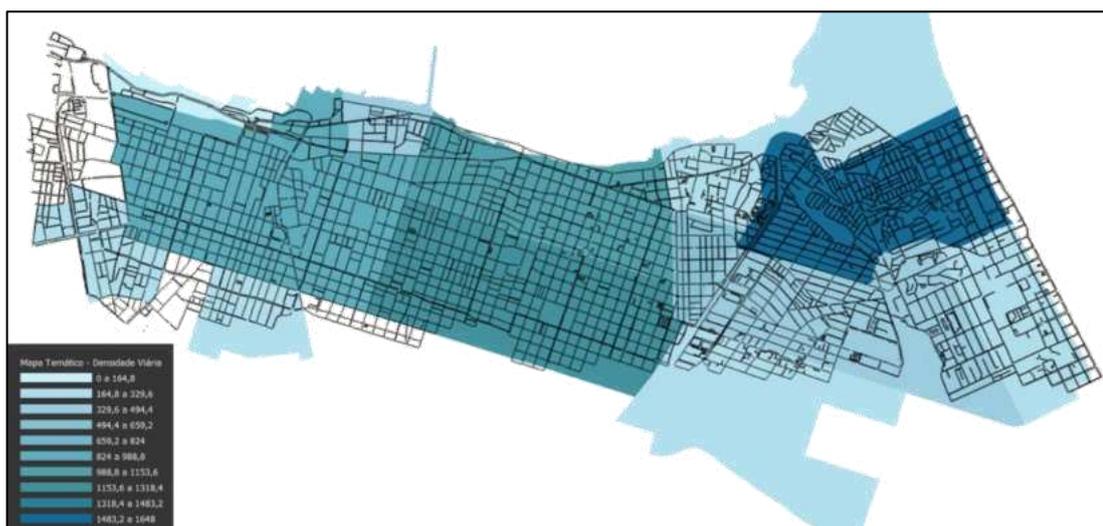
Após a modelagem da rede viária no simulador, realizou-se um processo de validação comparando as características estruturantes das vias ao exportar para o software AIMSUN® com os que foram

obtidos pelo Open Street Map. Analisou-se a velocidade média, número de faixas por pista, sentidos, e identificaram-se e corrigiram-se vias incompletas durante a exportação, ressaltando que a rede exportada não garantiu todas as informações e variações de parâmetros da estrutura, como qualidade superficial da via, geometria, grau de inclinação, e elementos urbanos como arquitetura, infraestrutura elétrica e hidráulica, arborização, e estacionamento para carga e descarga. Contudo, os elementos levantados com a exportação da rede pelo Open Street Map mostraram-se cruciais para a escolha de rotas de veículos de carga, interferindo no manuseio e no fluxo do tráfego.

### 3.3.2.2. *Levantamento, estruturação e validação dos dados sobre a rede viária objeto de estudo*

O levantamento inicial de dados dos bairros utilizou a pesquisa origem-destino (OD) de 2019 da Prefeitura de Fortaleza, parte do Plano de Acessibilidade Sustentável (PAS-For), para definir perfis logísticos. Foram analisados deslocamentos familiares, motivações, questões socioeconômicas e fluxo de cargas. Com essas informações, foram elaborados mapas temáticos no QGis®, destacando atividades predominantes, densidade populacional e renda média. Em seguida foram exportados para o AIMSUN®, em eu foram criados mapas de densidade viária, onde áreas menos densas são mais claras e áreas densas são mais escuras. Parâmetros espaciais como densidade viária e de conexões serão exemplificados, com detalhes adicionais no Apêndice A.

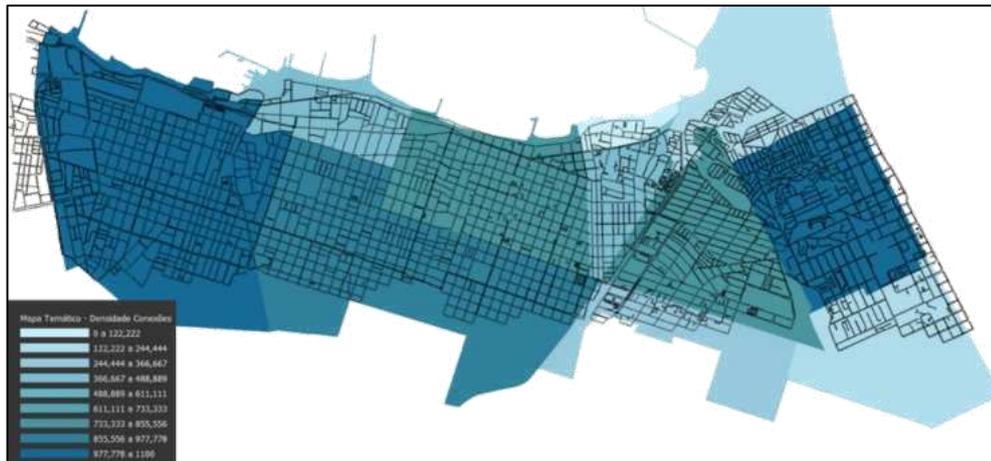
Figura 3.8 - Mapa temático da densidade viária através dos shapefiles exportados do QGis para o AIMSUN.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

Para a construção do mapa temático referente à densidade de conexões o processo realizado foi semelhante ao do executado anteriormente, em que as conexões das vias foram incorporadas às áreas dos bairros, e posteriormente inseridos no AIMSUN<sup>®</sup>. Desta forma, de acordo com a Figura 3.9, estão representadas a relação da quantidade de conexões viárias pela área de referência do bairro.

Figura 3.9 - Mapa temático da densidade de conexões.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

Com os mapas temáticos elaborados, conforme ilustrados acima e disponibilizados no Apêndice A desse documento, o segundo levanto de dados foi referente a construção dos perfis logísticos adicionando, aos dados já analisados, informações sobre a movimentação de cargas entre os bairros da rede em estudo. As características levantadas para essa análise foram compreendidas pela forma como a mercadoria era entregue ou recebida, isto é, se a carga é fracionada ou a granel, o tamanho dos produtos, e a frequência de movimentação de cargas entre as origens e destinos. Feito isso, foi realizada a classificação dos perfis logísticos de acordo com a intensidade de cada uma dessas características e parâmetros definidos a partir dos mapas temáticos produzidos, como pode ser visto na Tabela 3.1 a seguir.

Tabela 3.1 - Classificação dos perfis logísticos.

Características	Parâmetros	Centro	Aldeota	Meireles	Cais do Porto	Papicu	Praia do Futuro	Vicente Pinzon
Econômicas	Entrega do Produto (Expedição)	Fração	Fração	Fração	Fração	Fração	Fração	Granel
	Entrega do Produto (Recebimento)	Granel Fração	Granel	Granel	Granel	Granel	Granel	Granel
	Tamanho dos Produtos (Expedição)	Pequeno Médio	Pequeno Médio	Pequeno Médio	Médio	Pequeno Médio	Pequeno	Médio Grande
	Tamanho dos Produtos (Recebimento)	Médio Grande	Médio Grande	Pequeno Médio	Médio Grande	Pequeno Médio	Médio Grande	Pequeno Médio
	Frequência de Entrega	Alta	Baixa Média	Baixa Média	Média	Baixa	Baixa	Média
	Frequência de Recebimento	Alta	Média	Média	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa
	Densidade de Comércio	Alta	Média Alta	Média Alta	Baixa	Média	Média	Média
Demográficas	Densidade de Indústria	Baixa	Baixa	Baixa	Alta	Baixa	Baixa	Baixa
	Concentração Populacional	Média Alta	Alta	Alta	Média	Média Alta	Média	Média Alta
Sociais	Renda Média Familiar	Média	Alta	Média Alta	Baixa	Média	Média	Média
Infraestrutura/Acessibilidade Logística	Densidade Viária	Média Alta	Média Alta	Média Alta	Baixa	Média Alta	Média	Média Alta
	Conectividade	Baixa Média	Média Alta	Média Alta	Baixa	Média Alta	Média	Média Alta
	Uso do Solo (Comercial/Industrial)	Comercial	Comercial	Comercial	Industrial	Comercial	Comercial	Comercial

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

O terceiro levantamento de dados envolveu a elaboração das matrizes OD de viagens de carros e caminhões. Para a matriz de carros, foram utilizados dados da "Pesquisa OD pessoas" da PAS-For, filtrando zonas de tráfego e tipos de veículos (carros particulares, aplicativos, táxis e auto). A matriz de caminhões foi construída com dados da "Pesquisa OD de cargas", filtrando zonas de tráfego e tipos de veículos (VUC e caminhões). As matrizes OD, apresentadas nas Tabelas 3.2 e 3.3, mostram o número diário de viagens para cada tipo de veículo e foram inseridas no AIMSUN® para análise no simulador.

Tabela 3.2 - Matriz OD Carros.

Matriz OD carros	Centro	Aldeota	Meireles	Cais do Porto	Papicu	Praia do Futuro	Vicente Pinzon
Centro	0	785	556	487	612	983	852
Aldeota	1457	0	3656	4719	5121	854	631
Meireles	1475	3207	0	2110	1555	2648	1188
Cais do Porto	6547	3341	1869	0	3271	5333	2291
Papicu	1231	3307	1296	1599	0	4490	9500
Praia do Futuro	1408	2311	1236	3289	5444	0	5784
Vicente Pinzon	3966	2987	1703	1633	5832	7715	0

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

Tabela 3.3 - Matriz OD Caminhão.

Matriz OD caminhão	Centro	Aldeota	Meireles	Cais do Porto	Papicu	Praia do Futuro	Vicente Pinzon
Centro	0	21	7	17	0	0	33
Aldeota	13	0	0	0	0	12	46
Meireles	3	0	0	0	0	0	6
Cais do Porto	14	8	0	0	0	12	15
Papicu	0	0	0	0	0	13	21
Praia do Futuro	0	0	0	0	0	0	17
Vicente Pinzon	29	11	9	0	0	0	0

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

Na estruturação dos dados para o simulador, foram usadas as matrizes OD e parâmetros como capacidade das vias, velocidade média, largura das faixas e tipo de via, importados do Open Street Maps para o AIMSUN®, eliminando a necessidade de ajustes. O fluxo médio de 1400 veículos por hora, conforme Lacerda (2016), Araújo (2016) e Martín (2018), foi adotado para Fortaleza, porém, em algumas vias houve uma rápida saturação necessitando de uma reformulação do fluxo, que resultou em média, em uma utilização de aproximadamente 80% dessa capacidade inicialmente ofertada. A calibração do AIMSUN® envolveu ajustar modelos de comportamento dos motoristas, incluindo car-following, lane-changing e gap-acceptance.

A preparação da rede consistiu em ajustar suas características à realidade, como velocidade da via, número de faixas e capacidade, enquanto a modificação dos parâmetros comportamentais dos veículos envolveu ajustes em velocidade, distância entre veículos, e mudança de faixa. Não foram encontrados estudos na literatura sobre calibração para veículos pesados em Fortaleza, o que pode comprometer a precisão dos resultados, como alertado por Pank e Kwak (2010).

### 3.3.2.3. Definição, coleta e análise de resultados dos cenários simulados

Na segunda etapa, foram definidos três cenários para simulação, com o objetivo de avaliar a acessibilidade de uma rede real diante de vulnerabilidades. O primeiro cenário simulou a rede sem interrupções, operando normalmente e considerando impedâncias para veículos de carga. No segundo, dois links críticos foram identificados—um em área regular e outro em área irregular—para analisar o impacto das interrupções antes e depois dos elementos viários selecionados.

O terceiro cenário aplicou interrupções simultâneas nos dois links críticos, para verificar o impacto global, dada a alta probabilidade de eventos disruptivos múltiplos. A escolha dos links considerou a quantidade de rotas alternativas e o fluxo de veículos, especialmente de carga. Foram realizadas 10 simulações com sementes aleatórias, cada uma com duração de oito horas, referente ao horário comercial, aquecimento de 30 minutos e coleta de dados a cada 10 minutos. Utilizou-se o algoritmo “K-SP” do AIMSUN® para calcular

rotas e o A-Star (ou A\*) para selecionar caminhos críticos, ajustando custos conforme o volume e tipo de veículos na rede.

Assim, se a penalidade definida pelo usuário para o turno  $t$  que pertence ao link for levada em conta, o custo das iniciais K do link  $j$ ,  $IniKCost_j$  é calculado da seguinte forma:

$$IniKCost_j = SectionVDF_j + TurningPenalty_j + T \times UserDefCost_s \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

$SectionVDF_j$  = é o atraso estimado da seção  $s$  no link  $j$  em segundos considerando o fluxo atribuído:

$$SectionVDF_j = \frac{60}{Speed_s} Lenght_s \times \max\{a, b\} + 0,12(1 + 10VCRatio - 40,5VCRatio^2 + 10VCRatio^3) \quad (\text{Equação 02})$$

Onde:

$$a = 258VCRatio + 2,015;$$

$$b = 1 + 2,5VCRatio - 8VCRatio^2 + 10VCRatio^3;$$

$Lenght_j$  = comprimento;

$Speed_s$  = Velocidade na seção  $s$  que pertence ao link  $j$ ;

$VCRatio$  = Volume atribuído no link  $j$  dividido pela atratividade do link  $j$ ;

$TurningPenalty_j$  = É a penalidade da curva  $t$  no link  $j$  em segundos, considerando a velocidade de curva da seguinte forma:

$$Factor = \begin{cases} 360 & turningspeed \leq 10km/h \\ 240 & 10km/h < turningspeed < 20km/h \\ 144 & 20km/h < turningspeed < 30km/h \\ 102,6 & 30km/h < turningspeed < 40km/h \\ 72 & 10km/h < turningspeed \end{cases}$$

$T$  = É um parâmetro de peso de custo definido pelo usuário que permite ao usuário controlar a influência do custo definido pelo usuário sobre o custo.

$UserDefCost_s$  = É o custo definido pelo usuário da seção  $s$ , que pertence ao link  $j$ .

Neste estudo, devido à ausência de medições diretas dos parâmetros de alimentação da rede no local, o valor adotado para "T" foi fixado em 1, indicando a ausência de um peso específico para os custos das viagens dos usuários em cada turno. Assim, a variação inerente ao processo é exclusivamente derivada da dinâmica da simulação, onde os aspectos negativos de cada parâmetro influenciam naturalmente nas decisões de roteamento. Em outras palavras, variações como quedas de velocidade, aumento do tempo de viagem ou intensificação do fluxo têm igual impacto na percepção do custo total de viagem para o usuário simulado, independentemente do critério considerado. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 3.5 do apêndice,

que mostra os links selecionados pelas rotas OD de acordo com os critérios estabelecidos. Além disso, para limitar a quantidade de dados gerados e evitar informações desnecessárias, foi estabelecido um ponto de corte de fluxo igual ou superior a 900 veículos por hora na seleção desses links. Com base nesses resultados, os dados foram analisados até identificar os dois links mais representativos conforme definido na Tabela 3.4.

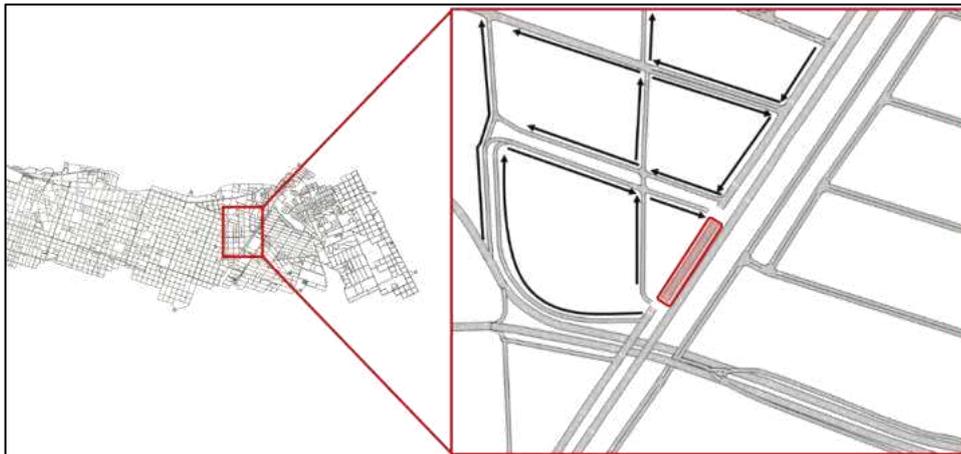
Tabela 3.4 - Links críticos selecionados.

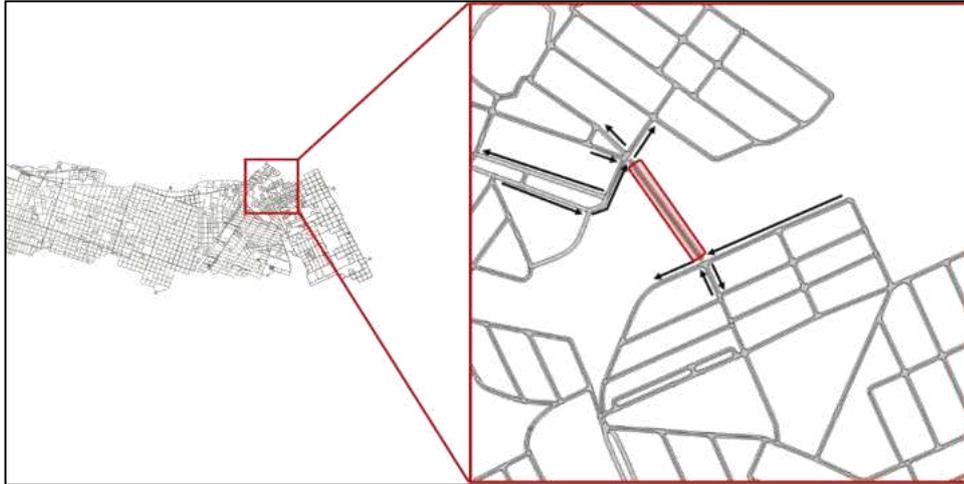
Link	11117									
Par OD	01-05	01-06	01-07	02-05	02-06	05-01	05-02	05-04	06-01	06-02
Fluxo Médio	1563	1711	1742	1760	1709	1693	1647	1633	1508	1500
Desvio Padrão	110	93	163	140	146	192	187	137	144	90
Link	7383									
Par OD	05-01	05-02	05-03	05-04	05-06	05-07	06-03	06-05	07-03	07-05
Fluxo Médio	1529	1706	1560	1573	1620	1521	1777	1567	1600	1527
Desvio Padrão	190	98	180	170	121	172	105	146	146	216

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

A seguir, as ilustrações apresentam na rede quais foram os links definidos como críticos, escolhidos para serem interrompidos e para a construção do segundo cenário que foi simulado em dois momentos diferentes. No primeiro momento interrompeu-se o link crítico da rede regular, e no segundo momento o link crítico da rede irregular foi interrompido, como pode ser visto na Figura 3.10, respectivamente.

Figura 3.10 - Ponto de interrupção do link 11117, área regular.





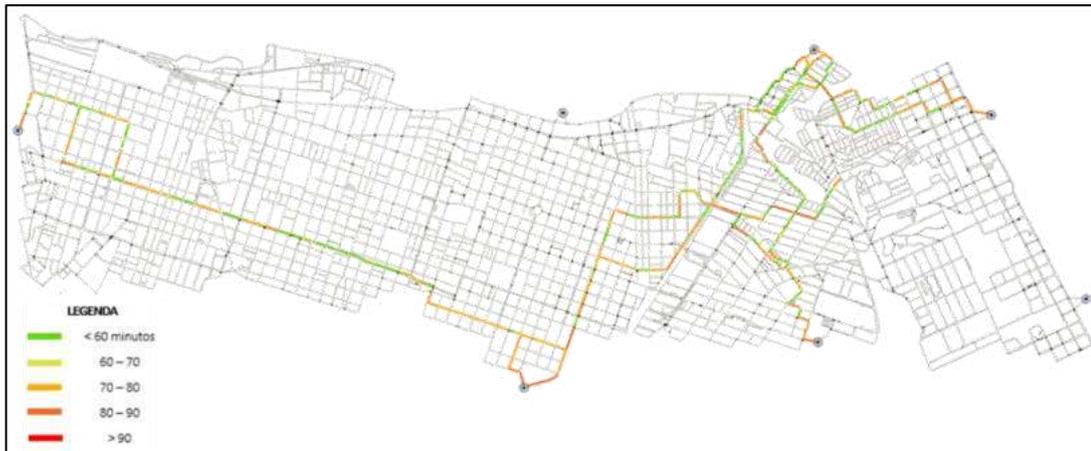
Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

Com as informações necessárias, iniciou-se a coleta de dados para análise da acessibilidade, incluindo tempo de viagem, tempo de atraso e velocidade média. Simulou-se três cenários e os resultados foram registrados como médias e desvios padrão da rede para cada semente gerada, considerando apenas os caminhões. Os dados foram tabulados em uma planilha Excel®, calculando-se a média aritmética. A cada duas horas de simulação, foram capturadas imagens da rede para monitorar o nível de serviço. Na carta de controle, o Limite Central Inferior (LCI) para tempo de viagem e atraso foi baseado nos valores de fluxo livre da rede, e para velocidade, utilizou-se a menor velocidade de projeto (40 km/h). O Limite Central Superior (LCS) foi definido com base no carregamento normal da via, considerando o valor máximo de pico. Concluiu-se a análise dos dados e a segunda etapa do procedimento metodológico, avaliando a acessibilidade em situações de anormalidade.

### 3.3.3. Análise dos resultados

Após realizar as simulações para os três cenários descritos anteriormente, os resultados foram organizados em uma planilha Excel®, separados por parâmetros e tipo de veículo. A primeira simulação foi conduzida sob condições normais de rede, com foco inicial no parâmetro Tempo de Viagem, essencial para a acessibilidade. A Figura 3.11 ilustra essa medição ao longo das oito horas de simulação para caminhões. Além disso, resultados visuais, como mapas e gráficos de controle relacionados à velocidade média, fluxo e tempo de atraso, estão disponíveis no Apêndice C. A seguir, serão discutidos os resultados dos parâmetros de Tempo de Viagem, tanto para a rede normal quanto para a simulação com interrupção do link crítico.

Figura 3.1 - Parâmetro Tempo de Viagem (minutos). Rede em condição normal. Intervalo: 14:00 às 16:00.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

Diversos intervalos de simulação permitiram observar comportamentos distintos do tempo de viagem em pontos específicos da rede, esse fenômeno ocorreu devido ao carregamento das vias em que ao alcançarem a saturação, redirecionaram o fluxo para otimizar as viagens entre os pares OD, conforme ilustrado na Figura 3.36 no apêndice. Para caminhões, a rede regular apresentou maior instabilidade no tempo de viagem, especialmente nas proximidades dos corredores restritos, já que grande parte das viagens desses veículos direcionou-se ao Centro, e a zona de impedância localizada nesse trajeto concentrou os caminhões nessas áreas, impactando diretamente o fluxo local. Ao simular interrupções de links conforme definido anteriormente, observou-se que as mudanças na rede afetaram diferentemente os usuários, onde na Figura 3.12 ilustram-se, mas edições desse parâmetro com base na interrupção de um link na região regular da rede, e no apêndice, na Figura 3.37, encontram-se medições adicionais realizadas em outros intervalos de tempo.

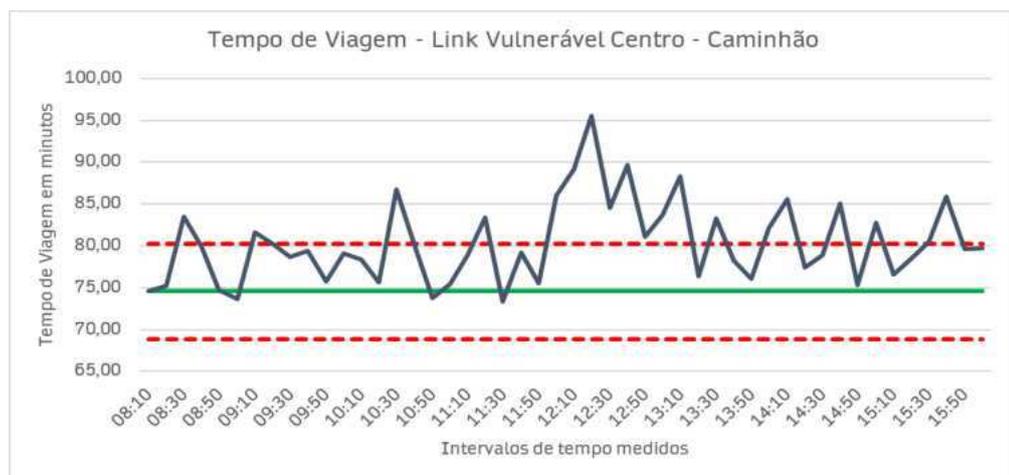
Figura 3.11 - Parâmetro Tempo de Viagem (minutos). Link Interrompido 11117. Intervalo: 14:00 às 16:00.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

Esse evento facilitou com que o fluxo fosse até melhor distribuído, ainda que o custo relacionado à distância fosse um pouco maior no segundo momento do que no primeiro, onde neste a prioridade foi escolher o caminho mais curto quando considerada as condições de tráfego e de rede como estabelecido pelo algoritmo A-Star (A\*). Uma simples mudança na rede não se apresentou “favorável”, para otimizar a viagem, considerando que a interrupção aconteceu em um local próximo à zona de restrição, uma gama maior de rotas alternativas foi visitada apresentando pouca consistência pelo rápido carregamento e, conseqüentemente, saturação dessas vias. Além disso, com essa nova combinação (interrupção + restrição), algumas vias escolhidas permaneceram carregadas por mais tempo que o comum, se comparadas a simulação da rede em condições normais. Para compreender melhor o comportamento desse parâmetro nas oito horas de simulação, a Figura 3.12 ilustra o gráfico referente à carta de controle onde é possível acompanhar a série temporal das medições realizadas para o caminhão, adotando os limites, superior e inferior, descritos anteriormente.

Figura 3.12 - Gráfico de Controle. Parâmetro Tempo de Viagem (minutos). Link interrompido 11117.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

Na análise da evolução do parâmetro, conforme mostrado na Figura 3.37, observa-se uma queda significativa de desempenho, elevando em tempo de viagem médio de 75 minutos na rede para, aproximadamente, 92 minutos, sendo essa queda mais perceptível nas proximidades do link interrompido. Em pelo menos 6 das 10 replicações realizadas, os períodos das 11:00 às 14:00 apresentaram o parâmetro tempo de viagem mais acentuado, correspondendo a um custo aproximadamente 1,95 vez maior que a média observada, conforme pode ser visto na tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Desvio padrão e média das 10 replicações para os tempos de viagem por intervalos para o veículo caminhão com a interrupção do link 11117.

<b>Intervalo</b>	8:10	8:20	8:30	8:40	8:50	9:00	9:10	9:20	9:30	9:40	9:50	10:00
<b>Tempo de viagem</b>	82,2	75,3	83,5	80,0	74,8	73,7	81,6	80,3	78,7	79,4	75,8	79,1
<b>Desvio Padrão</b>	5,32	9,25	9,14	7,19	6,20	5,10	6,13	8,15	9,16	7,12	6,17	9,11
<b>Intervalo</b>	10:10	10:20	10:30	10:40	10:50	11:00	11:10	11:20	11:30	11:40	11:50	12:00
<b>Tempo de viagem</b>	78,4	75,7	86,7	80,0	73,8	75,4	78,9	83,5	73,3	79,2	89,5	95,2
<b>Desvio Padrão</b>	10,21	5,22	8,22	7,28	5,19	10,23	7,20	9,17	7,18	10,11	6,28	10,32
<b>Intervalo</b>	12:10	12:20	12:30	12:40	12:50	13:00	13:10	13:20	13:30	13:40	13:50	14:00
<b>Tempo de viagem</b>	95,2	90,0	93,1	95,4	98,3	91,3	88,4	76,4	83,3	78,3	76,1	82,1
<b>Desvio Padrão</b>	10,29	10,25	7,30	9,28	9,31	8,34	9,29	7,22	10,20	10,24	10,17	8,13
<b>Intervalo</b>	14:10	14:20	14:30	14:40	14:50	15:00	15:10	15:20	15:30	15:40	15:50	16:00
<b>Tempo de viagem</b>	85,6	77,5	79,0	85,1	75,3	82,8	76,6	78,5	80,4	86,0	79,7	79,7
<b>Desvio Padrão</b>	9,14	5,10	8,17	5,15	5,13	6,10	10,11	10,15	5,19	9,14	9,21	9,18

Fonte: Autor (2024).

Entre 11:50 e 14:00, os tempos de viagem dos caminhões variaram de 76,1 a 98,3 minutos, com desvios padrão entre 6,28 e 10,32 minutos. Notou-se um aumento no tempo de viagem e no desvio padrão entre 11:50 e 12:00, possivelmente devido a congestionamentos. Entre 12:10 e 13:30, os tempos de viagem diminuíram, com desvios padrão flutuantes, indicando mudanças nas condições de tráfego. Após 13:40, o tempo estabilizou entre 76,1 e 82,1 minutos, com desvios padrão mais consistentes, sugerindo uma sensibilidade elevada dos caminhões à rede. A velocidade média dos caminhões varia conforme a estrutura da rede; áreas irregulares reduzem a velocidade, enquanto zonas de restrição podem aumentá-la temporariamente. Interrupções causam quedas significativas na velocidade, especialmente em pontos críticos, afetando a escolha de rotas e a sobrecarga. A rede irregular continua impactando negativamente a performance dos caminhões.

Figura 3.13 - Gráfico de Controle. Parâmetro Velocidade (km/h). Link interrompido 11117.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

A análise dos dados de velocidade dos caminhões revelou uma média de 45,25 km/h, com um desvio padrão de 2,61 km/h. A velocidade mínima registrada foi de 37,75 km/h e a máxima de 51,54 km/h. O horário de pico, com a maior velocidade média, foi às 11:00, enquanto o horário for a de pico foi às 12:00. A distribuição da velocidade é aproximadamente normal, com um p-valor de 0,2999. A correlação entre velocidade e desvio padrão é levemente negativa (-0,12), indicando que velocidades mais altas tendem a ter menor variabilidade. A partir do mesmo horário, percebe-se uma oscilação brusca na medição do parâmetro Velocidade, isso pode ter sido resultante também desse carregamento excessivo da rede a partir desse horário específico. Outro aspecto é que, desde o início da simulação a medição do parâmetro oscila sempre entre a média e o limite inferior até esse determinado momento, em que a velocidade cai sinuosamente para abaixo desse limite sinalizando uma leve recuperação, mas ainda com bastante oscilação. Na Figura 3.14, é apresentado o gráfico em relação ao fluxo de entrada da rede o que pode ser o principal motivador dessa oscilação no parâmetro de Velocidade.

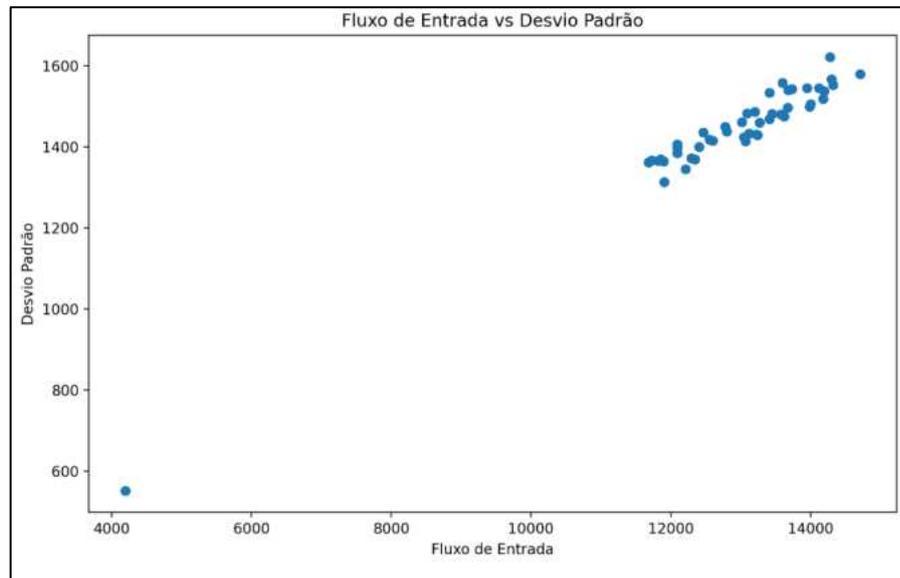
Figura 3.14 - Série temporal fluxo de entrada (veic/h) com link interrompido 11117.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

A interrupção de um link em uma rede viária urbana pode ser analisada através do comportamento do fluxo de entrada, conforme evidenciado pelos dados analisados. O fluxo de entrada médio é de aproximadamente 12.917 unidades, com uma variabilidade significativa, indicada por um desvio padrão de cerca de 1.526 unidades. Essa variabilidade sugere que o fluxo de entrada não é constante, mas sim sujeito a flutuações ao longo do tempo. A forte correlação positiva entre o fluxo de entrada e o desvio padrão (0,9790), como pode ser visto na figura 3.15 a seguir, o que indica que, à medida que o fluxo aumenta, a variabilidade também tende a aumentar. Isso pode ser interpretado como uma resposta a mudanças na rede viária, como a interrupção de um link, que pode causar congestionamentos e desviar o tráfego para outras rotas, aumentando assim o fluxo e a variabilidade nessas rotas alternativas.

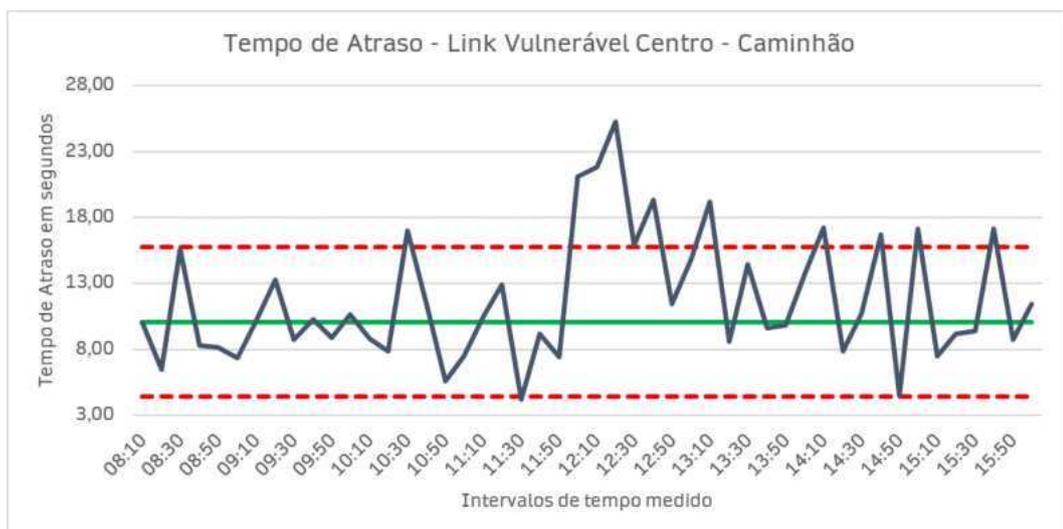
Figura 3. 15 - Gráfico de dispersão do fluxo de entrada com a interrupção no link 11117.



Fonte: Autor (2024).

Esse carregamento pode ter afetado diretamente as viagens dos caminhões e que, por isso, apresentaram uma significância maior em relação aos carros na tangente à redução do desempenho do parâmetro, principalmente na rede irregular, como pode ser visto também na Figura 3.39, no apêndice. Na Figura 3.16, é apresentada uma oscilação mais acentuada, inclusive apresentando valores fora do limite superior, isto é, um atraso maior do que o estimado

Figura 3.16 - Gráfico de Controle. Parâmetro Tempo de Atraso Simulado (segundos). Link Interrompido 11117.

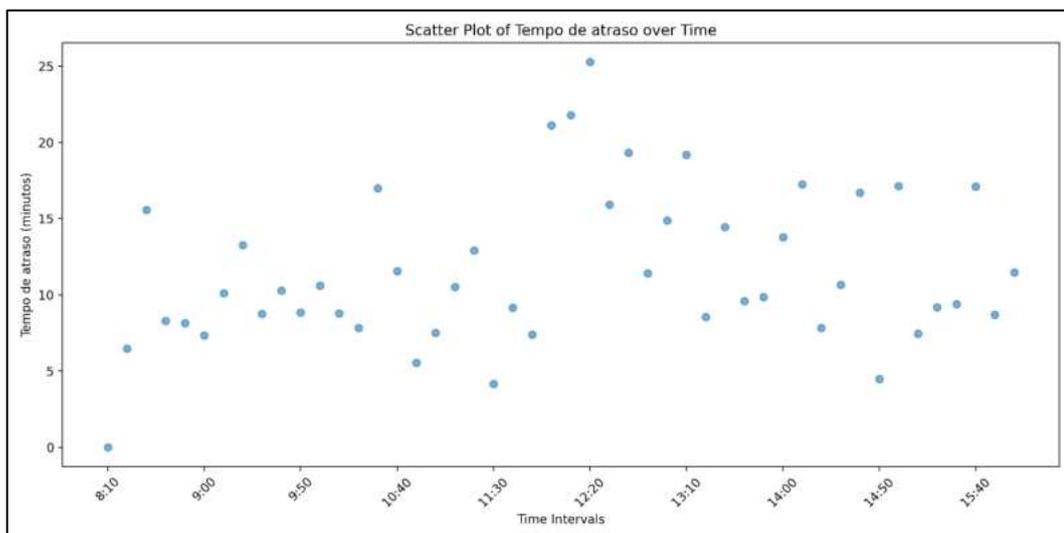


Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

A análise contínua ao longo das oito horas, ilustrada na Figura 3.40 do apêndice, apresentaram um aumento médio de 48,7% no tempo de viagem, em pelo menos 4 das 10 replicações, especialmente próximo à transição entre áreas regulares e irregulares da rede, superando os efeitos observados nas interrupções em áreas regulares. Os gráficos de controle, apresentados na Figura 3.17, corroboram esses resultados, destacando as alterações significativas no parâmetro de Tempo de Viagem decorrentes da interrupção do link na região irregular da rede. A análise dos dados do "Tempo de atraso" revela vários *insights*. O tempo médio de atraso é de aproximadamente 11,52 minutos, com desvio padrão de 5,07 minutos, indicando variabilidade nos tempos de atraso. A correlação entre o tempo de atraso e o desvio padrão é de 0,18, sugerindo uma relação positiva fraca.

Os resultados do teste t de uma amostra mostram uma estatística t de 15,76 com um valor de p de 0,05, indicando que o tempo médio de atraso é significativamente diferente de zero. O gráfico de caixa e o gráfico de dispersão fornecem *insights* visuais sobre a distribuição e as tendências dos tempos de atraso nos intervalos. O gráfico de dispersão mostra flutuações nos tempos de atraso, com alguns intervalos experimentando atrasos maiores, conforme pode ser visto na figura 3.17 a seguir.

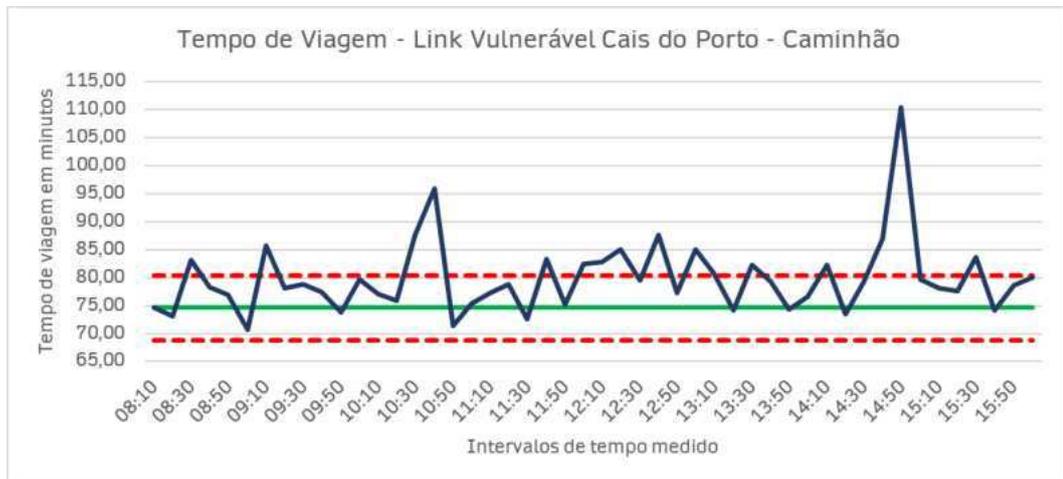
Figura 3. 17 – Gráfico de dispersão sobre a o tempo de atraso para o caminhão com o link 11117 interrompido.



Fonte: Autor (2024).

Esses resultados podem ajudar a entender o parâmetro de atraso para caminhões em uma rede viária vulnerável. A variabilidade e o atraso médio significativo destacam a necessidade de estratégias para mitigar atrasos, como otimizar o fluxo de tráfego ou melhorar a infraestrutura. Compreender esses padrões pode ajudar no planejamento e na tomada de decisões para aumentar a eficiência da rede rodoviária.

Figura 3.18 - Gráfico de Controle. Parâmetro Tempo de Viagem (minutos). Link Interrompido 7383. Tipo de veículo: Caminhão.,



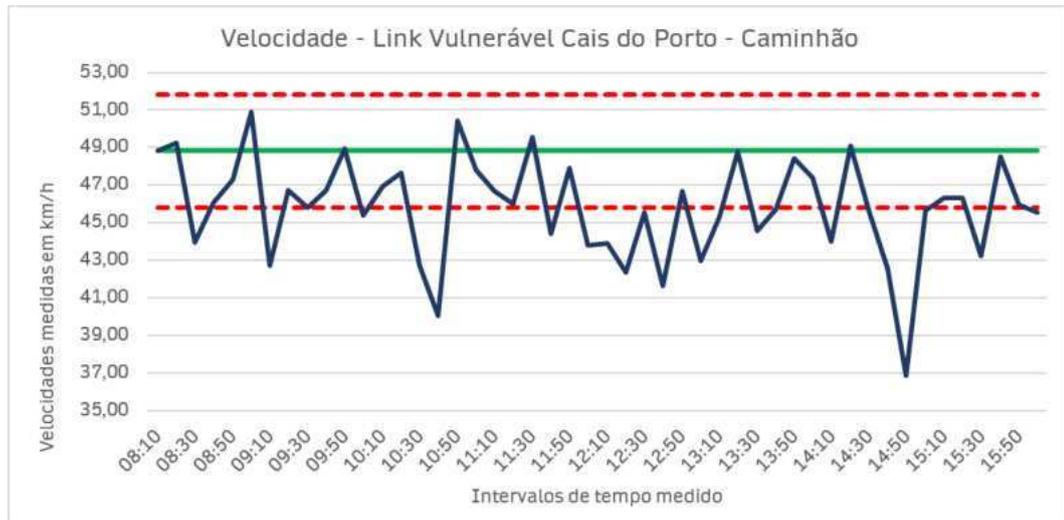
Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

A análise dos tempos de viagem dos caminhões em uma malha viária urbana revela uma média de 75,11 minutos e um desvio padrão de 2,03 minutos. A distribuição é levemente inclinada à direita, com uma assimetria de 1,19, e apresenta kurtose positiva (1,94), indicando uma distribuição leptocúrtica. O teste de Shapiro-Wilk ( $p < 0,05$ ) indica que os dados não seguem uma distribuição normal. A Figura 3.27 do Apêndice C ilustra o quarto intervalo medido para caminhões em uma área irregular. A análise dos tempos de viagem oferece *insights* valiosos para o planejamento urbano. O tempo médio de viagem é de aproximadamente 75 minutos, com uma distribuição assimétrica à direita e uma kurtose positiva, sugerindo que, embora a maioria das viagens ocorra em intervalos previsíveis, há casos de tempos significativamente mais longos, possivelmente devido a congestionamentos ou interrupções.

Identificar padrões de tempo ao longo do dia, como mostrado em gráficos de séries temporais, permite que gestores detectem períodos de pico e planejem intervenções para reduzir congestionamentos. A análise de outliers ajuda a identificar eventos excepcionais, como acidentes ou obras, que afetam a fluidez do tráfego. A não normalidade dos dados sugere que métodos estatísticos robustos devem ser utilizados para modelar e prever tempos de viagem, ao invés de depender apenas de médias simples. Isso é crucial para o planejamento de rotas e alocação de recursos, permitindo decisões baseadas em uma compreensão mais completa das variabilidades e incertezas da rede viária.

Essas análises fornecem uma base sólida para decisões informadas, ajudando gestores a desenvolver estratégias para melhorar a resiliência e eficiência da rede viária. O bloqueio de um link afetou significativamente a área adjacente, reduzindo o fluxo e impactando regiões próximas. As Figuras 3.40 e 3.28 no apêndice mostram a evolução dos parâmetros em diferentes intervalos, destacando a variabilidade e as áreas com piores índices, especialmente próximas à região irregular.

Figura 3.19 - Gráfico de Controle. Parâmetro Velocidade (km/h). Link Interrompido 7383.

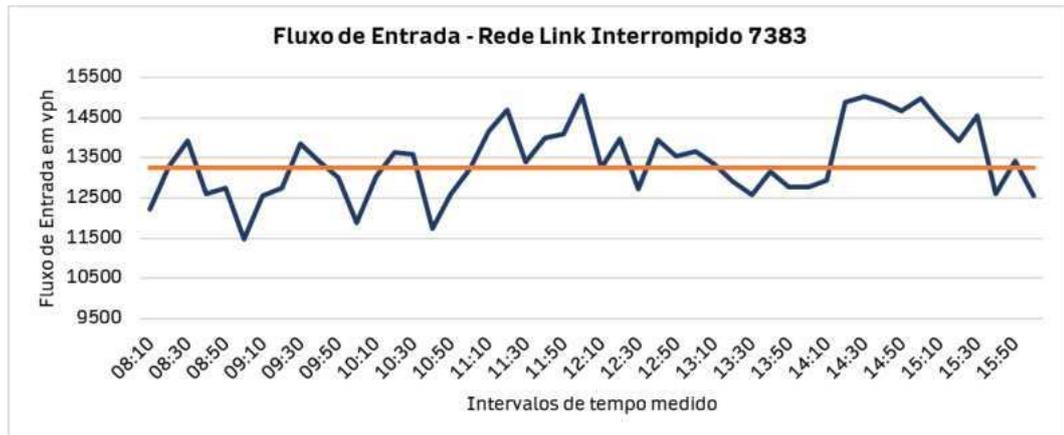


Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

As estatísticas descritivas revelam informações importantes sobre o tráfego de caminhões, com uma velocidade média de 46,38 km/h e um desvio padrão de 5,02 km/h. As velocidades variam entre 36,88 km/h e 75,05 km/h, e a mediana é de 45,99 km/h. Embora a distribuição das velocidades seja em geral concentrada, dois outliers foram identificados: uma velocidade média de 36,88 km/h às 14h40 e 75,05 km/h às 16h00. Esses valores atípicos podem indicar condições de tráfego anormais ou erros de medição, sugerindo a necessidade de investigação adicional.

O histograma da distribuição das velocidades médias mostra uma tendência aproximadamente normal, com uma leve assimetria positiva devido ao outlier de alta velocidade. Isso indica que, apesar das variações, o tráfego é em grande parte consistente. A análise temporal não revela um padrão claro de horários de pico, com flutuações ao longo do dia. A velocidade média de 46,38 km/h sugere uma operação razoavelmente eficiente da rede viária, mas a variação nas velocidades indica a necessidade de melhorar a consistência do fluxo, especialmente devido ao outlier de 36,88 km/h, que pode sinalizar gargalos temporários ou recorrentes. A causa desse pico mais baixo pode ser relacionado ao fluxo de entrada na rede que intensificou o carregamento das vias e reduziu o nível de serviço interferindo no desempenho desse parâmetro, como pode ser visto pela Figura 3.20.

Figura 3.20 - Série temporal Fluxo de entrada (veic/h) com link interrompido 7383.



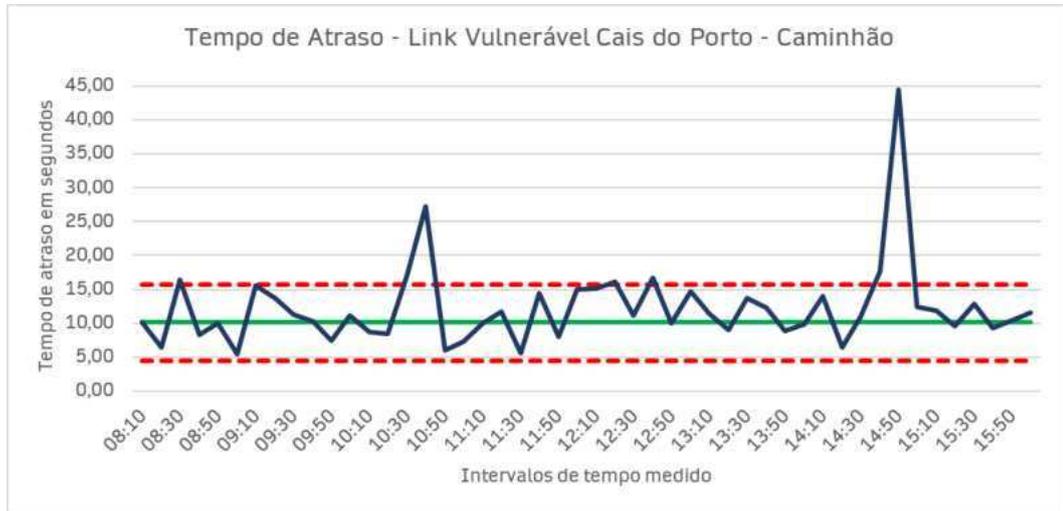
Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

A análise estatística do fluxo de entrada de veículos em uma rede viária com um link interrompido revelou padrões significativos de tráfego. O fluxo médio foi de cerca de 12.909 veículos, com uma mediana de 13.089 veículos, indicando uma distribuição relativamente simétrica. O desvio padrão de 1.496 veículos mostra uma variabilidade moderada, enquanto o coeficiente de variação de 11,6% confirma que a maioria dos valores está próxima da média.

O histograma exibiu uma leve assimetria com uma cauda à esquerda, sugerindo a presença de fluxos muito baixos em alguns intervalos. O boxplot destacou outliers abaixo de 10.000 veículos, possivelmente associados a eventos disruptivos ou congestionamentos severos devido à interrupção no link da rede. A análise temporal indicou uma variação cíclica no fluxo, com picos e vales bem definidos, possivelmente relacionados a horários de pico ou alterações na demanda de tráfego.

Em resumo, a interrupção do link causou flutuações no fluxo de veículos, com períodos de tráfego reduzido. Esses dados são essenciais para o planejamento de intervenções que minimizem o impacto de futuras interrupções e aprimorem a resiliência da rede viária. Gráficos de controle mostraram variabilidade significativa, com picos de desempenho excedendo o limite superior ao longo do experimento.

Figura 3.21 - Parâmetro Tempo de Atraso (segundos). Link Interrompido 7383. Intervalo 14:00 às 16:00.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

Na rede, foram identificados os locais onde o "Tempo de Atraso" apresentou os maiores picos, com maior variabilidade nos caminhões, especialmente na área irregular. Nessa área, a variação aproximou-se mais da média, mas com picos mais acentuados. Essa maior variação na área regular, em comparação com a irregular, pode ser atribuída à redistribuição do fluxo em links pouco utilizados da área irregular. Ao comparar os picos de fluxo com o "Tempo de Atraso", observou-se uma correlação. No último cenário simulado, foram incluídos simultaneamente dois links críticos na rede, analisando-se se os impactos se somariam ou sobreporiam, considerando as características distintas das regiões. A soma dos dois bloqueios resultou em um impacto significativo no desempenho dos parâmetros para os caminhões. As figuras no apêndice C detalham a evolução dos impactos das interrupções na rede ao longo dos três intervalos medidos.

Quanto à rede com duas interrupções, a análise estatística dos dados coletados sobre velocidade, tempo de viagem e tempo de atraso de caminhões em uma rede viária urbana vulnerável revelou *insights* valiosos sobre o comportamento desses parâmetros. A correlação fracamente negativa entre velocidade e tempo de viagem (-0,12) indica que, em geral, velocidades mais altas levam a tempos de viagem mais curtos. Isso sugere que melhorar o fluxo de tráfego e reduzir os congestionamentos pode ajudar a reduzir os tempos de viagem dos caminhões.

Por outro lado, a correlação fracamente positiva entre velocidade e tempo de atraso (0,23) indica que velocidades mais altas tendem a estar associadas a tempos de atraso mais longos. Isso pode ser devido ao fato de que velocidades mais altas aumentam o risco de acidentes e outros incidentes que podem causar atrasos. A distribuição aproximadamente normal dos dados sugere que a maioria dos valores está agrupada em torno

da média. No entanto, existem alguns valores discrepantes que indicam que podem ocorrer atrasos significativos em certas circunstâncias.

O teste t para amostras independentes revelou que a média da velocidade (46,23 km/h) é diferente da média do tempo de viagem (80,09 minutos). Isso confirma que a velocidade e o tempo de viagem são fatores distintos que influenciam o desempenho da rede viária. Esses resultados têm implicações importantes para o planejamento e gerenciamento de redes viárias vulneráveis. Ao compreender o comportamento desses parâmetros, os planejadores e gestores de tráfego podem tomar decisões informadas para melhorar a eficiência e a segurança da rede. Por exemplo, priorizar a melhoria do fluxo de tráfego pode ajudar a reduzir os congestionamentos e melhorar a velocidade. Gerenciar as velocidades é crucial, pois velocidades mais altas podem reduzir os tempos de viagem, mas também aumentar os tempos de atraso. Identificar e mitigar gargalos na rede viária também é essencial para melhorar o desempenho. Além disso, monitorar regularmente a velocidade, o tempo de viagem e o tempo de atraso pode ajudar a identificar tendências e tomar medidas proativas para melhorar a rede. Ao compreender e gerenciar esses parâmetros de forma eficaz, as redes viárias vulneráveis podem ser tomadas mais eficientes e seguras para todos os usuários.

### **3.4. Considerações finais**

Esta pesquisa investigou como as características da infraestrutura de transporte urbano afetam a acessibilidade para o transporte de mercadorias em áreas urbanas, destacando a escassez de estudos abrangentes sobre o tema em grandes centros urbanos. A análise enfatizou a influência das políticas públicas que restringem o acesso de veículos de carga a certas áreas e a avaliação dos perfis logísticos das diferentes regiões da rede viária urbana. Os resultados obtidos corroboram o estudo anterior discutido no primeiro produto desta pesquisa, sugerindo que redes viárias regulares tendem a manter um fluxo equilibrado mesmo após a interrupção de um link crítico, enquanto redes irregulares revelam vulnerabilidades significativas devido à distribuição desordenada do tráfego. Além disso, a pesquisa comparativa entre redes reais de formato regular e irregular demonstrou e reforçou essa discussão em que a estrutura regular da rede minimiza os impactos percebidos pelos usuários na escolha de rotas alternativas.

Este estudo também investigou áreas específicas com perfis logísticos semelhantes, mostrando que restrições à circulação de veículos de carga influenciam negativamente a acessibilidade e a eficiência das rotas alternativas disponíveis em regiões com infraestrutura irregular. Além disso, o esforço desempenhado nesta pesquisa abre uma nova discussão sobre como a configuração topológica das redes viárias urbanas pode influenciar a vulnerabilidade da rede de transportes e as escolhas de rotas que minimizam as emissões de CO<sub>2</sub>. Como dito, destaca-se que redes viárias regulares tendem a ser mais resilientes a interrupções, o que pode resultar em fluxos de tráfego mais eficientes e previsíveis, por outro lado, redes irregulares são mais vulneráveis

e podem exigir rotas alternativas menos eficientes, potencialmente aumentando as emissões de CO<sub>2</sub> devido a trajetos mais longos ou menos otimizados.

Por fim, esse esforço acrescenta ao cerne dessa discussão a importância de abordar as políticas públicas que considerem não apenas a eficiência logística, mas também os impactos ambientais, promovendo práticas sustentáveis no transporte urbano de cargas. E como políticas públicas, devem ser citadas a Agenda 2030 da ONU, com seus 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), na busca por promover um desenvolvimento global sustentável. Estudos e pesquisas sobre transporte de cargas são essenciais para alcançar essas metas, pois contribuem diretamente para a eficiência dos recursos (ODS 12) e a construção de cidades mais sustentáveis (ODS 11). Compreender as dinâmicas do transporte de mercadorias é crucial para o planejamento urbano e a gestão de infraestruturas viárias, melhorando a resiliência e sustentabilidade do sistema. Isso também ajuda a reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> nas áreas urbanas (ODS 13), apoiando a construção de uma infraestrutura mais verde e moderna (ODS 9). Ao alinhar essas pesquisas com os ODS, podemos desenvolver estratégias que promovam um crescimento econômico sustentável e a qualidade de vida nas cidades, beneficiando tanto as gerações atuais quanto futuras.

## 4. ANÁLISE DA INFLUÊNCIA VULNERABILIDADE DA REDE URBANA NA ACESSIBILIDADE DO TRANSPORTE URBANO DE CARGAS SOB A ÓTICA DA EMISSÃO DE CO<sub>2</sub>

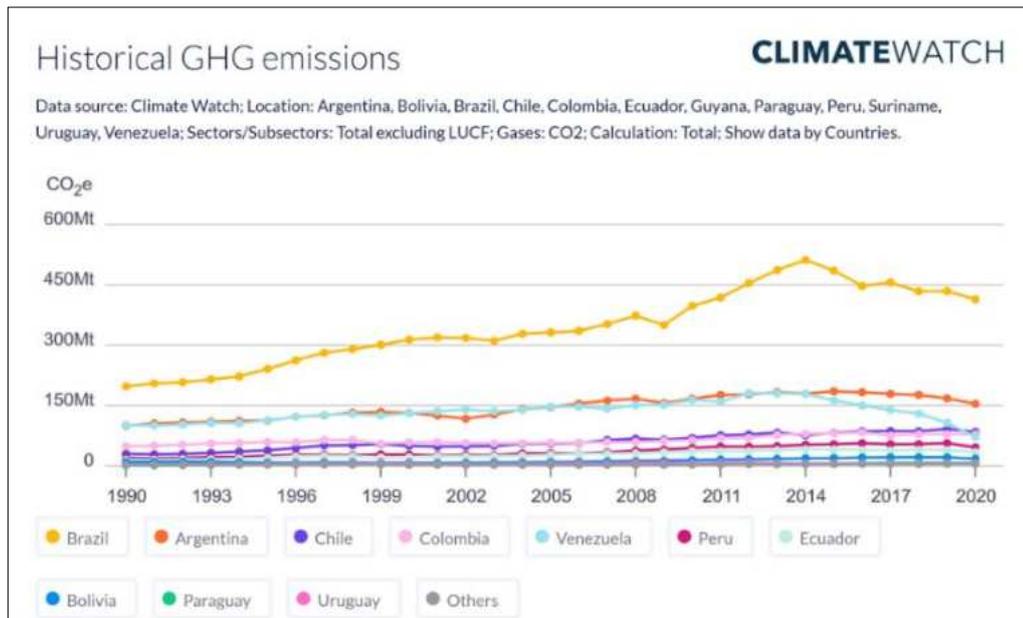
### RESUMO

O artigo discute o aumento das emissões de CO<sub>2</sub> no transporte urbano de cargas, com foco em países como o Brasil, onde essa atividade contribui significativamente para a poluição atmosférica e o aquecimento global. A demanda crescente por transporte de mercadorias, impulsionada pela globalização e a desigualdade na distribuição dos mercados, agrava essa situação, tornando crucial a análise das emissões. O estudo visa compreender como a vulnerabilidade da rede viária urbana afeta a acessibilidade no transporte de cargas, medida pelas emissões de CO<sub>2</sub>. Para isso, são simulados diferentes cenários de rede, a fim de entender como a escolha de rotas, influenciada pela vulnerabilidade, impacta os custos e as emissões de poluentes. A metodologia segue três etapas principais: (1) Revisão bibliográfica para embasamento teórico, (2) Delineamento experimental com a estruturação da área de estudo, e (3) Análise dos resultados com base em simulações computacionais. Foram avaliados cenários com redes regulares e irregulares, com e sem interrupção de um link crítico, para medir o impacto nas emissões e acessibilidade. Os resultados mostram que a vulnerabilidade da rede viária aumenta significativamente as emissões de CO<sub>2</sub> e os tempos de viagem. Redes mais vulneráveis e irregulares tendem a ser menos eficientes, resultando em maiores custos operacionais e emissões. O estudo conclui que otimizar as redes viárias urbanas, reduzindo suas vulnerabilidades, é essencial para minimizar as emissões de CO<sub>2</sub> e melhorar a eficiência do transporte de cargas, destacando a importância da resiliência da rede e da consideração de fatores como tempo de viagem e congestionamento.

### 4.1. Introdução

Nos últimos anos, a globalização da produção e a distribuição desigual dos mercados e recursos naturais aumentaram significativamente a demanda por transporte de mercadorias. Esse crescimento, aliado ao rápido desenvolvimento da indústria de transporte de carga, tem intensificado as preocupações ambientais, especialmente no que se refere ao consumo de energia, poluição do ar e emissões de gases de efeito estufa (GEE) (DEHDARI *et al.*, 2023). Para comparar os impactos dos GEE, utiliza-se a métrica de equivalente de CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>e). O transporte rodoviário contribui com 11,9% das emissões globais de CO<sub>2</sub>e, correspondendo a 5,88 gigatoneladas de CO<sub>2</sub> e 49,4 gigatoneladas de CO<sub>2</sub>e (GE e FRIEDRICH, 2020). No Brasil, as emissões de CO<sub>2</sub>e têm aumentado de forma alarmante desde 2010, colocando o país em uma posição de destaque negativo na América do Sul, apesar das medidas ambientais adotadas durante o período (WRI, 2020).

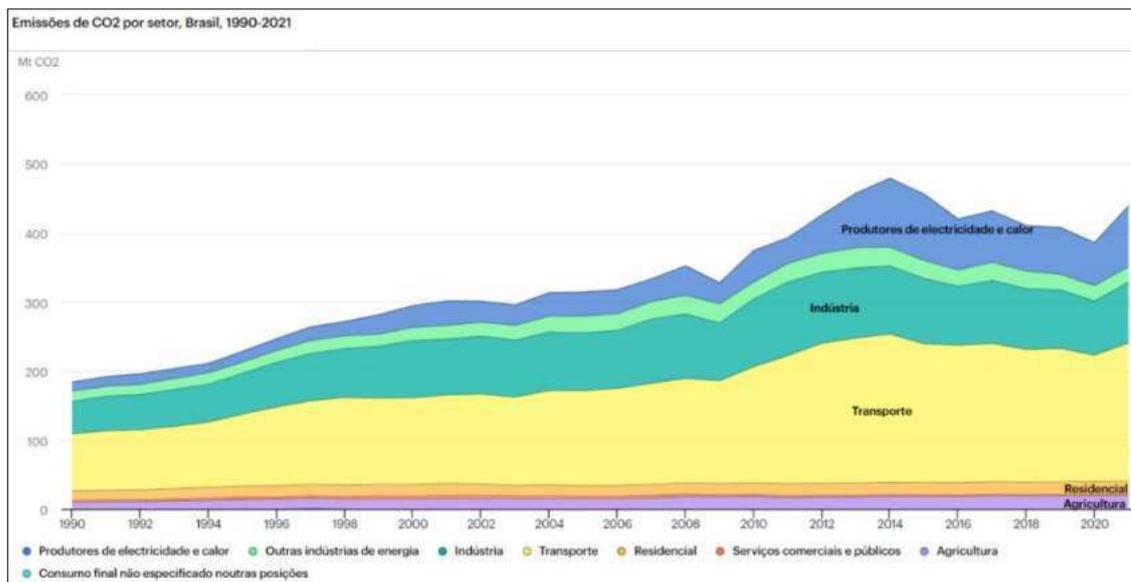
Figura 4.1 - Histórico Global de Emissões – Países da América Latina (1990 - 2020).



Fonte: WRI (2023).

Considerando o mesmo período em questão, segmentando essa análise por setor, especificamente o transporte, o Brasil lidera esse ranking com larga diferença em relação aos demais países da América do Sul, sendo esse responsável por emitir cerca de 60% a 70% de toda a emissão registrada para essa região (WRI, 2023). É possível notar também que no Brasil o setor de transporte é o que mais impacta na qualidade do ar se comparado aos demais setores que emitem CO<sub>2</sub>e, como pode ser visto na figura 4.2 a seguir.

Figura 4.2 - Emissão de CO<sub>2</sub>e, Brasil - Segmentado por setor energético.



Fonte: IEA (2023).

Estimativas das emissões de poluentes associadas ao transporte urbano de cargas enfrentam desafios comparáveis aos encontrados na determinação das rotas individuais e dos parâmetros de demanda desse tipo de transporte (MUÑUZURI *et al.*, 2018). Dado o amplo leque de oportunidades operacionais no transporte de mercadorias, o alcance dessas estimativas requer a utilização de hipóteses e simplificações substanciais, conforme observado em estudos prévios (ANAND *et al.*, 2021; MALIK *et al.*, 2019; YAN *et al.*, 2021).

Dablanc (2007) enfatiza que, devido à interatividade entre a movimentação de cargas em áreas urbanas e os sistemas multicomponentes envolvidos, analisar o desempenho dessa atividade é um grande desafio tanto para operadores quanto para planejadores urbanos. Assim, a formulação de soluções eficazes para o transporte urbano de mercadorias deve partir de uma análise abrangente do cenário atual, considerando todos os aspectos relevantes, com o objetivo de contribuir para a sustentabilidade econômica, social e ambiental da região (MUÑUZURI *et al.*, 2018).

Para aproximar essa análise de gestores e operadores, autores sugerem a modelagem de cenários que incluam variáveis como fluxo, velocidade média, tráfego, distância percorrida, inclinação, comportamento do condutor, congestionamento, tipo de motor e carga útil (NUZZOLO *et al.*, 2014; DEMIR *et al.*, 2014; ANDRIANKAJA *et al.*, 2015; MUÑUZURI *et al.*, 2018). No entanto, há limitações, já que dados específicos podem estar disponíveis apenas para certos veículos, enquanto outros dependem de médias aproximadas (YAN *et al.*, 2021).

Além disso, este trabalho vai diretamente ao encontro daquilo que se discute com a criação da Agenda 2030 da ONU, com seus 17 ODS, na busca por promover o desenvolvimento sustentável global. Os esforços acadêmicos sobre transporte de cargas são fundamentais para melhorar a eficiência de recursos (ODS 12) e a sustentabilidade urbana (ODS 11). Compreender as dinâmicas desse transporte é essencial para planejar e gerir infraestruturas viárias que aumentem a resiliência e reduzam emissões de CO<sub>2</sub> nas cidades (ODS 13). Alinhando essas pesquisas aos ODS, é possível promover um crescimento econômico sustentável e melhorar a qualidade de vida urbana, beneficiando as gerações atuais e futuras.

Este capítulo analisa o impacto da vulnerabilidade da rede na acessibilidade ao transporte urbano de cargas, medido pela emissão de CO<sub>2</sub>. Serão simulados dois cenários distintos, comparando redes viárias regular e irregular, para avaliar como a escolha de rotas, baseada na vulnerabilidade, afeta a percepção dos custos em termos de emissões de CO<sub>2</sub>.

## **4.2. O Transporte de Cargas e Emissões de CO<sub>2</sub>**

O transporte de carga tem um impacto substancial na qualidade do ar, principalmente devido à emissão de poluentes como partículas e óxidos de nitrogênio, que representam riscos à saúde humana

(Rymaniak *et al.*, 2021). A dispersão desses poluentes depende de fatores como as características locais, intensidade do tráfego, condições meteorológicas e fontes de poluição não relacionadas ao trânsito (Gable *et al.*, 2022). A urbanização crescente e o aumento do transporte têm piorado significativamente a qualidade do ar nas cidades, especialmente devido às emissões de veículos pesados movidos a diesel, contribuindo assim para o aquecimento global (Gilpin *et al.*, 2014).

A poluição gerada pelos veículos motorizados inclui substâncias prejudiciais como PM10, SO<sub>2</sub> e NO<sub>2</sub>, que provocam desde irritações menores até doenças crônicas e mortes prematuras. Estudos demonstram uma clara relação entre a poluição do ar nas áreas urbanas e problemas de saúde, evidenciando a necessidade urgente de estratégias eficazes para reduzir as emissões veiculares e melhorar a qualidade do ar (Ventura *et al.*, 2021).

A densidade dos receptores e das fontes de emissão também desempenha um papel crucial na determinação do impacto da poluição atmosférica. Fatores como características dos veículos, condições de condução, e aspectos ambientais e infraestruturais influenciam a dispersão dos poluentes (Xu *et al.*, 2019; Choromanski *et al.*, 2021; Yan *et al.*, 2021; Liu *et al.*, 2021; Mommens *et al.*, 2019). Em resposta, políticas públicas frequentemente adotam medidas restritivas à circulação de veículos de carga para reduzir congestionamentos e, conseqüentemente, as emissões de poluentes (Savadoغو *et al.*, 2023).

Entretanto, essas medidas podem transferir o problema de poluição e congestionamento para outras áreas da rede viária, criando novos desafios em regiões anteriormente não afetadas (Muñuzuri *et al.*, 2005; Chorus *et al.*, 2011; Dobruszkes & Moyano, 2019). Esse cenário tem intensificado o interesse por estudos urbanos que buscam novas medidas mitigadoras para as emissões, como as Zonas de Emissões Reduzidas (ZERs). As ZERs têm se mostrado eficazes na melhoria da qualidade do ar, restringindo o acesso a veículos que não atendem aos padrões de emissão, incentivando a renovação da frota por veículos menos poluentes (Niu *et al.*, 2023; Pamucar *et al.*, 2022; Reynaud *et al.*, 2018; Savadoغو *et al.*, 2023; Wen & Song, 2022).

Além disso, as ZERs visam reduzir as emissões de veículos altamente poluentes, como os de transporte de carga, forçando mudanças comportamentais entre os operadores, que são incentivados a cumprir os padrões de emissão (Pouponneau *et al.*, 2019; Savadoغو *et al.*, 2023). Outros esforços incluem a adoção de caminhões mais eficientes energeticamente, substituindo motores a combustão por elétricos, bem como a consolidação de remessas e a adoção de modos de transporte mais sustentáveis, o que pode reduzir significativamente a pegada de carbono (Zhou *et al.*, 2017; Malik *et al.*, 2019; Pani *et al.*, 2021).

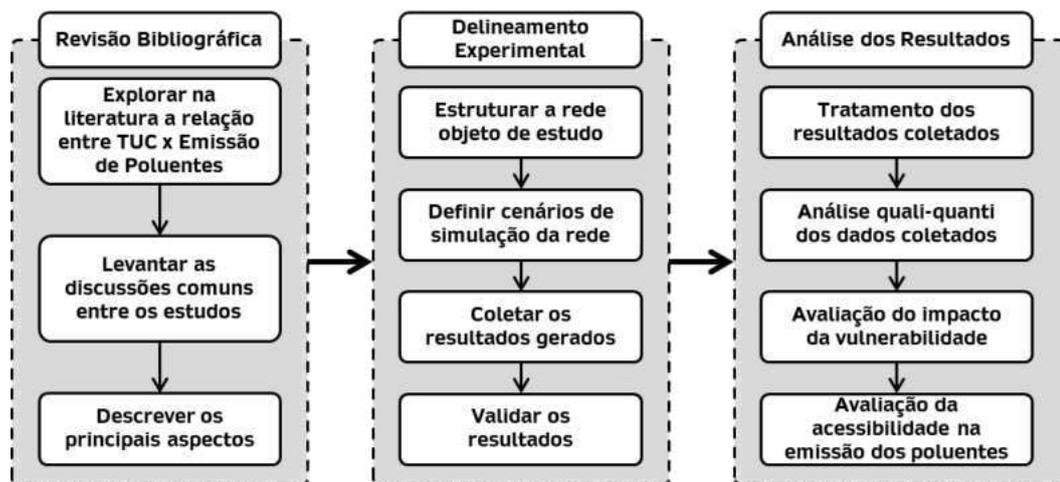
A maioria dessas iniciativas está focada no que Dehdari *et al.* (2023b) definem como "System Boundaries" (SB1), que se refere às emissões diretas da operação de transporte, e SB2, que inclui decisões sobre tipos de combustíveis. Apesar da importância dessas abordagens, elas são vistas como soluções paliativas para problemas mais complexos e abrangentes que requerem uma perspectiva estratégica, como a análise da infraestrutura urbana em termos de disponibilidade e qualidade das conexões para o transporte de cargas (van

Wee *et al.*, 2005; Reuss *et al.*, 2019; Tang & Low, 2020; Shabanpour *et al.*, 2018; Chandra & Nguyen, 2020). Neste contexto, o foco está no SB5, que considera as implicações da infraestrutura urbana na acessibilidade e emissão de poluentes, sugerindo que abordagens mais amplas e integradas são necessárias para enfrentar os desafios da poluição nas cidades.

### 4.3. Proposta Metodológica

Para este capítulo, foram definidas três etapas sequenciadas visando o alcance dos objetivos estabelecidos inicialmente, sendo elas: (i) Revisão Bibliográfica; (ii) Delineamento Experimental; e (iii) Análise dos Resultados. Em cada uma dessas etapas, ações foram definidas para que este estudo estivesse o mais próximo possível do entendimento do fenômeno observado, sendo então distribuídas conforme ilustrado na Figura 4.3 a seguir.

Figura 4.3 - Fluxograma das etapas e ações do procedimento metodológico proposto.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2024).

Como visto, este capítulo busca realizar uma abordagem em relação ao problema de forma qualitativa e quantitativa, descrevendo e explicando o fenômeno, além também da análise dos fatores que interferem diretamente para a ocorrência desse fenômeno. Isso se resume através da realização de procedimentos técnicos de caráter experimental a partir do uso de softwares de simulação para geração dos dados necessários para a interpretação do fenômeno, bem como da pesquisa bibliográfica que também forneceu suporte através da aplicação de métodos que favoreceram a tradução desses dados em informações claras e tangíveis.

#### **4.3.1. Revisão Bibliográfica**

Nesta etapa de revisão buscou-se principalmente explorar artigos que discutem a relação entre a poluição do ar em ambientes urbanos, juntamente com a prática da atividade de transporte de cargas nessas áreas, com ênfase em veículos pesados. Em consonância, essa busca foi orientada pelo interesse em identificar métodos indicativos que pudessem proporcionar às etapas posteriores, principalmente as que são de análise de caráter quantitativo, uma abordagem que auxiliassem na medição do desempenho da rede através da relação entre os parâmetros avaliados.

Nessa etapa, adotou-se o critério de inclusão de arquivos da literatura que estivessem compreendidos principalmente nos últimos dez anos, com a justificativa de fossem observadas as medidas políticas e estudos acadêmicos mais recentes sobre a problemática da emissão de poluentes atmosféricos e sua associação com a atividade de movimentação de cargas em áreas urbanas. O resultado dessa etapa está exposto no capítulo 2 deste documento através da discussão apresentada.

#### **4.3.2. Delineamento Experimental**

A segunda etapa da metodologia proposta consiste da definição e estruturação da área de estudo, para isso foram replicadas as mesmas informações da rede conforme foi abordado no capítulo 3 deste documento, subitem 3.3.2, considerando todos os dados que foram levantados e utilizados na modelagem da respectiva rede, no respectivo tópico. De mesmo modo, com base nas ações que correspondem às simulações no capítulo e subitem anteriormente citados, foram definidos três cenários distintos que também reproduziram o antes e depois da interrupção ter sido aplicada à rede, para que por fim possam ser comparados os seus parâmetros.

#### **4.3.3 Análise dos Resultados**

Diferente do que foi proposto e realizado conforme descrito no capítulo 3, subitem 3.4, referente à “Análise dos Resultados”, nesta terceira etapa da metodologia será levado em consideração três parâmetros: (i) a quantidade de caminhos mínimos gerados antes e depois da interrupção na rede; (ii) o tempo de viagem; e (iii) a medição da emissão de CO<sub>2</sub> em cada rota gerada antes e depois da interrupção da rede, para medir o desempenho da rede nos três cenários anteriormente citados sendo no primeiro cenário a simulação das redes regular e irregular sem a interrupção do link crítico, no segundo cenário a simulação de ambas as redes agora considerando a interrupção do link crítico, e no terceiro cenário a simulação da rede regular desconsiderando a existência de corredores restritos.

Diante disso, inicialmente será aplicado o indicador de centralidade de intermediação, ou “*betweenness centrality*” (BC), conforme descrito por Holme *et al.* (2002), em que sua métrica é baseada na geometria da rede, uma vez que neste estudo a análise da vulnerabilidade é baseada na forma como as redes estão configuradas, ou seja, regular e irregular. Entre a infinidade de métricas existentes para realizar análises de conectividade, o indicador BC é tradicionalmente a melhor e mais simples escolha para fins de análise de redes de tráfego, pois expressa a frequência com que a perda de uma conexão pode impactar na geração de caminhos utilizando outros nós entre os pares OD. Portanto, esse indicador BC tem sido amplamente adotado para avaliar a resiliência da rede, sendo capaz de identificar redes que possuam ligações e interseções topologicamente vulneráveis.

Nota-se na literatura que embora a maioria dos estudos se concentre em características topológicas estáticas da rede para identificar vulnerabilidades, alguns pesquisadores têm buscado integrar essas características a informações dinâmicas de tráfego (ESFEH *et al.*, 2020). As definições ampliadas de BC consideram a demanda de viagem origem-destino (OD) variável ao longo do tempo, bem como os tempos de viagem para calcular os caminhos mais curtos, em que essas métricas aprimoradas são utilizadas para análise e previsão de fluxo de tráfego, atribuição de tráfego e monitoramento do desempenho da rede em situações de eventos extremos (CHESTER *et al.*, 2020; JIANG *et al.*, 2021).

Originalmente, o indicador BC foi proposto por Freeman (1977), com o objetivo de medir a importância do link genérico “*a*” de um grafo considerando o número de caminhos mais curtos que o atravessam, e é definido da seguinte forma:

$$BC(a) = \sum_{w \in W} \frac{d_w}{d_w(a)} \quad (01)$$

Onde:

$d_w$  = é o número de caminhos curtos entre o par OD  $w$  sem o link  $a$  ; e

$d_w(a)$  = é o número total de caminhos curtos entre o par OD  $w$  com o link  $a$ .

Este capítulo adapta a metodologia de Gauthier *et al.* (2018), que incorpora o tempo de viagem à medida de entre centralidades, resultando na “Travel Time Weighted Betweenness-Centrality” (TTWBC). Essa adaptação pondera o tempo de viagem, refletindo a importância desse fator na avaliação da criticidade dos componentes nas redes de transporte. Ao utilizar a TTWBC, obtém-se uma avaliação mais abrangente dos componentes críticos que influenciam o fluxo de tráfego e a eficiência da rede. A expressão a seguir representa essa adaptação do indicador BC original:

$$TTWBC(a) = \bar{t}_a BC(a) \quad (02)$$

Onde:

$\bar{t}_a$  = Peso do link  $a$  com base na média dos tempos de viagem da rota  $i$  (pesos mais altos são atribuídos aos links com tempos de viagem mais altos).

Desse modo, para este esforço um novo coeficiente é acrescentado ao indicador BC com a finalidade de avaliar a importância do link em termos de medição da emissão de poluentes entre os pares OD  $w$ , considerando as oportunidades provenientes da quantidade e qualidade das conexões existentes antes e após o link  $a$  ter sido interrompido. Assim, esse novo coeficiente ( $\bar{e}_a$ ) pode ser descrito como sendo:

$\bar{e}_a$  = Peso do link  $a$  com base na média das emissões de poluentes do link na rota  $i$  (pesos mais altos são atribuídos aos links com emissão de poluentes mais alto).

Para determinar o modelo matemático do novo indicador BC considerando o novo coeficiente definido anteriormente, inicialmente foram estabelecidas e calculadas algumas variáveis e somatórios específicos, conforme descritos a seguir:

$n_w$  = Número de rotas disponíveis entre o par OD  $w$  antes da interrupção;

$m_w$  = Número de rotas disponíveis entre o par OD  $w$  depois da interrupção;

$T_{i,w}^{antes}$  = Tempo de viagem médio na rota  $i$  do par OD  $w$  antes da interrupção ( $i = 1, 2...n$ );

$T_{j,w}^{depois}$  = Tempo de viagem médio na rota  $j$  do par OD  $w$  depois da interrupção ( $i = 1, 2...m$ );

$E_{i,w}^{antes}$  = Emissão de poluentes na rota  $i$  do par OD  $w$  antes da interrupção ( $i = 1, 2...n$ );

$E_{j,w}^{depois}$  = Emissão de poluentes na rota  $j$  do par OD  $w$  depois da interrupção ( $i = 1, 2...m$ );

Em consequência, o modelo consiste principalmente no cálculo das médias do tempo de viagem e das médias da emissão de poluente antes e depois da interrupção na rede. Isto pode ser expresso pelas seguintes fórmulas:

I. Média dos tempos de viagem de cada rota para cada par OD  $w$ :

Antes da interrupção:

$$\bar{T}^{antes} = \frac{1}{n} \sum_{i=w=1}^n T_{i,w}^{antes} \quad (03)$$

Após a interrupção:

$$\bar{T}^{depois} = \frac{1}{m} \sum_{j=w=1}^m T_{j,w}^{depois} \quad (04)$$

II. Média das emissões de poluentes de cada rota para cada par OD  $w$ :

Antes da interrupção:

$$\bar{E}^{antes} = \frac{1}{n} \sum_{i=w=1}^n E_{i,w}^{antes} \quad (05)$$

Após a interrupção:

$$\bar{E}^{depois} = \frac{1}{m} \sum_{j=w=1}^m E_{j,w}^{depois} \quad (06)$$

Para calcular a relação das médias antes e depois da interrupção, tem-se que:

III. Relação das médias dos tempos de viagem:

$$t_a = \frac{\bar{T}_{i,w}^{antes}}{\bar{T}_{j,w}^{depois}} \quad (07)$$

IV. Relação das médias das emissões de poluentes:

$$e_a = \frac{\bar{E}_{i,w}^{antes}}{\bar{E}_{j,w}^{depois}} \quad (08)$$

Concluindo, para determinar a média dos parâmetros ( $t_a$ ) e ( $e_a$ ) considerando os múltiplos pares OD  $w$ , onde  $W$  é o número total de pares OD, é possível expressar a média dos parâmetros ( $t_a$ ) e ( $e_a$ ) como:

Tempo de viagem:

$$\bar{t}_a = \frac{1}{W} \sum_{w=1}^W t_a^w \quad (09)$$

Emissão de poluentes:

$$\bar{e}_a = \frac{1}{W} \sum_{w=1}^W e_a^w \quad (10)$$

Assim, considerando as equações acima uma adaptação à equação 02 apresentada inicialmente, substituindo o parâmetro  $BC(a)$  conforme descrito na equação 01, os parâmetros ( $t_a$ ) e ( $e_a$ ) ponderam a criticidade do link  $a$  baseado no par OD  $w$  em termos de tempo de viagem e emissão de poluentes global na rede, isto é, as formulações apresentadas nas equações 09 e 10 consideram o impacto do somatório de ambos os parâmetros para todas as rotas existentes entre o par OD  $w$ . Com isso, esse novo indicador TTEWBC pode ser chamado de “*Travel Time and Pollutant Emissions-Weighted Betweenness Centrality*” (TTEWBC), ou Centralidade de Intermediação Ponderada pelo Tempo de Viagem e pelas Emissões de Poluentes, conforme expressado a seguir.

$$TTEWBC(a) = \bar{t}_a \bar{e}_a BC(a) \quad (11)$$

## 4.4 Análise dos Resultados

### 4.4.1. Análise Qualitativa

Nesta seção, os resultados das simulações anteriores são analisados, agora focando na emissão de CO<sub>2</sub> (g/km). Utilizando o modelo de emissão de Londres (2017) no software AIMSUN, os dados foram exportados e organizados em uma planilha do Excel para tratamento, considerando os modos de transporte: carro, caminhão e ônibus. No capítulo anterior, o tempo de viagem foi analisado; aqui, a análise concentra-se nos parâmetros restantes para o indicador TTEWBC. O primeiro resultado refere-se

à emissão de CO<sub>2</sub> nas redes regular e irregular, sem interrupção dos links vulneráveis. A análise inicial indica maior emissão na rede irregular, destacando a influência da infraestrutura no transporte e na emissão de poluentes, devido a fatores como congestionamento e rotas mais longas. A figura 4.4 compara as emissões nas duas redes, identificando áreas críticas e avaliando o impacto das infraestruturas na eficiência ambiental.

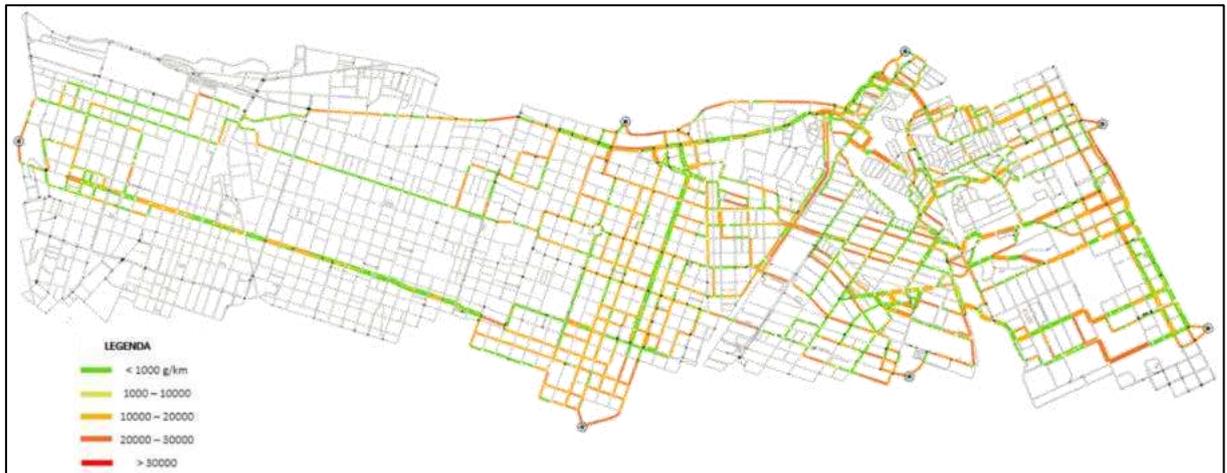
Figura 4.4 - Medição da emissão de poluentes na rede viária sem interrupção do link crítico.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2024).

Neste cenário, corredores restritos na rede regular limitam o acesso dos caminhões, resultando em emissões de CO<sub>2</sub> apenas dos carros e ônibus. A análise revela que, tanto na rede regular quanto na irregular, a intensidade da emissão de CO<sub>2</sub> é semelhante, mas a concentração varia devido à maior densidade de vias na rede regular, que distribui o CO<sub>2</sub> mais amplamente. Os caminhos curtos escolhidos por carros e ônibus na região regular são poucos em comparação com as opções disponíveis, refletindo a menor competição por espaço viário e facilitando o equilíbrio dos custos de viagem. Uma simulação adicional, sem restrições para caminhões, avaliou o impacto na fluidez do tráfego e eficiência do transporte, oferecendo uma visão abrangente sobre a rede viária sem limitações para veículos pesados. A comparação entre as simulações revela os benefícios e desafios de cada configuração, auxiliando na gestão e planejamento urbano. A Figura 4.5 ilustra visualmente esses resultados.

Figura 4.5 - Medição da emissão de poluentes na rede viária sem interrupção do link crítico, e com a rede sem corredores restritos à caminhões.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2024).

Na simulação sem a impedância específica, observou-se que a região regular apresenta maior dissipação do fluxo veicular, conforme esperado, devido à integração dos caminhões com os demais veículos, reduzindo o desempenho dos carros e ônibus e forçando uma redistribuição constante. O impacto mais significativo ocorreu na rede regular, enquanto os usuários modificaram seus percursos através da região irregular após a remoção dos corredores restritos. No entanto, não houve alteração relevante na emissão de CO<sub>2</sub> na região irregular. Em contraste, a emissão de CO<sub>2</sub> na região regular apresentou uma redução, sem afetar os parâmetros de velocidade, fluxo e tempo de viagem. Uma nova simulação será realizada com a configuração original da rede viária, incluindo os corredores restritos e considerando a interrupção dos links críticos definidos anteriormente. Esta simulação avaliará o impacto na fluidez do tráfego, eficiência do transporte e emissão de CO<sub>2</sub> nas duas regiões, como ilustrado na Figura 4.6.

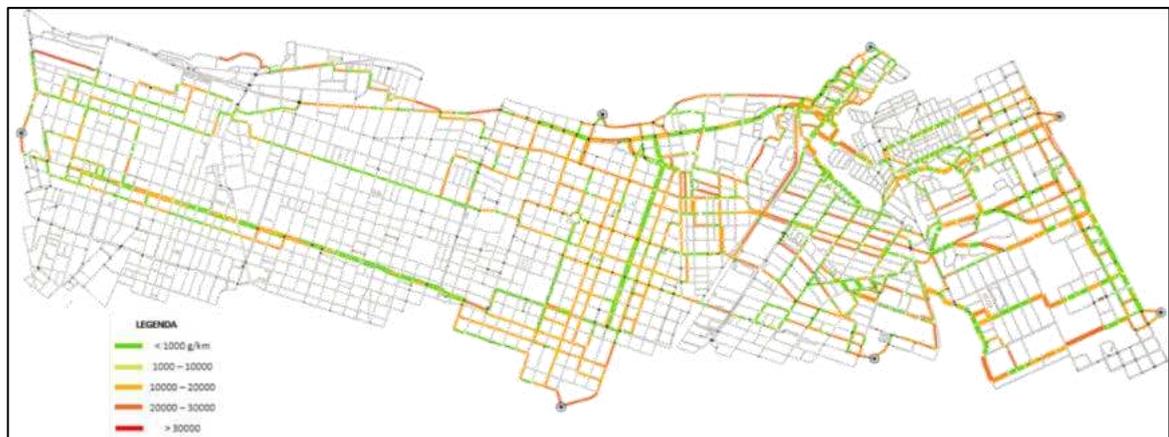
Figura 4.6 - Medição da emissão de poluentes na rede viária com interrupção do link crítico, e com corredores restritos à circulação de caminhões na região regular.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2024).

Com a exclusão dos links críticos para cada região, observou-se que alguns links visitados pelos veículos apresentaram maior intensidade de emissão de poluentes do que nas simulações anteriores, como esperado. A emissão aumentou especialmente nas regiões conectoras, próximas às regiões regulares e irregulares destacadas, que oferecem alternativas de rota antes da interrupção na via. A ausência de densidade ou qualidade nas conexões dessas regiões conectoras impacta diretamente nos custos ao acessar as regiões regulares e irregulares quando o link com maior potencial de conexão é interrompido. Após retirar a restrição aos corredores restritos e eliminar apenas os links críticos, o resultado visual do mapa com a medição da emissão de CO<sub>2</sub> é mostrado na Figura 4.5.

Figura 4.7 - Medição da emissão de poluentes na rede viária com interrupção do link crítico, e sem corredores restritos à circulação de caminhões na região regular.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2024).

Embora novos caminhos tenham reduzido o impacto de emissão de CO<sub>2</sub> na região regular da rede em comparação com a região irregular, ainda há uma quantidade significativa de links na região regular com alta emissão, conforme evidenciado em simulações anteriores. As representações visuais das redes, embora úteis para entender diferenças estruturais e dinâmicas, não capturam a complexidade e a variabilidade dos fatores que influenciam diretamente as emissões de CO<sub>2</sub>, como o fluxo de tráfego e os padrões de congestionamento.

A aplicação do indicador TTEWBC, conforme modelado nas equações 1 a 11, fornece uma referência quantitativa. A pontuação varia de 0 a 1: valores próximos de zero indicam sérios problemas de conectividade e altos níveis de emissão de CO<sub>2</sub>, enquanto valores próximos de 1 indicam uma rede robusta com melhor controle dos custos e menores emissões. Assim, o TTEWBC oferece uma medida quantificável, considerando a estrutura, conectividade e vulnerabilidade da rede viária para uma avaliação mais precisa do impacto ambiental.

#### ***4.4.2. Análise Quantitativa***

Com o levantamento dos dados através das simulações discutidas na seção anterior para a aplicação do indicador TTEWBC, foi realizada a extração e tabulação desses dados para o Excel, fazendo o tratamento dos mesmos a fim de realizar as etapas descritas da equação 1 até a 11. A tabela 4.1 a seguir apresenta o resultado dos cálculos estabelecidos e que é tangente aos dados coletados de forma mais condensada, uma vez que as simulações foram divididas em intervalos de 10 minutos em um período total oito horas, gerando um total de 480 dados para cada um dos quatro cenários, totalizando então 1.920 dados, e considerando os dois parâmetros como tempo de viagem e emissão de CO<sub>2</sub>, um total final de 3.840 dados, além da análise das rotas entre cada par OD.

Além disso, a tabela 4.1 está dividida de acordo com os pares OD gerados e suas respectivas rotas a partir das regiões definidas como regular e irregular, e da imposição de restrições à circulação de caminhões como discutido nas seções anteriores. Ela mostra também o resultado de cada etapa dos cálculos realizados apresentando no final a pontuação do indicador TTEWBC obtida, referente à uma média global para a região regular e irregular.

Tabela 4.1 - Resultado da aplicação do indicador TTEWBC em relação à simulação dos três cenários definidos.

Rede	Par OD	$\bar{T}_i^{antes}$	$\bar{T}_j^{depois}$	$\bar{E}_i^{antes}$	$\bar{E}_j^{depois}$	$t_a$	$e_a$	$d_w$	$d_w(a)$	$BC(a)$	$\bar{t}_a$	$\bar{e}_a$	$\overline{BC}(a)$	TTEWBC
Rede Irregular	Papicu x Cais do Porto	82	108	21905	48814	0,75	0,45	4	7	0,57	0,78	0,64	0,73	0,36
	Cais do Porto x Papicu	91	106	34274	45734	0,86	0,75	3	3	1,00				
	Praia do Futuro x Cais do Porto	83	110	32684	44304	0,76	0,74	5	9	0,56				
	Cais do Porto x Praia do Futuro	83	115	33247	48963	0,73	0,68	4	5	0,80				
	Vicente Pinzon x Cais do Porto	80	107	26541	37747	0,75	0,70	3	5	0,60				
	Cais do Porto x Vicente Pinzon	89	107	23019	45587	0,83	0,50	5	6	0,83				
Rede Regular <b>Com corredores restritos</b>	Meireles x Aldeota	113	161	49878	55168	0,70	0,90	4	4	1,00	0,73	0,84	0,70	0,43
	Aldeota x Meireles	97	166	58920	68322	0,58	0,86	3	5	0,60				
	Cais do Porto x Centro	124	167	46711	59211	0,74	0,79	6	9	0,67				
	Centro x Cais do Porto	97	145	46081	58230	0,67	0,79	7	12	0,58				
	Vicente Pinzon x Centro	119	143	50809	61566	0,83	0,83	5	7	0,71				
	Centro x Vicente Pinzon	123	165	60439	72033	0,75	0,84	8	11	0,73				
	Praia do Futuro x Centro	115	151	50856	58498	0,76	0,87	6	9	0,67				
	Centro x Praia do Futuro	118	144	51506	60527	0,82	0,85	8	12	0,67				
Rede Regular <b>Sem corredores restritos</b>	Meireles x Aldeota	108	123	37708	47348	0,88	0,80	14	15	0,93	0,89	0,90	0,80	0,65
	Aldeota x Meireles	79	119	38844	41309	0,66	0,94	13	16	0,81				
	Cais do Porto x Centro	98	127	36371	47583	0,77	0,76	9	11	0,82				
	Centro x Cais do Porto	84	95	37841	47889	0,88	0,79	10	13	0,77				
	Vicente Pinzon x Centro	91	103	43860	39201	0,88	1,12	10	15	0,67				
	Centro x Vicente Pinzon	105	110	41463	46197	0,95	0,90	8	11	0,73				
	Praia do Futuro x Centro	102	99	41136	39491	1,03	1,04	11	14	0,79				
	Centro x Praia do Futuro	96	92	35039	39411	1,04	0,89	11	12	0,92				

Fonte: Elaborado pelo Autor (2024).

Os resultados apresentados na tabela 4.1 compreendem inicialmente da análise da média das rotas existentes em cada par OD  $w$ , conforme descritos. Nas análises é possível perceber que em todos os pares OD houve um aumento nas medidas dos dois parâmetros, sendo apenas observado que na região regular da rede com a exclusão dos corredores restritos, mesmo com o link crítico sendo interrompido, foram registradas quedas no parâmetro tempo de viagem nos pares OD: Praia do Futuro x Centro; e Centro x Praia do Futuro, e na emissão de CO<sub>2</sub>, a queda ocorreu nos pares OD: Vicente Pinzon x Centro; e Praia do Futuro x Centro. Essa variação pode ter sido consequência do aumento da quantidade de caminhos possíveis entre os pares OD citados devido à ausência de impedância para os veículos de carga nessa região regular, o que facilitou simulador redistribuir os fluxos a fim de que fosse possível manter o equilíbrio da rede.

Analisando o parâmetro  $\bar{t}_a$  vê-se que a região irregular da rede apresentou um resultado suavemente melhor a própria região regular, sendo 0,78 e 0,73, respectivamente. Na região regular, nota-se percas significativas desse parâmetro em alguns pares OD, chegando a registrar a medida  $t_a$  como 0,58 e 0,67, isto é, na região regular a medição desse desempenho chegou a totalizar 42% e 33% da eficiência medida antes do bloqueio dos links críticos, enquanto que na região irregular o valor de  $t_a$  mínimo foi de 0,73, ou seja, uma queda na eficiência do tempo de viagem de 0,27%. No caso da região regular sem os corredores restritos essa pontuação sobre significativamente para 0,89 com relação a medida  $\bar{t}_a$ , indicando apenas uma perca na qualidade do serviço da infraestrutura de 11%, de uma forma mais clara, essa medida representa claramente o impacto que dois links críticos se interrompidos podem provocar na rede analisada.

Mas, com relação a medição da emissão de poluentes, a medida  $\bar{e}_a$  mostra um resultado diferente do que foi discutido anteriormente, é possível observar que a região irregular tem um declínio expressivo em relação a sua medida anterior. Se comparado com a região regular, a irregular apresentou um aumento na emissão de poluentes em torno de 36% em média, enquanto a regular apresentou uma queda muito pouco significativa, registrando um aumento de emissão de CO<sub>2</sub> de 16%. Alguns dos pares OD da região irregular apresentaram quedas consideráveis na medida  $e_a$  chegando a alcançar 55% a mais no aumento das emissões, como é o caso do par Papicu x Cais do Porto. Outro também bastante expressivo foi o Cais do Porto x Vicente Pinzon, registrando um aumento de 50% nas emissões. Na região regular, a maior queda foi de 0,79 no par Cais do Porto x Centro, sendo ainda levemente melhor que no mesmo par na região regular sem corredores restritos.

Já na medida da centralidade de intermediação  $\overline{BC}(a)$ , a região irregular apresentou uma melhor conectividade, não muito significativa, se comparada com a região regular, como apresentado na tabela 4.1. Ainda que a região irregular tenha apresentado dois pares OD com quedas consideráveis, sendo eles Papicu x Cais do Porto e Praia do Futuro x Cais do Porto, registrando uma queda de conectividade em,

aproximadamente, 43% e 44%, respectivamente para a medida  $BC(\alpha)$ , é na região regular que se observa uma prevalência maior de pares OD com baixo desempenho em termos de qualidade de conexão para os veículos de carga. Isso pode ser decorrência da existência desses corredores restritos que limitam a acessibilidade para esse veículo em específico.

No entanto, ainda que a região regular da rede tenha apresentado deficiência em dois das três medições realizadas,  $\bar{t}_\alpha$  e  $\overline{BC}(\alpha)$ , e mesmo que tenham sido pequenas, a região irregular na medição do indicador TTEWBC foi o que apresentou o pior resultado, mas ainda assim bem próximo do que registrou a região regular, tendo sido registrada pontuação 0,36 para a irregular e 0,43 para a regular. Ambas as redes apresentaram quedas inferiores a 50% no resultado da combinação das três medições. Sem o acréscimo da medida  $\bar{e}_\alpha$  no indicador TTWBC, poderia ser concluído que a região irregular seria mais eficiente que a regular em termos de desempenho no parâmetro tempo de viagem e, conseqüentemente, inferir que essa região irregular provocaria menores emissões de CO<sub>2</sub>.

Comparando as regiões regulares com e sem os corredores restritos, nesse último cenário, registra-se um ganho de eficiência global na rede em mais de 25%, sendo um forte indicativo de que os corredores restritos implementados na região regular podem reduzir drasticamente a eficiência operacional dos caminhões. Isso pode levar à debates intensos sobre a eficiência efetiva dessas medidas políticas de restrição à circulação, como forma de promoção à fluidez e a redução dos impactos ambientais e sociais que podem estar associados à operação de movimentação de cargas em áreas urbanas. É necessário deixar registrado que tais medidas apresentam resultados significativos se bem implementados, mas, como reforçado por Muñuzuri *et al.*, (2018), muitas dessas políticas apresentam-se como paliativos a um problema real e vigente, que em alguns poucos anos já poderá se mostrar ineficientes devido à dinâmica das cidades e a sua constante mudança e crescimento, em geral, desordenado.

#### 4.5. Conclusão

Este estudo ressalta a importância de uma análise detalhada das emissões de poluentes nas redes viárias urbanas, considerando a vulnerabilidade da rede e seu impacto no planejamento do transporte urbano de cargas. A pesquisa avaliou as emissões de CO<sub>2</sub> em redes com diferentes configurações estruturais e explorou a relevância de considerar as características regionais, sejam elas de formato regular ou irregular.

A emissão de poluentes é um fator crítico que afeta a qualidade do ar e a saúde pública, especialmente em áreas urbanas com alta concentração de veículos. Monitorar e analisar essas emissões é essencial para implementar medidas de controle eficazes e melhorar a qualidade de vida. O planejamento do transporte urbano de cargas deve levar em conta a emissão de poluentes para minimizar impactos ambientais, através da otimização das rotas e da adoção de veículos menos poluentes.

Uma estratégia eficaz envolve a análise das redes viárias, considerando suas características regionais. A infraestrutura e conectividade das vias influenciam significativamente as emissões, e entender essas variações é fundamental para desenvolver soluções adaptadas às necessidades locais. O indicador TTWEBC, adaptado do indicador BC(a), mostrou-se um robusto medidor de emissões, permitindo uma avaliação detalhada do impacto das emissões associadas ao tempo de viagem e conectividade global, proporcionando uma ferramenta valiosa para análise e melhorias nas redes viárias.

Além disso, a vulnerabilidade da rede viária impacta as emissões, especialmente no transporte de cargas. Interrupções ou limitações na rede podem desviar rotas e aumentar as emissões. Avaliar e mitigar esses pontos de vulnerabilidade é crucial para uma operação eficiente e sustentável. Medidas restritivas à circulação, como corredores restritos, devem ser bem planejadas para evitar efeitos colaterais, como a transferência de problemas de congestionamento e poluição para outras áreas, exacerbando desafios logísticos e ambientais. Um planejamento adequado dessas medidas pode equilibrar a redução das emissões com a eficiência do transporte de cargas.

Os resultados deste estudo demonstram a eficácia das abordagens adotadas para analisar a vulnerabilidade da rede e sua acessibilidade no transporte urbano de cargas, em termos de emissão de CO<sub>2</sub>. A análise detalhada das emissões e a aplicação do indicador TTWEBC permitiram identificar pontos críticos e propor soluções específicas. Assim, o estudo reforça a importância de uma abordagem integrada e detalhada na gestão das redes viárias urbanas, visando a eficiência operacional, a sustentabilidade ambiental e a melhoria da qualidade de vida nas cidades.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresenta as considerações finais sobre o cumprimento dos objetivos e questões de pesquisa estabelecidos. O trabalho visa validar os propósitos definidos, refletindo sobre os principais achados e contribuições do estudo. A análise seguiu o método desenvolvido, onde cada etapa foi crucial para o sucesso das metas, assegurando a robustez dos dados e interpretações. Serão discutidas as conclusões relacionadas a cada questão e objetivo específico, destacando como cada um contribuiu para o objetivo geral e a questão central da pesquisa. O foco é demonstrar claramente a inter-relação entre os componentes do estudo e como eles se integraram para formar um todo coeso e relevante.

### 5.1. Quanto ao Primeiro Objetivo Específico

Com a finalidade de responder a primeira questão de pesquisa deste trabalho, o primeiro objetivo específico compreendeu em *analisar os impactos que as diferentes características topológicas da rede viária urbana, quando somados a análise da vulnerabilidade, podem provocar à escolha de caminhos.*

No primeiro documento produzido no esforço desta pesquisa, intitulado “ANÁLISE DA VULNERABILIDADE DA REDE DE TRANSPORTES SOB DIFERENTES CONFIGURAÇÕES TOPOLÓGICAS DA REDE VIÁRIA URBANA”, o artigo aborda a vulnerabilidade da rede viária urbana, destacando a importância de considerar diversos fatores ao avaliar os impactos das interrupções na rede de transportes. A vulnerabilidade da rede viária pode ser definida como potenciais degradações da infraestrutura viária e os impactos resultantes na sociedade, sua conscientização sobre a constante vulnerabilidade dos usuários da rede viária a interrupções tem aumentado, motivando pesquisadores a desenvolver novos métodos quantitativos para avaliar as consequências dessas interrupções.

A metodologia deste estudo envolveu uma revisão abrangente da literatura sobre análise de vulnerabilidade em redes de transporte, utilizando três bases de dados principais e palavras-chave específicas para tornar a busca mais eficiente. Os dados foram inicialmente filtrados e analisados com o software VOSviewer®. Em seguida, foram construídas duas redes de transporte hipotéticas para modelagem e simulação: uma regular, adaptada de uma rede existente com 24 nós e 76 links, e outra irregular, com uma configuração mais desarmônica e assimétrica.

Os resultados revelaram que a configuração da rede afeta significativamente as decisões de viagem e a capacidade das vias. Redes irregulares demonstraram maior vulnerabilidade devido à distribuição desordenada do fluxo após uma interrupção, resultando em menor resiliência, robustez e flexibilidade. Redes

regulares, embora consigam manter o equilíbrio temporariamente, podem tornar novas rotas críticas e vulneráveis, gerando fragilidade a longo prazo. Essa relação pode ser detalhada da seguinte forma:

### **i. Influência da Configuração da Rede:**

**Redes Irregulares:** Apresentam maior vulnerabilidade devido à desordem na distribuição do fluxo após uma interrupção. Essa falta de padrão resulta em congestionamentos e atrasos mais graves, com um redirecionamento de tráfego mais caótico e menos eficiente.

**Redes Regulares:** Mantêm um equilíbrio temporário após interrupções, mas novas rotas podem tornar-se críticas e vulneráveis com o tempo. A estrutura regular permite uma redistribuição mais uniforme inicialmente, porém pode criar novos pontos de estrangulamento.

### **ii. Impacto na Escolha de Rotas:**

A geometria da rede influencia mais a percepção de rotas alternativas do que a quantidade de conexões disponíveis. Redes irregulares, com padrões menos claros e características de uso do solo variadas, dificultam a identificação de rotas alternativas eficientes. Redes regulares, apesar de oferecerem inicialmente várias alternativas viáveis, podem enfrentar sobrecarga em rotas específicas, aumentando a vulnerabilidade.

### **iii. Níveis de Interferência e Capacidade Viária:**

Diferentes níveis de interferência afetam a capacidade das vias de forma distinta, com redes irregulares apresentando respostas menos previsíveis e menos eficientes. Redes regulares mostram uma resposta mais equilibrada, mas com vulnerabilidades emergentes sob estresse contínuo.

Este estudo demonstrou que a geometria da rede é crucial para a percepção e uso de rotas alternativas. Redes mais ordenadas facilitam a identificação de alternativas viáveis, enquanto redes desordenadas aumentam a ineficiência em situações de interrupção. A compreensão dessas vulnerabilidades pode guiar o planejamento urbano, promovendo redes de transporte mais resilientes e destacando a importância da conectividade e mobilidade para a resiliência viária. Redes bem planejadas e com alta conectividade oferecem melhores opções de desvio e redistribuição de tráfego, aprimorando a capacidade de resposta a eventos disruptivos. Com base em todo o conhecimento gerado a partir do esforço produzido nesse primeiro objetivo específico, a primeira questão de pesquisa elaborada foi respondida, em que compreendia de: *Como as diferentes características topológicas da rede viária urbana influenciam a vulnerabilidade da rede de transportes e, conseqüentemente, a escolha de caminhos e o comportamento das viagens?*

Dessa forma, os resultados mostraram que redes irregulares são mais vulneráveis a interrupções, causando redistribuição caótica do tráfego, enquanto redes regulares mantêm equilíbrio temporário, mas podem

desenvolver novas vulnerabilidades a longo prazo. Essa análise enfatiza a importância da configuração da rede para a resiliência e eficiência do transporte urbano.

O segundo produto da pesquisa, alinhado ao segundo objetivo específico, investiga como características físicas e não físicas da rede, combinadas com impedâncias de transporte e análise de vulnerabilidade, afetam a acessibilidade do transporte de cargas. Por meio de simulações de cenários urbanos reais, o estudo analisa como o layout urbano e suas impedâncias influenciam essa acessibilidade. A análise de diferentes configurações de rede visa fornecer aos planejadores urbanos fundamentos para otimizar rotas e recursos, destacando a importância da integração do layout urbano no planejamento de transporte.

## 5.2. Quanto ao Segundo Objetivo Específico

A segunda questão de pesquisa foi compreendida por *“Como a análise da vulnerabilidade da rede viária urbana pode influenciar a acessibilidade do transporte de cargas, considerando as interações entre os diferentes tipos de infraestrutura, localização logística e uso do solo, visando otimizar a eficiência e sustentabilidade das operações logísticas urbanas?”*, que provocou a elaboração do segundo objetivo específico delimitado ao trabalho, sendo este baseado no esforço de *“analisar como as diferentes configurações topológicas da rede urbana podem afetar a vulnerabilidade da rede e influenciar na acessibilidade do transporte urbano de cargas.”*

Esse segundo estudo intitulado de: “ANÁLISE DA ACESSIBILIDADE DO TRANSPORTE URBANO DE CARGAS A PARTIR DA INFLUÊNCIA DA CONFIGURAÇÃO TOPOLÓGICA NA VULNERABILIDADE DA REDE”, foi desenvolvido para explorar as oportunidades mencionadas com o objetivo de compreender como as características físicas e não físicas, combinadas com impedâncias de transporte e análise de vulnerabilidade, influenciam a acessibilidade do transporte urbano de cargas. O levantamento de dados para esta discussão foi realizado por meio de práticas de simulação que estruturaram diferentes cenários, representando variadas características de redes de transporte e planejamento urbano. A acessibilidade foi avaliada com base em três parâmetros principais: tempo de viagem, distância e velocidade média, considerando condições de vulnerabilidade do sistema.

A análise revelou que a combinação de layout urbano, impedâncias de transporte e vulnerabilidades afetam significativamente a acessibilidade ao transporte de cargas. A compreensão dessas interações pode fornecer suporte crucial para planejadores e formuladores de políticas ao tomarem decisões mais informadas sobre como melhorar o transporte de cargas em áreas urbanas. O objetivo é identificar os principais fatores que influenciam a acessibilidade, otimizar rotas e recursos, e alcançar operações logísticas mais sustentáveis e econômicas.

O estudo evidenciou que o layout urbano exerce influência direta na escolha de rotas, especialmente para o transporte de mercadorias. Diferentes tipos de layouts, como grades regulares ou padrões irregulares, afetam a eficiência do transporte e o comportamento dos usuários da rede viária. Layouts regulares, com blocos de tamanhos e formas semelhantes, tendem a aumentar o número de rotas possíveis, tornando a estrutura urbana mais eficiente e facilitando o fluxo das atividades de transporte. No entanto, essas regiões frequentemente concentram alta densidade de demanda e oferta de mercadorias, o que exige um planejamento detalhado para evitar conflitos viários e garantir um fluxo contínuo.

A combinação das características físicas da cidade, traçados viários e impedâncias de transporte mostrou ter impacto significativo nos níveis de acessibilidade do transporte urbano de cargas. Assim, é crucial que planejadores urbanos abordem vulnerabilidades nas rotas e considerem tanto os aspectos físicos quanto os não físicos do projeto urbano para melhorar a acessibilidade ao transporte de cargas. Integrar essas considerações ao planejamento urbano pode resultar em operações logísticas mais sustentáveis e econômicas.

Contudo, o estudo enfrentou algumas limitações. As simulações se concentraram em um layout específico, o que pode não representar a diversidade de ambientes urbanos em diferentes cidades. Além disso, a pesquisa focou principalmente nos aspectos físicos do design urbano e do transporte, sem aprofundar nos fatores sociais e econômicos que também poderiam impactar a acessibilidade do transporte de carga. A análise foi baseada em cenários simulados e pode não capturar completamente as complexidades dos sistemas de logística urbana. O estudo também não abordou os impactos ambientais potenciais de diferentes layouts urbanos e configurações de transporte, nem considerou possíveis avanços tecnológicos que poderiam influenciar a acessibilidade do transporte de cargas.

Apesar dessas limitações, o estudo reforça a importância da análise das características da rede urbana na acessibilidade ao transporte de cargas. A pesquisa sugere que layouts urbanos regulares podem melhorar a eficiência do transporte, mas que as altas densidades de demanda nessas regiões exigem um planejamento cuidadoso para evitar conflitos viários. Além disso, o estudo indica a necessidade de pesquisas adicionais que incorporem uma gama mais ampla de variáveis e dados reais para aumentar a aplicabilidade das descobertas.

### **5.3. Quanto ao Terceiro Objetivo Específico**

Na observância quanto às oportunidades que foram apontadas, deixadas, pelo documento produzido no capítulo 3, intitulado de “ANÁLISE DA INFLUÊNCIA VULNERABILIDADE DA REDE URBANA NA ACESSIBILIDADE DO TRANSPORTE URBANO DE CARGAS SOB A ÓTICA DA EMISSÃO DE CO<sub>2</sub>”, referente à terceira obra produzida pelo fruto do esforço do que havia sido desenvolvido e fundamentado ainda na segunda questão de pesquisa e no segundo objetivo específico, o terceiro objetivo

específico concernente em *avaliar o impacto da vulnerabilidade da rede viária na acessibilidade em termos de emissão de poluentes do transporte urbano de cargas*, objetivou preencher tais lacunas a fim de que pudessem complementar esse entendimento.

Este estudo analisa a relação entre o crescimento da demanda por transporte de mercadorias e a globalização, destacando como esse aumento leva à rápida expansão do transporte de carga, ao mesmo tempo em que surgem preocupações ambientais significativas, como consumo de energia, poluição do ar e emissões de gases de efeito estufa, exacerbadas pela infraestrutura inadequada do setor. O objetivo principal é avaliar a vulnerabilidade da rede viária urbana no contexto do transporte de carga, com foco nas emissões de CO<sub>2</sub>. O estudo considera como as intervenções atuais afetam a acessibilidade desse modal e propõe uma nova abordagem para reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> no transporte urbano de mercadorias, utilizando tanto análises quantitativas quanto qualitativas.

Diferente de outras pesquisas que se concentram na eficiência operacional e na otimização de custos, este trabalho enfatiza a necessidade de incorporar a acessibilidade e a vulnerabilidade da rede viária no planejamento do transporte urbano de carga para enfrentar os desafios ambientais. A ferramenta de modelagem AIMSUN foi utilizada para analisar a vulnerabilidade da rede viária e seu impacto nas emissões de CO<sub>2</sub>, por meio de dados sobre volume de tráfego, densidade e centralidade.

A análise da vulnerabilidade baseou-se em indicadores como BC(a) e TTWBC(a), sendo este último uma adaptação que identificou segmentos críticos da rede viária em termos de emissões de CO<sub>2</sub>. A geração de dados de emissões foi realizada através do Sistema Europeu de Modelagem de Dispersão de Emissões (EDMS) no AIMSUN, utilizando uma configuração baseada em London (2017), permitindo comparar as emissões entre redes viárias regulares e irregulares.

Os resultados revelaram que a rede regular, com acesso restrito a veículos de carga, apresentou desempenho ambiental semelhante à rede irregular, mas com a remoção dessas restrições, houve uma melhora significativa. O indicador TTWBC provou ser uma ferramenta eficaz para avaliar a vulnerabilidade das redes viárias urbanas em termos de emissões de CO<sub>2</sub>, proporcionando uma medida quantitativa que integra aspectos críticos da infraestrutura e dinâmica do tráfego, contribuindo para o planejamento de sistemas de transporte urbano de carga mais sustentáveis e eficientes. Com isso, é possível afirmar que a questão de pesquisa definida: *“Como a vulnerabilidade da rede viária urbana impacta a acessibilidade do transporte urbano de cargas em termos de emissões de CO<sub>2</sub>, considerando diferentes configurações de rede e cenários de interrupção de rotas?”*, foi respondida em sua completude, através do esforço proporcionado de investigação e da avaliação qualitativa e quantitativa do fenômeno como discutido.

Considerando as características topológicas da rede viária urbana, verifica-se que estas influenciam diretamente sua vulnerabilidade. Redes com maior densidade de interseções e rotas alternativas tendem a ser menos vulneráveis, facilitando a escolha de caminhos e otimizando o comportamento das viagens.

Em contraste, redes com poucas alternativas e alta centralidade em determinados pontos são mais suscetíveis a interrupções, prejudicando a eficiência do transporte urbano de cargas. Essa relação é fundamental para compreender como diferentes configurações da rede podem afetar a acessibilidade, a resiliência e a sustentabilidade social e ambiental do sistema de transporte urbano, especialmente em cenários de interrupção de rotas.

A análise da vulnerabilidade da rede viária permite identificar pontos críticos e gargalos, possibilitando a proposição de intervenções que otimizem as operações logísticas, reduzam tempos de viagem e custos operacionais, e integrem estratégias de sustentabilidade, como a redução de emissões de CO<sub>2</sub>. Assim, a análise da vulnerabilidade da rede viária urbana, aliada aos outros aspectos discutidos neste trabalho, fornece uma base sólida para a implementação de melhorias estruturais e operacionais. Indicadores como o TTEWBC possibilitam uma avaliação quantitativa precisa, orientando o planejamento de uma rede viária mais resiliente, eficiente e com menor impacto ambiental.

#### 5.4. Sugestões de Trabalhos Futuros

- a) Exploração de configurações de redes viárias em ambientes diversos:
  - Objetivo: Ampliar a análise das vulnerabilidades e da resiliência das redes viárias em diferentes configurações urbanas e tipos de cidades.
  - Justificativa: Este estudo focou em redes viárias hipotéticas e específicas. A aplicação em uma variedade maior de ambientes urbanos, incluindo cidades de diferentes tamanhos, densidades populacionais e características socioeconômicas, poderia fornecer *insights* mais abrangentes e aplicáveis a diferentes contextos urbanos.
  
- b) Análise dos impactos socioeconômicos na acessibilidade do transporte urbano de cargas:
  - Objetivo: Investigar como fatores socioeconômicos influenciam a acessibilidade e a eficiência do transporte urbano de cargas.
  - Justificativa: A tese focou principalmente em aspectos físicos do design urbano e do transporte. Incorporar variáveis socioeconômicas poderia proporcionar uma visão mais holística e prática para os planejadores urbanos e formuladores de políticas.
  
- c) Integração de tecnologias avançadas e inovações em sistemas de transporte:
  - Objetivo: Explorar o impacto de tecnologias emergentes, como veículos autônomos, IoT e big data, na vulnerabilidade e na acessibilidade das redes viárias urbanas.

- Justificativa: As inovações tecnológicas têm o potencial de transformar o transporte urbano, mas seus impactos específicos na vulnerabilidade da rede viária e na acessibilidade ainda são pouco compreendidos.

d) Avaliação dos impactos ambientais de diferentes estruturas urbanas:

- Objetivo: Avaliar como diferentes layouts urbanos e políticas de planejamento afetam as emissões de poluentes e a sustentabilidade do transporte urbano de cargas.
- Justificativa: Embora a tese tenha abordado a relação entre vulnerabilidade da rede viária e emissões de CO<sub>2</sub>, uma análise mais profunda dos impactos ambientais de diferentes configurações urbanas pode ajudar a desenvolver políticas mais sustentáveis.

## REFERÊNCIAS

- ACUTO, F., COELHO, M. C., FERNANDES, P., GIUFRRÈ, T., MACIOSZEK, E., GRANÀ, A. Assessing the Environmental Performances of Urban Roundabouts Using the VSP Methodology and AIMSUN. *Energies*, 2022, 15, 1371. <https://doi.org/10.3390/en15041371>.
- AHMED, Z., LE, H. P. Linking Information Communication Technology, trade globalization index, and CO<sub>2</sub> emissions: evidence from advanced panel techniques. *Environmental Science Pollution Research*, 2021, 28 (7), 8770–8781.
- AKBARZADEH, M., SALEHI REIHANI, S.F., SAMANI, K.A. Detecting critical links of urban networks using cluster detection methods. *Physics A*, 2019, 515, 288–298.
- ALJOHANI, K. and THOMPSON, R. G. Impacts of logistics sprawl on the urban environment and logistics: Taxonomy and review of literature. *Journal of Transport Geography*, 2016, Vol. 57, pp. 255–263. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2016.08.009.
- ALLEN, J., BROWNE, M., CHERRETT, T. Investigating relationships between road freight transport, facility location, logistics management and urban form. *Journal of Transport Geography*, 2012, 24. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2012.06.010>.
- ALMOTAHARI, A., YAZICI, A. Impact of topology and congestion on link criticality rankings in transportation networks. *Transport Research Part D: Transportation Environmental*, 2020, 87, 102529.
- ANAND, N., van DUIN, R., & TAVASZY, L. (2021). Carbon credits and urban freight consolidation: An experiment using agent-based simulation. *Research in Transportation Economics*, 85. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2019.100797>
- ANDERSON, W. P., KANARGOGLU, P. S. & MILLER, E. Urban Form, Energy and the Environment: A Review of Issues, Evidence and Policy. *Urban Studies*, 1996, 33, pp. 17–35.
- ANDRIANKAJA, D., GONDRAN, N., GONZALEZ-FELIU, J., 2015. Assessing the environmental impacts of different IPSS deployment scenarios for the light commercial vehicle industry. *Procedia CIRP* 30, 281–286.
- AÑÓN HIGÓN, D., GHOLAMI, R., SHIRAZI, F. ICT and environmental sustainability: a global perspective. *Telematics Inf.*, 2017, 34, 85–95.
- ARAÚJO, A. M. Modelagem do tráfego em interseções não semaforizadas de Fortaleza com o uso de simulação microscópica. Monografia (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2016.
- ARIZA-ÁLVAREZ, A., SORIA-LARA, J. A., AGUILERA-BENAVENTE, F. Planning Adaptive Strategies for Urban Transport and Land Use using Scenario-Building. XXV International Conference Living and Walking in Cities - New scenarios for safe mobility in urban areas (LWC 2021), 9-10 September 2021, Brescia, Italy. *Transportation Research Procedia*, 2022, 60, 274–281.
- ASONGU, S.A. ICT, openness and CO<sub>2</sub> emissions in Africa. *Environmental Science Pollution Research*, 2018, 25, 9351–9359.

AVOM, D., NKENGFAK, H., FOTIO, H.K., TOTOUOM, A. ICT and environmental quality in Sub-Saharan Africa: effects and transmission channels. *Technol. Forecast. Soc. Change* 155, 2020, 120028.

BABABEIK, M., KHADEMI, N., CHEN, A., NASIRI, M. M.. Vulnerability analysis of railway networks in case of multi-link blockage. *Transport. Res. Procedia* 22, 2017, 275–284.

BAKSHI, N., TIWARI, G., BOLIA, BN. B. Influence of urban form on urban freight trip generation. *Case Studies on Transport Policy*, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2019.04.004>.

BALIJEPALLI, C., OPPONG, O. Measuring vulnerability of road network considering the extent of serviceability of critical road links in urban areas. *Journal of Transport Geography* 39, 2014, 145–155.

BALLANTYNE, E. E. F., LINDHOLM, M., & WHITEING, A. A comparative study of urban freight transport planning: Addressing stakeholder needs. *Journal of Transport Geography*, 32, 2013, 93–101. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2013.08.013>

BARROS, A. P., MARTINEZ, L. M., VIEGAS, J. M., SILVA, P. C., HOLANDA, F. Impacto do desenho da malha viária na mobilidade urbana. *Mobilidade, Cidade e Território*, Paranoá, 2012, ISSN\_1677-7395.

BARTHÉLEMY, M. Spatial networks. *Physics Reports*, v. 499, n. 1-3, p. 1-101, 2011.

BASSO, F., FREZ, J., MARTÍNEZ, L., PEZOA, R., VARAS, M. Accessibility to opportunities based on public transport gps-monitored data: the case of Santiago. Chile. *Travel Behav. Soc.* 21, 2020, 140–153.

BATY, M. *The new science of cities*. Cambridge: MIT Press, 2013.

BATTERMAN, S., COOK, R., JUSTIN, T. Temporal variation of traffic on highways and the development of accurate temporal allocation factors for air pollution analyses. *Atmosphere Environmental* 107, 2015, 351–363.

BEHRENDTS, S. *Urban freight transport sustainability*. Sweden: Chalmers University of Technology. PhD thesis, 2011.

BERCHE, B., VON FERBER, C., HOLOVATCH, T., HOLOVATCH, Y. Resilience of public transport networks against attacks. *Eur. Phys. J. B*, 2009. <https://doi.org/10.1140/epjb/e2009-00291-3>.

BERDICA, K., An introduction to road vulnerability: what has been done, is done and should be done. *Transp. Policy* 9 (2), 2002, 117–127.

BEŠINOVIĆ, N. Resilience in railway transport systems: a literature review and research agenda, *Transportation Review* 1–22, 2020.

BIER, V., GUTFRAIND, A. Risk analysis beyond vulnerability and resilience – characterizing the defensibility of critical systems. *Eur. J. Oper. Res.* 276, 2019, 626–636.

BÍNOVÁ, H., HYKS, O., HYKSOVÁ, M., NEUBERGOVÁ, K., KEKULA, F., SADIL, J. Perspective of Clean Mobility in Road Freight Transport. *Transportation Research Procedia* 53, 2021, 289–304.

BOZZO, R., CONCA, A., MARANGON, F. Decision support system for City logistics: literature review, and guidelines for an ex-ante model. *Transp. Res. Procedia* 3, 2014.

CALVERT, S.C., SNEIDER, M. A methodology for road traffic resilience analysis and review of related concepts. *Transportmetrica A: Transp. Sci.* 14 (1–2), 2018, 130–154.

CASALI, Y., HEINIMANN, H.R. A topological analysis of growth in the Zurich road network. *Comput. Environ. Urban Syst.* 75, 2009, 244–253.

CASTRO, R. B., MERCHÁN, D., LIMA JR, O. F., WINKENBACH, M. *City Logistics and Clustering: Impacts of Using HDI and Taxes*, 2018.

CATS O., & JENELIUS E. Beyond a complete failure: the impact of partial capacity degradation on public transport network vulnerability, *Transportmeter B* 6 (2), 2016, 77–96.

CATS, O., KOPPENOL, G.J., & WARNIER, M. (2017). Robustness assessment of link capacity reduction for complex networks: Application for public transport systems, *Reliability Engineering System Safety*. 167 544–553.

CAVALCANTE, A. P. H. *A Arquitetura da Cidade e os Transportes: O Caso dos Congestionamentos em Fortaleza, Ceará*. Antonio Paulo de Hollanda Cavalcante. – Brasília: PPG/FAU/UnB, 2009. ~347p.: 118 il.

CENTOBELLI, P., CERCHIONE, R., ESPOSITO, E. Pursuing Supply Chain Sustainable Development Goals through the Adoption of green Practices and Enabling Technologies: A Cross-Country Analysis of LSPs, 153, 2020, (119920), pp. 1–9.

CHANDRA, S., & NGUYEN, A. (2020). Freight truck emissions reductions with connected vehicle technology: A case study with I-710 in California. *Case Studies on Transport Policy*, 8(3), 920–927. doi:10.1016/j.cstp.2020.05.010.

CHATTI, W. Information and communication technologies, road freight transport, and environmental sustainability. *Environ. Econ.* 11 (1), 2020, 124–132.

CHEAH, L., MEPPARAMBATH, R. M., SURRIBAS, G. M. R., Freight trips generated at retail malls in dense urban areas. *Transportation Research Part A* 145, 2021, 118-131. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2021.01.015>.

CHEN, A., YANG, C., KONGSOMSAKSAKUL, S., LEE, M. Network-based Accessibility Measures for Vulnerability Analysis of Degradable Transportation Networks. *Network Spatial Economic*, 7, 2007, 241–256.

CHESTER, M. V, LI, R., & University of California, L. A. (2020). *Vulnerability of California Roadways to Post-Wildfire Debris Flows (Final Report)*. <https://doi.org/https://doi.org/10.17610/T60W35>

CHOROMANSKI, W., GRABAREK, I., KOZLOWSKI, M., & CZEREPICKI, A. (2021). Innovative Urban Transport System - Autonomous and Locally Low-Emission. *SCIENCE & TECHNIQUE*, 20(3), 243–247. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-243-247>

CHOUDHARY, A., GOKHALE, S. Urban real-world driving traffic emissions during interruption and congestion. *Transport. Res. Part D: Transp. Environ.* 43, 2016, 59–70.

CNT (Confederação Nacional dos Transportes) (2018). *CNT Transport Yearbook: Consolidated Statistics*. Accessed in March 2022. (Document in Portuguese). Available in: [www.anuariodotransporte.cnt.org.br](http://www.anuariodotransporte.cnt.org.br).

- COMES, T., WARNIER, M., FEIL, W., & VAN DE WALLE, B. Critical airport infrastructure disaster resilience: A framework and simulation model for rapid adaptation, *Journal Management Engineering*. 36, 2020, (5) 04020059.
- COWAN, R. *The Connected City: a new approach to making cities work*, Urban Initiatives, London, 1997.
- CRUCITTI, P.; LATORA, V.; PORTA, S. Centrality measures in spatial networks of urban streets. *Physical Review E*, v. 73, n. 3, p. 036125, 2006.
- DA CRUZ MOSCARELLI, F., KUNZ, M., DAL AGNOL, B., & PAGNUSSAT CAMARA, I. Estudos de morfologia como subsídio para a qualificação do espaço edificado. *Revista de Arquitetura IMED*, 9(2), 2020.
- DABLANC, L., 2007. Goods transport in large European cities: difficult to organize, difficult to modernize. *Transp. Res. A* 41 (3), 280–285.
- DARONG, H., LIBING, S., & LING., Z. Vulnerability analysis of urban road network based on complex network theory. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)* 34, 2015.
- DE BAKSHI, N., TIWARI, G., BOLIA, N. B. Influence of urban form on urban freight trip generation, *Case Studies on Transport Policy*, Volume 8, Issue 1, 2019. Pages 229-235, ISSN 2213-624X, <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2019.04.004>.
- DEHDARI, P., WLCEK, H., & FURMANS, K. (2023a). An updated literature review of CO<sub>2</sub> e calculation in road freight transportation. *Em Multimodal Transportation (Vol. 2, Número 2)*. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.multra.2022.100068>
- DEMIR, E., BEKTAS, T., LAPORTE, G., 2014. A review of recent research on green road freight transportation. *Eur. J. Oper. Res.* 237, 775–793.
- DEMPSEY, N., BROWN, C., RAMAN, S., PORTA, S., JENKS, M., JONES, C., BRAMLEY, G. *Elements of Urban Form. Dimensions of the Sustainable City*, *Future City 2*, 2010, Chapter 02. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8647-2\\_2](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8647-2_2).
- DEMPSEY, N. *et al.* The social dimension of sustainable development: Defining urban social sustainability. *Sustainable Development*, v. 19, n. 5, p. 289-300, 2011.
- DESTE, G.M., TAYLOR, M.A.P. Network vulnerability: an approach to reliability analysis at the level of national strategic transport networks. In: Iida, Y., Bell, M.G.H. (Eds.), *The Network Reliability of Transport*. Elsevier, Oxford, 2003, pp. 23–44.
- DING X, YANG X, LIU Z, HU H. The safety management of urban rail transit based on operation fault log. *Safety Science*; 94, 2017, 10–6.
- DOBRUSZKES, F., & MOYANO, A. (2019). From transportation robustness to the robustness of modelling-based political decision making: A comment on ‘Managing reliever gateway airports with high-speed rail network’. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 125, pp 165-166. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tra.2019.01.029>

DUAN, Y., & LU, F. Robustness analysis of city road network at different granularities, in: *Space-Time Integration in Geography and GIScience: Research Frontiers in the US and China*, Vol. 411, Elsevier B.V., 2015, pp. 127–143.

DUCRET, R., LEMARIÉ, B., ROSET, A. Cluster analysis and spatial Modeling for urban freight. Identifying homogeneous urban zones based on urban form and logistics characteristics. *Transp. Res. Procedia* 12, 2016, 301–313.

DUNN, S., & WILKINSON, S.M. Increasing the resilience of air traffic networks using a network graph theory approach, *Transp. Res. E* 90, 2019, 39–50.

ERDOGAN, S. An open-source Spreadsheet Solver for Vehicle Routing Problems. *Computer Operation Research*, 84, 2017, 62–72.

ESFEH, M. A., KATTAN, L., LAM, W. H. K., ESFE, R. A., & SALARI, M. (2020). Compound generalized extreme value distribution for modeling the effects of monthly and seasonal variation on the extreme travel delays for vulnerability analysis of road network. *TRANSPORTATION RESEARCH PART C-EMERGING TECHNOLOGIES*, 120. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102808>

ESFEH, M. A., KATTAN, L., LAM, W. H. K., SAFARI, M., & ESFE, R. A. Road network vulnerability analysis considering the probability and consequence of disruptive events: A spatiotemporal incident impact approach. *Transportation Research Part C* 136, 2020.

FERRAZ, A. & TORRES, I. *TRANSPORTE PÚBLICO URBANO*. 2ª Ed. São Carlos, Editora Rima, 2004.

FLORIDA, R. The New Urban Crisis: How Our Cities are Increasing Inequality, Deepening Segregation, and Failing the Middle Class — and What We Can Do About It. New York: Basic Books," *International Journal of Urban and Regional Research*, Wiley Blackwell, vol. 41(6), 2017, pages 1028-1029, November.

FRASELLE, J.; LIMBOURG, S.L.; VIDAL, L. Cost and Environmental Impacts of a Mixed Fleet of Vehicles. *Sustainability*, 13, 2021, 9413.

Freeman, L. C. A Set of Measures of Centrality Based on Betweenness. *Sociometry*, Vol. 40, No. 1, 1977, pp. 35–41.

FU, X., LAM, W.H.K. Modelling joint activity-travel pattern scheduling problem in multi-modal transit networks. *Transportation* 45, 2018, 23–49.

GABLE, T., MARTINS-TURNER, K., & NAGEL, K. (2022). Enhanced Emission Calculation for Freight Transport. *Procedia Computer Science*, 201(C), 601–607. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.03.078>

GANIN, A.A., KITSACK, M., MARCHESE, D., Keisler, J.M., SEAGER, T., LINKOV, I. Resilience and efficiency in transportation networks. *Science Advances* 3, 2017, (12).

GAO L., LIU, X., LIU, Y., WANG, P., DENG, M., ZHU, Q., & LI, H. Measuring road network topology vulnerability by Ricci curvature, *Physica A* 527, 2019, 121071.

GARCÍA-PALOMARES, J.C., GUTIERREZ, J., MARTÍN, J.C., MOYA-GOMEZ, B. An analysis of the Spanish high-capacity road network criticality. *Transportation* 45 (4), 2018, 1139–1159.

GARDRAT, M. Urban growth and freight transport: from sprawl to distension. *Journal of Transport Geography*, Volume 91, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2021.102979>.

- GATTA, V., & MARCUCCI, E. Stakeholder-specific data acquisition and urban freight policy evaluation: Evidence, implications and new suggestions. *Transport Reviews*, 36 (5), 2016, 585–609. <https://doi.org/10.1080/01441647.2015.1126385>.
- GAUTHIER, P., FURNO, A., & EL FAOUZI, N. E. (2018). Road network resilience: how to identify critical links subject to day-to-day disruptions. *Transportation Research Record*, 2672(1), 54–65. <https://doi.org/10.1177/0361198118792115>
- GE, M., FRIEDRICH, J., 2020. Charts Explain Greenhouse Gas Emissions by Countries and Sectors. World Resource Institute. <https://www.wri.org/blog/2020/02/greenhouse-gas-emissions-by-country-sector>. Acessado em 21 de fevereiro de 2024.
- GEHL, J., GEHL, A., Transport for London and Central London Partnership. *Towards a Fine City for People: public spaces and public life - London 2004*.
- GEROLIMINIS, N. Cruising-for-parking in congested cities with an MFD representation. *Econ. Transport*. 4 (3), 2015, 156–165.
- GEURS, K.T., & VAN WEE, B. Accessibility Evaluation of Land-use and Transport Strategies: Review and Research Directions. *Journal of Transport Geography*, 12 (2), 127-140, 2004.
- GHERMANDI, G. Vehicular exhaust impact simulated at microscale from traffic flow automatic surveys and emission factor evaluation. In: HARMO 2017: 18th Int. Con. on Harmonization within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes. Bologna, Italy, pp. 475–479, 2017.
- GILPIN, G., HANSEN, O. J., & CZERWINSKI, J. (2014). Biodiesel's and advanced exhaust aftertreatment's combined effect on global warming and air pollution in EU road-freight transport. *Journal of Cleaner Production*, 78, 84–93. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.011>
- GÓMEZ-MARÍN, C.G.; SERNA-URÁN, C.A.; ARANGO-SERNA, M.D.; COMI, A. Microsimulation-based collaboration model for urban freight transport. *IEEE Access*, 8, 2020, 182853–182867.
- GONZÁLEZ-FELIU, J. Urban logistics and spatial territorial intelligence indicators: State of the art, typology and implications for Latin American cities. *École des Mines de Saint-Étienne*. Saint-Étienne, France, 42, 2018.
- GONZALEZ-FELIU, J., AMBROSINI, C., & ROUTHIER, J.-L. New trends on urban goods González-Feliu, J., Grau, J. M. S., Beziat, A., 2014. A location-based accessibility analysis to estimate the suitability of urban consolidation facilities. Article in *International Journal of Urban Sciences* – July, 2012.
- GONZALEZ-FELIU, J., SALANOVA GRAU, J. M., and BEZIAT, A. A location-based accessibility analysis to estimate the suitability of urban consolidation facilities. *International Journal of Urban Sciences*, 18(2), 2014, 166-185.
- GRONDYS, K. The Impact of Freight Transport Operations on the Level of Pollution in Cities. *Transportation Research Procedia* 39, 2019, 84–91.
- GU, Y., FU, X., LIU, Z., XU, X., & CHEN, A. Performance of transportation network under perturbations: Reliability, vulnerability, and resilience, *Transportation Research E* 1–16, 2019.

GUIDOTTI, R., GARDONI, P., & CHEN, Y. Network reliability analysis with link and nodal weights and auxiliary nodes, *Structure Safety* 65, 2017.

GUTFRAIND, A. Optimizing Network Topology for Cascade Resilience. In: Thai, M., Pardalos, P. (Eds.), *Handbook of Optimization in Complex Networks*. Springer, New York, NY, 2012, pp. 37–59. [https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0857-4\\_2](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0857-4_2).

HAMIDUDDIN, I. Residential Urban Form and Transport. *Environment*, Elsevier, 2012, 137-143.  
HAMMAMI, F. The impact of optimizing delivery areas on urban traffic congestion. *Res. Transp. Bus. Manag.* 2020, 37, 100569.

HARDSIANSYAH, MUTHOHAR, I., BALIJEPALLI, C., PRIYANTO, S. Analysing vulnerability of road network and guiding evacuees to sheltered areas: Case study of Mt Merapi, Central Java, Indonesia. *Case Studies on Transport Policy* 8, 2020, 1329–1340.

HE, S., YU, S., LI, G., & ZHANG, J. Exploring the influence of urban form on land-use efficiency from a spatiotemporal heterogeneity perspective: Evidence from 336 Chinese cities. *Land Use Policy* 95, 2020.

HILLIER, B. A THEORY OF THE CITY AS OBJECT, OR HOW THE SPATIAL LAWS MEDIATE THE SOCIAL CONSTRUCTION OF URBAN SPACE. In: 3rd International Space Syntax Symposium. *Proceedings of 3rd International Space Syntax Symposium*. A. Alfred Taubman College of Architecture and Urban Planning, University of Michigan, Atlanta - EUA, 7-11 May 2001.

HOLGUIN-VERAS, J.; RAMIREZ-RIOS, D.; NG, J.; WOJTOWICZ, J.; HAAKE, D.; LAWSON, C.T.; CALDERÓN, O.; CARON, B.; WANG, C. Freight-Efficient Land Uses: Methodology, Strategies, and Tools. *Sustainability*, 13, 2021, 3059. <https://doi.org/10.3390/su13063059>.

HOLME, P., KIM, B. J., YOON, C. N., & HAN, S. K. (2002). Attack vulnerability of complex networks. *Physical Review E - Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics*, 65(5), 14. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.65.056109>

HONG L., OUYANG M., XU M., & HU P. Time-varied accessibility and vulnerability analysis of integrated metro and high-speed rail systems, *Reliability Engineer System Safety* 193, 2020 1–10.

HONG L., OUYANG M., XU M., HU P. Time-varied accessibility and vulnerability analysis of integrated metro and high-speed rail systems. *Reliability Engineering System Safety*; 193:106622, 2020.

HUSDAL, J. Reliability/vulnerability versus costs/benefits, in: *ETC 2004*.

IEA (2023), *Energy Statistics Data Browser*, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser>. Acessado em 21 de fevereiro 2024.

INGOLE, D., MARIOTTE, G., LECLERCQ, L. Nonlinear model predictive control to reduce network-wide traffic emission. *IFAC-PapersOnLine* 52 (6), 2019, 19–24.

INGOLE, D., MARIOTTE, G., LECLERCQ, L. Perimeter gating control and citywide dynamic user equilibrium: a macroscopic modeling framework. *Transport. Res. Part C: Emerg. Technol.* 111, 220, 22–49.

INTERSECTIONS. 33rd European Modeling & Simulation Symposium. 18th International Multidisciplinary Modeling & Simulation Multiconference. ISSN 2724-0029 ISBN 978-88-85741-57-7.

JENELIUS, E. Incorporating dynamics and information in a consequence model for road network vulnerability analysis. In: Van Zuylen, H.J. (Ed.), Proceedings of Third International Symposium on Transport Network Reliability, The Hague, the Netherlands, 2007.

JENELIUS, E. Network structure and travel patterns: explaining the geographical disparities of road network vulnerability. *J. Transp. Geogr.* 17 (3), 2009, 234–244.

JENELIUS, E., MATTSSON, L.-G. Road network vulnerability analysis: Conceptualization, implementation and application. *Computation Environment Urban System*, 49, 2015, 136–147.

JENELIUS, E., PETERSEN T., MATTSSON, L. “Importance and exposure in road network vulnerability analysis”, *Transportation Research Part A*, n. 40, 2006, pp 537- 560.

JIANG, B. A topological pattern of urban street networks: universality and peculiarity. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 384, n. 2, p. 647-655, 2007.

JIANG, N., KULLA, E. Evaluation and Comparison of CO<sub>2</sub> and Fuel Consumption for Different Car Following Models, *Lecture Notes in Networks and Systems* 97, 2020, pp. 579–588 (in print).

JIANG, Y., WANG, Y., SZETO, W. Y., CHOW, A. H. F., & NAGURNEY, A. (2021). Probabilistic assessment of transport network vulnerability with equilibrium flows. *INTERNATIONAL JOURNAL OF SUSTAINABLE TRANSPORTATION*, 15(7), 512–523. <https://doi.org/10.1080/15568318.2020.1770904>

JUN-QIAN, L., JING, Z., QIAN-WEN, L., LIN, Z. Construction of road network vulnerability evaluation index based on general travel cost. *Physica A* 493, 2018, 0378-4371.

KAMPA, M., & CASTANHAS, E. Human health effects of air pollution. *Environment Pollution*, 151, 2008.

KAN, Z., TANG, L., KWAN, M. P., & ZHANG, X. Estimating vehicle fuel consumption and emissions using GPS big data. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(4), 2018.

KENT, J. L., CRANE, M., WAIDYATILLAKE, N., STEVENSON, M., PEARSON, L. Urban form and physical activity through transport: a review based on the d-variable framework. *TRANSPORT REVIEWS*, VOL. 43, NO. 4, 2023.

KHALILI, F. B., ANTUNES, A. P., MOHAYMANY, A. S. Evaluating interregional freight accessibility conditions through the combination of centrality and reliability measures. *Journal of Transport Geography* 83, 2020.

KUMAR, A., HAQUE, K., MISHRA, S., & GOLIAS, M.M. Multi-criterial based approach to identify critical links in a transportation network. *Case Stud. Transp. Policy* 7, (3), 2019.

LACERDA, V. M. Estimaco da velocidade mdia em vias urbanas com uso do microssimulador VISSIM. Dissertao (Mestrado) – Universidade Federal do Cear, Centro de Tecnologia, Programa de Ps-Graduao em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2016.

- LEOBONS, C. M., BARCELLOS, V., CAMPOS, G., De, & R. A. Assessing urban transportation systems resilience: A proposal of indicators, *Transportation Research Procedia* 37, 2019.
- LI, Y., LIU, X. How did urban polycentricity and dispersion affect economic productivity? A case study of 306 Chinese cities. *Landscape Urban Planning*. 173, 2018.
- Li, Y., Yu, Y. The use of freight apps in road freight transport for CO<sub>2</sub> reduction. *Eur. Transp. Res. Rev.* 9, 36, 2017.
- Li, Z., Jin, C., Hu, P., & Wang, C. Resilience-based transportation network recovery strategy during emergency recovery phase under uncertainty, *Reliability Engineering System Safety*, 188, 2019.
- LIAO, T. Y., HU, T. Y., & KO, Y. N. A resilience optimization model for transportation networks under disasters, *Natural Hazards* 93, 2018.
- LINDHOLM, M., How local authority decision makers address freight transport in the urban area. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 39, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.03.096>.
- LIU, C., ZHAO, M.O., SHARMA, A., SARKAR, S. Traffic dynamics exploration and incident detection using spatiotemporal graphical modeling. *J. Big Data Analytic Transport*. 1 (1), 2019.
- LIU, H., HUANG, F., DENG, F., LUO, Z., ZHAO, H., & HE, K. (2021). Road freight emission in China: From supply chain perspective. *Environmental Pollution*, 285. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117511>
- LIU, J., SHI, Z., TAN, X., Measuring the dynamic evolution of road network vulnerability to floods: A case study of Wuhan, China. *Travel Behaviour and Society* 23, 2021.
- LIU, L., ZHANG, M. High-speed rail impacts on travel times, accessibility, and economic productivity: A benchmarking analysis in city-cluster regions of China. *Journal Transportation Geography* 73, 2008.
- LIU, S. and ZHU, X. Accessibility analyst: an integrated GIS tool for accessibility analysis in urban transportation planning. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 31(1), 2004, pp. 105–124.
- LÓPEZ, F. A., PÁEZ, A., CARRASCO, J. A., & RUMINOT, N. A. Vulnerability of nodes under controlled network topology and flow autocorrelation conditions, *Journal Transportation Geography* 59, 2017.
- LORDAN, O., & KLOPHAUS, R. Measuring the vulnerability of global airline alliances to member exits, *Transportation Research, Procedia* 25, 2017.
- LORDAN, O., SALLAN, J.M., SIMON, P., & GONZALEZ-PRIETO, D. Robustness of the air transport network, *Transportation Research E* 68, 2014.
- MACÁRIO, R. Modeling for public policies inducement of urban freight business development. In: *Freight Transport Modelling*. Emerald Group Publishing Limited, 2013, pp. 405–432.
- MACHADO-LEÓN, J. L., GIRÓN-VALDERRAMA, G. C., & GOODCHILD, A.. Bringing alleys to light: An urban freight infrastructure viewpoint. *Cities*, 105, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2020.102847>.

- MALIK, L., TIWARI, G., THAKUR, S., & KUMAR, A. (2019). Assessment of freight vehicle characteristics and impact of future policy interventions on their emissions in Delhi. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 67, 610–627. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.01.007>
- MARTÍN, B., ORTEGA, E., CUEVAS-WIZNER, R., LEDDA, A., MONTIS, A. Assessing Road network resilience: An accessibility comparative analysis. *Transportation Research Part D* 95, 2021.
- MARTÍN, L. E., Proposta metodológica para modelagem microscópica de interseções semaforizadas multimodais. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2018.
- MARTINS, E. M., MEIRELES, A. R., MAGALHAES, F. R., CARVALHO, J. B. B., & RIBEIRO, M. M. Concentrations of air pollutants in Rio de Janeiro in relation to national and international standards. (Document in Portuguese). *Revista Internacional de Ciências*, 7, 2007.
- MASCIA, M., HU, S., HAN, K., NORTH, R., VAN POPPEL, M., THEUNIS, J., BECKX, C., LITZENBERGER, M. Impact of traffic management on black carbon emissions: a microsimulation study. *Networks Spatial Econ.* 17 (1), 2017.
- MATTSSON, L., JENELIUS, E. Vulnerability and resilience of transport systems—A discussion of recent research. *Transport. Res. Part A: Policy Practice* 81, 2015.
- MATTSSON, L.G., & JENELIUS, E. Vulnerability and resilience of transport systems - A discussion of recent research, *Transportation Research A* 81, 2015.
- MILLER, E. J. Accessibility: measurement and application in transportation planning. *Transp. Rev.* 38 (5), 2018. <https://doi.org/10.1080/01441647.2018.1492778>.
- MOLERO, G.D., SANTARREMIGIA, F.E., POVEDA-REYES, S., MAYRHOFER, M., AWAD-NUNEZ, S., KASSABJI, A. Key factors for the implementation and integration of innovative ICT solutions in SMEs and large companies involved in the multimodal transport of dangerous goods. *Eur. Trans. Res. Rev.* 11, 2019.
- MOMMENS, K., BRUSSELAERS, N., VAN LIER, T., & MACHARIS, C. (2019). A dynamic approach to measure the impact of freight transport on air quality in cities. *Journal of Cleaner Production*, 240. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118192>
- MORELLA, P., LAMBÁN, M. P., ROYO, J., SÁNCHEZ, J. C. Evaluating the impact of new trends in urban freight transportation attending the triple bottom line: A case study. *Computers & Industrial Engineering* 174, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108756>.
- MUÑUZURI, J. & MUÑOZ-DÍAZ, M. Use of DEA to identify URBAN geographical zones with special difficulty for freight deliveries. *Journal of Transport Geography* 79, 2019.
- MUÑUZURI, J., CORTÉS, P., ONIEVA, L., & GUADIX, J. (2018). Application of supply chain considerations to estimate urban freight emissions. *Ecological Indicators*, 86, 35–44. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.12.030>
- MUÑUZURI, J., LARRAÑETA, J., ONIEVA, L. & CORTÉS, P. Solutions applicable by local administrations for urban logistics improvement. *Cities*, 22, 2005, p. 15-28.

MUÑUZURI, J., LARRAÑETA, J., ONIEVA, L., & CORTÉS, P. (2005). Solutions applicable by local administrations for urban logistics improvement. *Cities*, 22(1), 15–28. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2004.10.003>

MUÑUZURI, J.; CORTÉS, P.; ONIEVA, L.; GUADIX, J. Application of supply chain considerations to estimate urban freight emissions. *Ecological Indicators*, 86, 2018.

NAJAFP, THILL J-C, ZHANG W. Forma urbana em nível de cidade e segurança no trânsito: uma análise de modelagem de equações estruturais de efeitos diretos e indiretos. *Jornal de Geografia dos Transportes* 69, 2018.

NIKITAS, A.; MICHALAKOPOULOU, K.; NJOYA, E.T.; KARAMPATZAKIS, D. Artificial Intelligence, Transport and the Smart City: Definitions and Dimensions of a New Mobility Era. *Sustainability*, 12, 2020.

NIU, Y.-F., ZHAO, X., XU, X.-Z., & ZHANG, S.-Y. (2023). Reliability assessment of a stochastic-flow distribution network with carbon emission constraint. *Reliability Engineering & System Safety*, 230, 108952. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108952>

NUZZOLO, A., COMI, A., PAPA, E., 2014. Simulating the effects of shopping attitudes on urban goods distribution. *Procedia – Soc. Behav. Sci.* 111, 370–379.

OLIVEIRA, E.L., PORTUGAL, L. S., & PORTO JUNIOR, W. Indicators of reliability and vulnerability: Similarities and differences in ranking links of a complex road system, *Transportation Research A* 88, 2016.

OUYANG, M., ZHAO, L., HONG, L., & PAN, Z. Comparisons of complex network-based models and real train flow models to analyze Chinese railway vulnerability, *Reliability Engineering System Safety* 123, 2014.

OZCAN, B., APERGIS, N. The impact of internet use on air pollution: evidence from emerging countries. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 25, 2018.

PAMUCAR, D., DEVECI, M., GOKASAR, I., MARTÍNEZ, L., & KÖPPEN, M. (2022). Prioritizing transport planning strategies for freight companies towards zero carbon emission using ordinal priority approach. *Computers and Industrial Engineering*, 169. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108259>

PANI, A., SAHU, P. K., & HOLGUÍN-VERAS, J. (2021). Examining the determinants of freight transport emissions using a fleet segmentation approach. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 92. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102726>

PAPADOPOULOU, S., RONCOLI, C., BEKIARIS-LIBERIS, N., PAPAMICHAIL, I., PAPAGEORGIOU. Microscopic simulation-based validation of a per-lane traffic state estimation scheme for highways with connected vehicles. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. Volume 86, 2018, Pages 441-452.

PAPILLOU, T., & KEILER, M. Vulnerability patterns of road network to extreme floods based on accessibility measures, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Volume 100, 103045, ISSN 1361-9209, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.103045>.

PAPILLOU, T., KEILER, M. Vulnerability patterns of road network to extreme floods based on accessibility measures. *Transportation Research Part D* 100, 2021.

PARK, B. & KWAK, J. Calibration Validation of TRANSIMS Microsimulator for an Urban Arterial Network. *ESCE Journal of Civil Engineering*, Vol 15, No.6. Korean Society of Civil Engineers, July, 2011, pp. 1091-1100.

PORTA, S., LATORA, V., WANG, F., STRANO, E., CARDILLO, A., SCELLATO, S., IACOVIELLO, V. AND MESSORA, R. Street centrality and densities of retails and services in Bologna, Italy. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 36(3) pp.450–465. Ratti, C. Space syntax: some inconsistencies. Paper on Environment and Planning B: Planning and Design, volume 31, 2008, pages 487 – 499.

PORTA, S.; CRUCITTI, P.; LATORA, V. The network analysis of urban streets: a primal approach. *Environment and Planning B: Planning and Design*, v. 33, n. 5, p. 705-725, 2006.

POUPONNEAU, M., FORESTIER, B., & CAPE, F. (2019). Les zones à faibles émissions (low emission zones) à travers l'Europe: Déploiement, retours d'expériences, évaluation d'impacts et efficacité du système – rapport. Rincet Air: ADEME.

QUAK, H., & TAVASSZY, L. Customized solutions for sustainable city logistics: The viability of urban freight consolidation centres. In J. van Nunen, P. Huijbregts, & P. Rietveld (Eds.), *Transitions towards sustainable mobility*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011.

RAHIMI, A. M., DULEBENETS, M. A., MAZAHARI, A. Evaluation of Microsimulation Models for Roadway Segments with Different Functional Classifications in Northern Iran. *Infrastructures* 2021, 6, 46. <https://doi.org/10.3390/infrastructures6030046>.

RECKER, W.W., CHEN, C., MCNALLY, M.G. Measuring the impact of efficient household travel decisions on potential travel time savings and accessibility gains. *Transportation Research A* 35, 2021.

REGAL, A. Logistic Profile Generation via Clustering Analysis. *International Journal of Machine Learning and Computing*, 10, 2020. <https://doi.org/10.18178/ijmlc.2020.10.1.921>.

REGO, R. L., MENEGUETTI, K. S., & BELOTO, G. E. Morfologia urbana como instrumento projetual. *urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana*, 12, 2020. <https://doi.org/10.1590/2175-3369.012.e20190266>.

RENNE, J., WOLSHON, B., MURRAY-TUITE, P., & PANDE, A. Emergence of resilience as a framework for state departments of transportation (DOTs) in the United States, *Transportation Research D*, 2020

REUSS, M., WELDER, L., THÜRAUF, J., LINSSEN, J., GRUBE, T., SCHEWE, L., SCHMIDT, M., STOLTEN, D., & ROBINIUS, M. (2019). Modeling hydrogen networks for future energy systems: A comparison of linear and nonlinear approaches. *INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY*, 44(60), 32136–32150. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.10.080>

REYNAUD, F., SIDER, T., HATZOPOULOU, M., & ELURU, N. (2018). Extending the Network Robustness Index to include emissions: a holistic framework for link criticality analysis for Montreal transportation system. *Transportation Letters: The International Journal of Transportation Research*, 10(6), pp 302-315. <https://doi.org/10.1080/19427867.2016.1262980>

RINGSBERG, H., BRETTMO, A., BROWNE, M. Exploring Swedish urban freight *stakeholders'* interests in public spaces. *Cities* 133, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2022.104131>.

RUSSO, F.; COMI, A. Investigating the Effects of City Logistics Measures on the Economy of the City. *Sustainability*, 12, 2020.

RUSSO, F.; COMI, A. Sustainable Urban Delivery: The Learning Process of Path Costs Enhanced by Information and Communication Technologies. *Sustainability* 2021.

RYMANIAK, L., MERKISZ, J., SZYMLET, N., KAMINSKA, M., & WEYMANN, S. (2021). Use of emission indicators related to CO<sub>2</sub> emissions in the ecological assessment of an agricultural tractor. *EKSPLOATACJA I NIEZAWODNOSC-MAINTENANCE AND RELIABILITY*, 23(4), 605–611. <https://doi.org/10.17531/ein.2021.4.2>

SAHOO, M., GUPTA, M., SRIVASTAVA, P. Does information and communication technology and financial development lead to environmental sustainability in India? An empirical *insight*. *Telematic Information* 60, 2021.

SAIDI, S., HAMMAMI, S. Modeling the causal linkages between transport, economic growth and environmental degradation for 75 countries. *Transportation Research Part D* 53, 2017.

SANCHEZ-DIAZ, I., HOLGUIN-VERAS, J., WANG, C. Assessing the Role of Land-Use, Network Characteristics, and Spatial Effects on Freight Trip Attraction, 2013.

SANTOS, J. E. D. Análise da vulnerabilidade de rotas do transporte urbano de carga: uma abordagem baseada na medição do risco de um evento não regular e imprevisível. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2016.

SAVADOGO, I., GARDRAT, M., & KONING, M. (2023). Environmental and economic evaluation of a low emission zone for urban freight transport. *Research in Transportation Economics*, 102. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2023.101369>

SHABANPOUR, R., GOLSHANI, N., TAYARANI, M., AULD, J., MOHAMMADIAN, A.K., 2018. Analysis of telecommuting behavior and impacts on travel demand and the environment. *Transp. Res. Part D Transp. Environ* 62, 563–576.

SHEN, Q. Location characteristics of inner-city neighbourhoods and employment accessibility of low-wage workers. *Environment and Planning B* 25, 1998.

SHUANG Q, ZHANG M, YUAN Y. Node vulnerability of water distribution networks under cascading failures. *Reliability Engineering System Safety*, 2014.

SILVA, C., BERTOLINI, L., PINTO, N. *Designing Accessibility Instruments*. Taylor & Francis Group. 2019.

SINGH, P., SINHA, V. S. P., VIJHANI, A., & PAHUJA, N. Vulnerability assessment of urban road network from urban flood, *Int. J. Disaster Risk Reduction*. 2018.

SNELDER, M.; VANZUYLEN, H. J.; IMMERS, L. H. A framework for robustness analysis of road network for short term variations in supply, *Transportation Research Part A*, v. 46, n. 5, 2012, p. 828-842.

SOUSA, R. S., BOUKERCHE, A., LOUREIRO, A. A. F. A distributed and low-overhead traffic congestion control protocol for vehicular ad hoc networks. *Computer Communications* 159, 2020.

- SOUSA, R. S., BOUKERCHE, A., LOUREIRO, A. A. F. DisTraC: A distributed and low-overhead protocol for traffic congestion control using vehicular networks, in: 2019 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC), IEEE Computer Society, Washington, DC, USA, 2019, pp. 1–6.
- SU, Z., LI, L., PENG, H., KURTHS, J., XIAO, J., & YANG, Y. Robustness of interrelated traffic networks to cascading failures, *Science Rep.* 4, 2014.
- SUGIURA, S., CHEN, A. Vulnerability analysis of cut-capacity structure and OD demand using Gomory-Hu tree method. *Transport. Res. Part B: Methodol.* 153, 2021, 111–127.
- SULLIVAN, J.L.; NOVAK, D.C.; AULTMAN-HALL, L.; & SCOTT, D.M. Identifying critical road segments and measuring system-wide robustness in transportation networks with isolating links: a link-based capacity-reduction approach. *Transportation Research Part A* 44, 2010, 323–336.
- SUN, D. J., & GUAN, S. Measuring vulnerability of urban metro network from line operation perspective, *Transp. Res. A* 94 (800), 2016, 348–359.
- SUN, W., BOCCHINI, P., & DAVISON, B. D. Resilience metrics and measurement methods for transportation infrastructure: the state of the art, *Sustainable Resilience Infrastructure* 5 (3), 2020, 168–199.
- TALEN, E., Neighbourhoods as Service Providers: a methodology for evaluating pedestrian access, *Environment and Planning B*, 30, 2003, pp. 181–200.
- TANG, L. C., & LOW, J. M. W. (2020). Strategic intent of OBOR: enhancing energy supply resilience. *Journal of Shipping and Trade*, 5(1), p 3. <https://doi.org/https://doi.org/10.1186/s41072-020-0058-1>
- TANIGUCHI, E., THOMPSON, R. G., & YAMADA, T. New Opportunities and Challenges for City Logistics. *Transportation Research Procedia*, 12, 2016, 5–13.
- TAYLOR, M. A. P.; SEKHAR, S. V. C.; D’ESTE, G. M. Application of accessibility-based methods for vulnerability analysis of strategic road networks. *Networks and Spatial Economics*, v. 6, n. 3–4, 2006, p. 267–291.
- TESTA, A.C., FURTADO, M.N., & ALIPOUR, A. Resilience of coastal transportation networks faced with extreme climatic events, *Transportation Research Rec.* 2015, 2532 29–36.
- TETER, J., *Tracking Transport 2020*, IEA: International Energy Agency. France. Retrieved From <https://policycommons.net/artifacts/1343391/tracking-transport-2020/1955535/> em 21 Fevereiro 2024. CID: 20.500.12592/k9qqc5.
- THAKER, P., GOKHALE, S. The impact of traffic-flow patterns on air quality in urban street canyons. *Environ. Pollut.* 208, 2016, 161–169.
- THOMPSON, R.G.; ZHANG, L. Optimising courier routes in central city areas. *Transportation Research Part C Emergency Technological*, 93, 2018, 1–12.
- TSITSOKAS, D., KOUVELAS, A., GEROLIMINIS, N. Modelagem e otimização da alocação de espaço de corredores de ônibus dedicados em grandes redes com congestionamento. *Transportation Research Part C*, 127, 2021, 103082.

TWUMASI-BOAKYE, R., SOBANJO, J.O. Resilience of regional transportation networks subjected to hazard-induced bridge damages. *J. Transport. Eng., Part A: Syst.* 144 (10), 2018, 1–13.

ULAK, M.B., KONILA, S. L. M., KOCATEPE, A., OZGUVEN, E. E., & ARGHANDEH, R. Resilience characterization for multi-layer infrastructure networks, *IEEE Intelligence Transportation Systems Mag.*, 2021, 2–13.

UNTERRADER, S., ALMOND, P., FUCHS, S. Rockfall in the Port Hills of Christchurch: seismic and non-seismic fatality risk on roads. *N. Z. Geog.* 74, 2018, 3–14.

VAN WEE, B. Accessibility and mobility: Positional goods? A discussion paper. *Journal of Transport Geography* 92, 2019, 103033. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2021.103033>.

VAN WEE, B. Evaluating the impact of land use on travel behaviour: the environment versus accessibility. *Journal of Transport Geography* 19, 2011, 1530–1533. doi:10.1016/j.jtrangeo.2011.05.011.

van WEE, B., JANSE, P., & van DEN BRINK, R. (2005). Comparing energy use and environmental performance of land transport modes. *Transport Reviews*, 25(1), 3–24. <https://doi.org/10.1080/014416410001676861>

van WEE, B., LIAO, F. Accessibility measures for robustness of the transport system. Paper Presented at the International Workshop on ‘Low-carbon Cities: Land Use and Transportation Intervention’ at Xi’an, Shaanxi Province, China, June 12–13, 2014.

Van WEE, B. Accessible accessibility research challenges. *Journal of Transport Geography* 51, 2016, 9-16.

VENTURA, L. M. B., RAMOS, M. B., D’AGOSTO, M. de A., & GIODA, A. (2021). Evaluation of the impact of the national strike of the road freight transport sector on the air quality of the metropolitan region of Rio de Janeiro, Brazil. *Sustainable Cities and Society*, 65. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102588>

VILARINHO, C., SOARES, G., MACEDO, J., TAVARES, R., ROSSETTI, R. J. F. Capability-Enhanced AIMSUN with Real-Time Signal Timing Control. EWGT2013 – 16th Meeting of the EURO Working Group on Transportation. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 111, 2014, 262 – 271.

VIVEK, S., CONNER, H. Urban Road network vulnerability and resilience to large-scale attacks. *Safety Science*, 2022, 147. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105575>.

WADDELL, P. Towards a behavioural integration of land use and transportation modelling. In: Hensher, D.A. (Ed.), *Travel Behaviour Research. The Leading Edge*. Pergamon, Amsterdam, 2001, pp. 65–95.

WAN, C., YANG, Z., ZHANG, D., YAN, X., & FAN, S. Resilience in transportation systems: a systematic review and future directions, *Transp. Rev.*, 2018, 38 (4) 479–498.

WAN, C.; WANG, Y.; ZHANG, D. Quantitative assessment of the resilience of urban road networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 100, p. 318-334, 2019.

WANG, X., KOÇ, Y., DERRIBLE, S., AHMAD, S.N., PINO, W.J., & KOIJ, R.E. Multi-criteria robustness analysis of metro networks, *Physical A*, 2017, 474.

WEI DQ, LUO XS, ZHANG B. Analysis of cascading failure in complex power network under the load local preferential redistribution rule. *Physic A*, 2012, 391(8):2771–7.

WEN, L., & SONG, Q. (2022). Simulation study on carbon emission of China's freight system under the target of carbon peaking. *Science of the Total Environment*, 812. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152600>

WISMANS, L., ROMPH, E., FRISO, K., ZANTEMA, K. Real time traffic models, decision support for traffic management. 12th International Conference on Design and Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning, DDSS. *Procedia Environmental Sciences* 22, 2014, 220–235.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. WHO Methods and Data Sources for Global Burden of Disease Estimates 2020–2031. Department of Health Statistics and Information Systems, Geneva. November 2020. World Health Organization, 2020.

WORLD RESOURCES INSTITUTE. WRI Climate Watch Historical Country Greenhouse Gas Emissions Data (1990–2018). Historical country-level and sectoral transport GHG emission data, 2020.

XU, J., SALEH, M., WANG, A., Tu, R., & Hatzopoulou, M. (2019). Embedding local driving behavior in regional emission models to increase the robustness of on-road emission inventories. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 73, pp 1–14. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.05.011>

YABE, T., RAO, P. S. C., & UKKUSURI, S. V. Regional differences in resilience of social and physical systems: Case study of Puerto Rico after Hurricane maria, *Environmental Planet*, 2020. B 2399808320980744.

YAN, S., de BRUIN, K., DENNEHY, E., & CURTIS, J. (2021). Climate policies for freight transport: Energy and emission projections through 2050. *Transport Policy*, 107, 11–23. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2021.04.005>

YANG, Y., LIU, Y., ZHOU, M., LI, F., & SUN, C. Robustness assessment of urban rail transit based on complex network theory: A case study of the Beijing Subway, *Safety Science*, 2015, 79 149–162.

YANG, Y., NG, S. T., ZHOU, S., XU, J., LI, H. Physics-based resilience assessment of interdependent civil infrastructure systems with condition-varying components: A case with stormwater drainage system and road transport system. *Sustainable Cities and Society* 54, 101886. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101886>.

ZHANG, X., MILLER-HOOKS, E., & DENNY, K. Assessing the role of network topology in transportation network resilience, *Journal Transportation Geography*, 2015, 46 35–45.

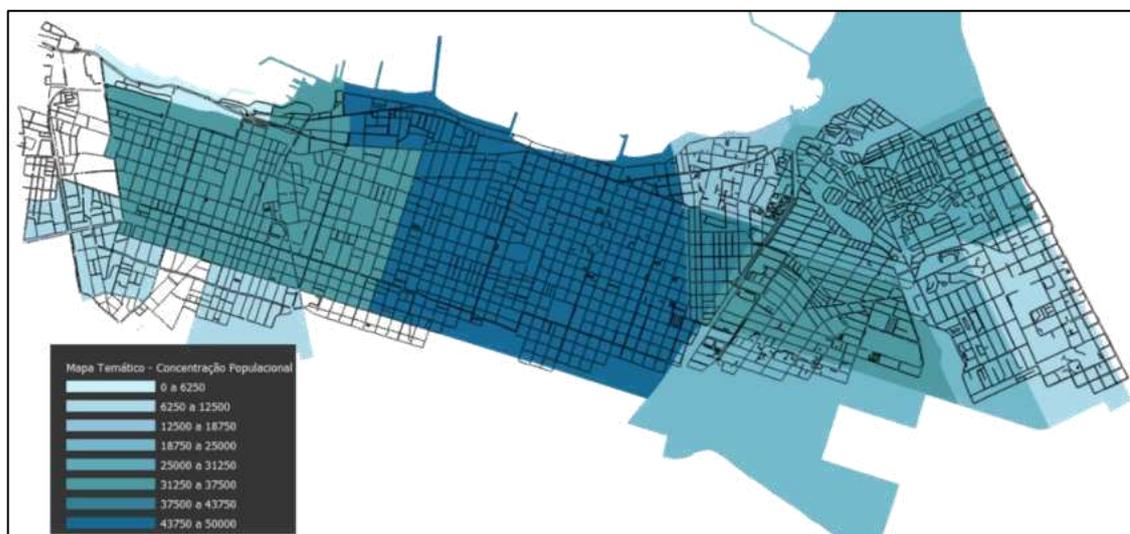
ZHONG J, SANHEDRAI H, ZHANG FM, YANG Y, GUO S, YANG S, LI D. Network endurance against cascading overload failure. *Reliability Engineering System Safety*, 2020, 201:106916.

ZHOU, T., ROORDA, M.J., MACLEAN, H.L., LUK, J., 2017. Life cycle GHG emissions and lifetime costs of medium-duty diesel and battery electric trucks in Toronto, Canada. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 55, 91–98. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.06.019>.

ZHOU, Y., WANG, J., & HUANG, G. Q. Efficiency and robustness of weighted air transport networks, *Transportation Research, E*, 2019, 122.

## APÊNDICE A – MAPAS TEMÁTICOS PRODUZIDOS NO SOFTWARE AIMSUN® SOBRE AS CARACTERÍSTICAS DA CIDADE DE FORTALEZA, CEARÁ.

Figura 3.22 - Mapa temático concentração populacional.



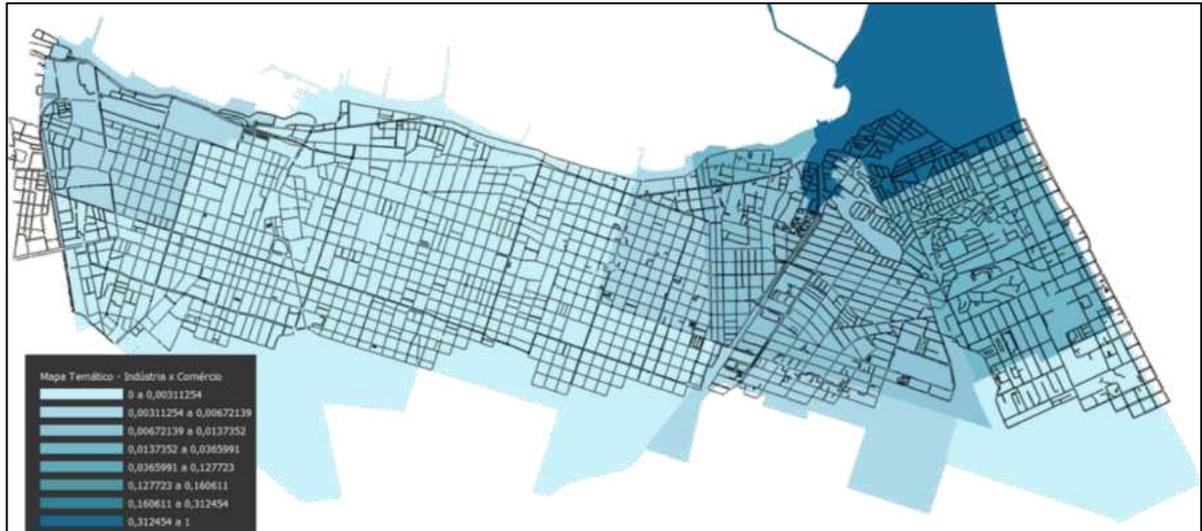
Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

Figura 3.23 - Mapa temático renda média.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

Figura 3.24 - Mapa temático predominância de atividade: industrial x comercial.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

APÊNDICE B - TABELA 3.6 - LEVANTAMENTO DOS LINKS COM FLUXOS ACIMA DE 900 VPH ENTRE ROTAS DOS PARES OD.

Área	Regular	Regular	Regular	Irregular	Irregular	Regular	Regular	Regular	Regular	Irregular	Irregular	Irregular
Par OD	01-02	01-03	01-04	01-05	01-06	01-07	02-01	02-03	02-04	02-05	02-06	02-07
	9463	8519	10350	10811	7575	7647	7387	7659	10303	8234	10140	8433
	10524	7097	9258	9833	7840	10217	8868	8123	9450	8334	8823	8546
	7297	8523	7421	10189	10168	8348	11054	8050	9255	10040	7138	10442
	8005	8939	11324	7072	8441	9132	10168	9960	8849	9671	10502	9933
	11147	8370	7691	9394	9688	8639	11172	8316	11251	11121	7472	8165
	8083	7834	8069	17897	7220	9475	11282	9980	10430	9006	11266	10363
	10797	7856	8804	10621	7737	7174	11142	8407	9037	8611	7361	8016
	9490	9114	8108	11319	9169	9498	10203	9401	7082	9408	7271	7029
	9612	8715	8516	11520	7876	7147	7446	10446	9427	7902	7924	9157
	7673	9295	10477	7293	19757	8514	8735	10517	9689	9127	7315	7267
	9356	9405	9268	8912	8660	9756	10060	10220	9030	8913	11365	8642
	8627	8132	8464	11117	10823	8111	9488	8670	11204	9860	8523	10049
Link	9108	9593	8007	10087	9031	8847	8374	10237	10918	8907	9449	10353
	8320	7605	9772	10160	11117	9963	8226	11238	11162	8022	11117	9553
	6948	10866	8395	10128	11319	11187	7899	7278	10042	9610	8399	9944
	11014	10931	7174	10252	7878	7634	9890	10462	7770	10129	7978	7829
	10223	9757	9953	9169	7498	11319	7330	9415	8257	10421	8527	9793
	11498	10324	11319	7261	10719	11124	8442	10047	8407	11117	8909	7203
		10457	9778	8344	11051	8776	10052	9968	8143	11396	7544	6996
		9423	9855	10298	9383	8548	7775	7807	10640	7616	7550	10528
		7668	11416	7241	7069	11117	8326	9976	8951	7858	11381	8230
		9159	7292	10012	8605	11028	9684	10744	10744	10669	7876	11300
			9062	9914	9902	7594	8838	7586	10053	9733		
			11156		8124	9534	8482	10091		10924		
			8617			9887	10889	9712		10833		

Área	Regular	Regular	Irregular	Irregular	Irregular	Irregular	Regular	Regular	Regular	Irregular	Irregular	Regular
Par OD	03-01	03-02	03-04	03-05	03-06	03-07	04-01	04-02	04-03	04-05	04-06	04-07
	7996	7648	8090	9470	11368	10141	9769	7389	8498	8448	8457	10554
	9529	9803	9527	8399	10362	9772	9679	7809	10756	10818	10949	10928
	10804	10136	9403	6953	8292	6965	9062	6959	9522	8048	8311	10810
	7518	8131	9245	10972	6996	9048	8033	11306	7220	10309	7649	10559
	8802	8683	7783	9513	9973	8881	7091	7871	8906	7479	7049	10496
	11430	7666	10222	8577	8811	9722	8425	7904	10042	11454	9311	9825
	7296	7044	11234	8896	11317	7716	10420	9476	7975	10384	7697	10667
	8576	7303	9508	10687	7661	8212	7327	7256	8276	11150	7234	9845
	9906	9432	9856	9357	7490	10244	7957	7765	6994	11059	11458	8223
	9512	8486	7074	7822	8389	10672	11298	7589	9758	7366	7152	8485
	9248	7812	7503	10811	11224	7244	7804	10234	8089	8929	8005	9267
	9604	8442	7079	9322	9804	11318	8626	10716	10424	10646	7947	7385
	9190	10098	8308	9752	10415	11452	7601	11337	7239	11198	10635	8720
	9262	9350	7182	10511	8663	9028	8380	8928	9042	8089	10153	9481
	10241	9794	9615	11333	11478	7692	7825	10289	9807	10858	7223	7580
	7999	6947	9281	10422	11400	9438	10206	9101	9830	10424	10114	9304
<b>Link</b>	8350	10104	9976	9720	11272	10346	7032	10476	8508	7738	10228	8932
	8620	11408	8498	9145	7814	8341	9842	8349	10054	10119	9426	8501
	9019	10948	9293	9758	11162	9504	11018	11222	9948	11262	7732	8906
	7466	6973	10226	9997	10632	7778	10139	6950	7130	9888	10085	7629
	9302	9365	8570	11191	11173	11287	7902	8764	11375	7520	9853	9913
	11302	9115	9328	9166	7246	10478	9553	11406	10663	8039	7664	9116
	8738	10288	9312	9832	11502	8285	7808	8338	11492	8321	7097	9222
	10016	8671	9710	9756	8297	7280	7426	8298	7767	7768	7726	10745
	8499	11030	8741	8347	7148	10893	8025	8148	7727	8713	10414	9369
	10092	10360	8965	11069	10965	10824	7464	8979	10923	8461	11470	10330
	7756	10713	8922		8438	9607	7512	10693	11288	7429	7699	10470
	11343	9024	10559		10615	7939	10916	8799	9083	9944	11206	9395
	7790	8415	10710		11148	9597	9949	10498	8851	9780	10335	
		7128	8258		9885	7123	9168			10316	10754	
		7269			11291	11208	7171			9451	7975	
		7496			10302		10417				9119	
		10443			9997		10766					

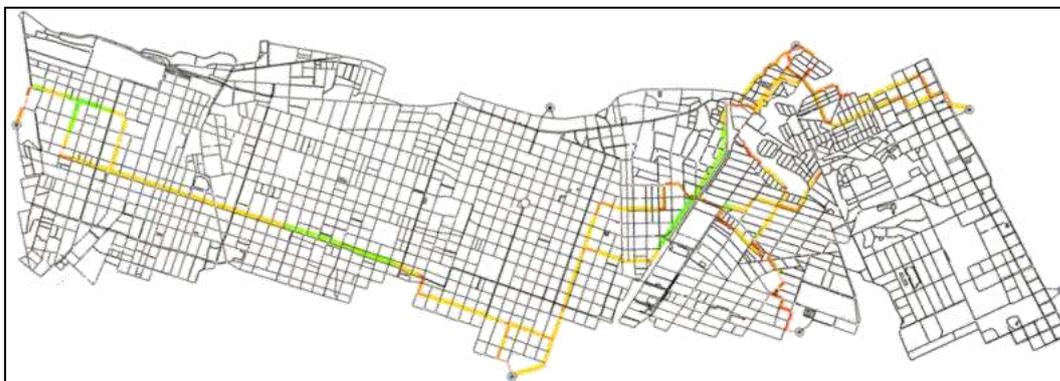
Área	Regular	Irregular	Irregular	Irregular	Irregular	Irregular	Regular	Irregular	Irregular
Par OD	05-01	05-02	05-03	05-04	05-06	05-07	06-01	06-02	06-03
	7803	10644	7104	9825	8861	8152	8857	9619	10197
	9430	7134	10142	10289	8442	11406	10594	7302	10964
	8338	9688	9489	9391	8808	10452	9594	11306	7743
	10431	8004	9404	7474	11151	10557	7693	10289	8075
	7228	10477	10701	11287	7831	11480	7816	10722	11037
	9820	8647	10659	7383	7174	7383	7439	9742	8663
	9701	8457	9727	8585	8489	10849	9156	8432	8571
	8532	7277	8749	9333	7383	8858	7863	10645	7383
	9356	9408	7383	9635	11468	10384	8381	10987	10073
	10342	11058	10980	8105	8473	11464	8121	8917	11144
	7709	9274	11311	8710	7337	8489	9385	9305	10562
	11117	9514	10012	8128	10619	11411	9162	9145	10963
	9297	10648	9390	8627	11253	7687	10110	10464	10358
	11196	7383	7304	7645	9515	8215	8319	7492	8673
	10966	10949	11198	8700	7229	7578	10507	10838	11396
	7383	9703	7927	9166	11109	10042	8501	8379	10500
Link	10351	8860	11067	9997	10681	7749	11117	7017	9551
	9387	11449	10649	11117	10782	7244	8869	7416	7061
	10650	9397	8895	7739	11205	9769	10496	9249	8634
	9098	11117	8772	11450	8680	10452	9399	9533	8138
	8394	7459	9060	10481	10333	10181	9395	11376	11368
	10739	6976	9885	7348	9219	7618	9494	8108	8773
	7495	9179	8988	9188	10376	10630	8609	8908	7271
	9154	8482	8889	8207	10781	11267	10220	11117	11296
	8039	7796	9766	10923	7910	10508	8020	9242	10023
	8067	10077	8617	11154	7142	8846	7167	11176	8835
	8594	8067	8999	7870	7236	11493	9409	11252	8797
	7650	8513	8929	7549	10324	9790	11274	7431	7520
	10324	7454	9917	11170	7461	9173	10216	8739	10316
		7686	9777	9236		7357	8727	10307	
		11254	8081	11030		10575	8430	11223	
		10431	9735			8876	10144	7805	
		8294	11022			7972		7686	

Área	Irregular	Irregular	Regular	Regular	Regular	Regular	Regular	Irregular	Irregular
Par OD	06-04	06-05	06-07	07-01	07-02	07-03	07-04	07-05	07-06
	10886	9058	8901	9104	11462	11129	9853	8625	10851
	8736	9962	10057	7209	7180	9940	7356	7607	7567
	9252	7661	7167	9784	11337	7577	11464	7397	8539
	8272	8978	9935	10762	8378	10765	7276	9811	7773
	7889	7956	8764	9761	10955	7141	10484	7544	10677
	10696	8397	10222	7274	8758	7369	9005	10850	7423
	11381	11174	7729	7684	8969	11167	10422	9540	9236
	8728	9655	7159	7183	9356	11347	10531	9018	10605
	11441	7383	11448	7676	8767	7675	9970	7754	7042
	10688	7991	11277	10232	11363	9901	7832	9040	10330
	11464	10946	9854	11457	11413	9636	9369	9299	10262
	7878	8860	7326	7929	10508	11043	10827	8090	10729
	9431	10045	8053	9261	10322	10162	9833	9591	8006
	7992	10363	7611	10484	9197	10924	11401	8096	8619
	8311	7006	7241	8043	9502	11326	7630	10078	9504
	11471	11157	10898	7040	8752	7383	7520	7383	9619
<b>Link</b>	8079	10698	7744	7855	7205	11177	8454	9625	8277
	10457	11145	11360	7619	7201	11467	6976	8601	9019
	10793	9715	9598	8970	8488	8916	10648	7647	9239
	9676	11369	9306	7371	7263	10013	8057	8171	11275
	7316	10908	9511	8857	8603	10878	10984	10974	9206
	8186	8812	9955	7737	9654	7989	7147	9965	7088
	7787	9878	10550	9039	10490	8539	9795	9864	10195
	7595	9253	9759	8911	9238	11359	9230	8281	8545
	7989	7500	8495	9233	7680	9430	9822	8538	7645
	10165	10242	10034	6939	9534	8658	9898	8155	7953
	7575		11129	7508	7168	9573	9278	7485	7963
			8100	8191		11471	9299	7910	10982
			6966	10133		7955	6967	8715	10847
			9173				8206	8432	8920
			9283				8153	7307	10744
			9718				8727	11335	9434
								8338	10769
								7701	

Fonte: Elaborado pelo Autor

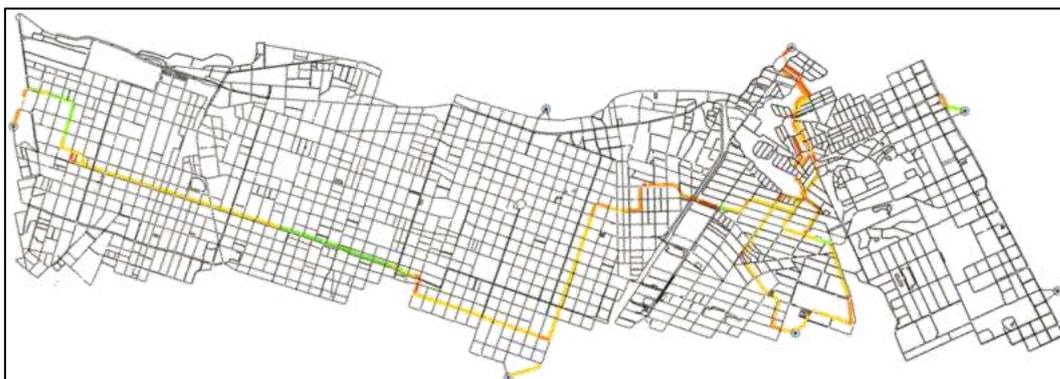
## APÊNDICE C – FIGURAS REFERENTES AO RESULTADO VISUAL DAS SIMULAÇÕES DOS CENÁRIOS DEFINIDOS

Figura 3.25 - Parâmetro Velocidade (km/h). Rede em condição normal. Intervalo: 14:00 às 16:00.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

Figura 3.26 - Parâmetro Velocidade (km/h). Link Interrompido (11117). Intervalo: 14:00 às 16:00.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

Figura 3.27 - Parâmetro Tempo de Atraso Simulado (segundos). Rede em condição normal. Intervalo: 14:00 às 16:00.



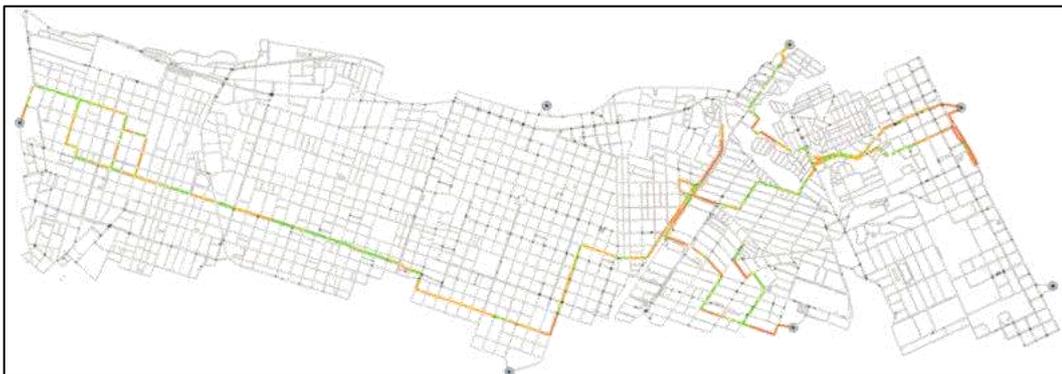
Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

Figura 3.28 - Parâmetro Tempo de Atraso Simulado (segundos). Link Interrompido 11117. Intervalo 14:00 às 16:00.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

Figura 3.29 - Parâmetro Tempo de Viagem (minutos). Link Interrompido 7383. Intervalo: 14:00 às 16:00.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

Figura 3.30 - Parâmetro Velocidade (km/h). Link Interrompido 7383. Intervalo: 14:00 às 16:00.



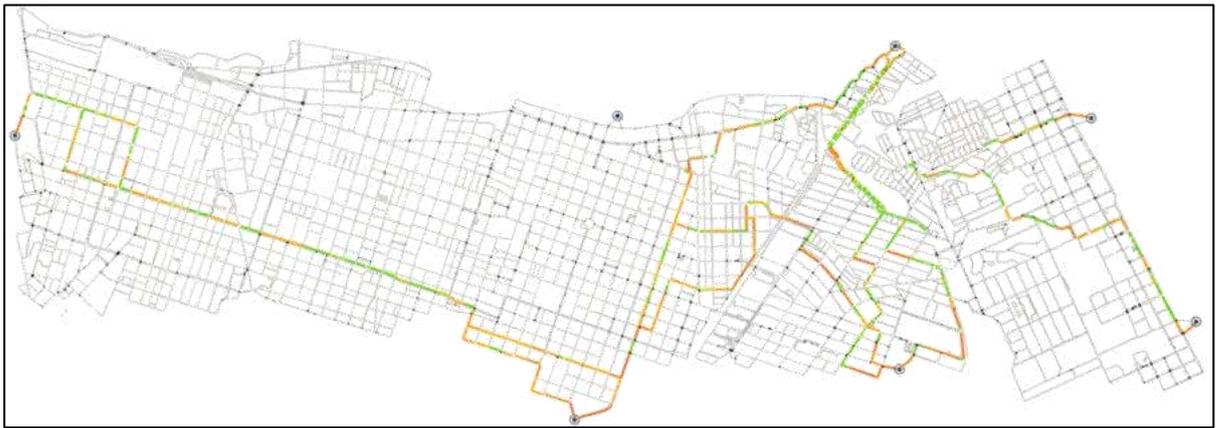
Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

Figura 3.31 - Parâmetro Tempo de Atraso (segundos). Link Interrompido 7383. Intervalo: 14:00 às 16:00.

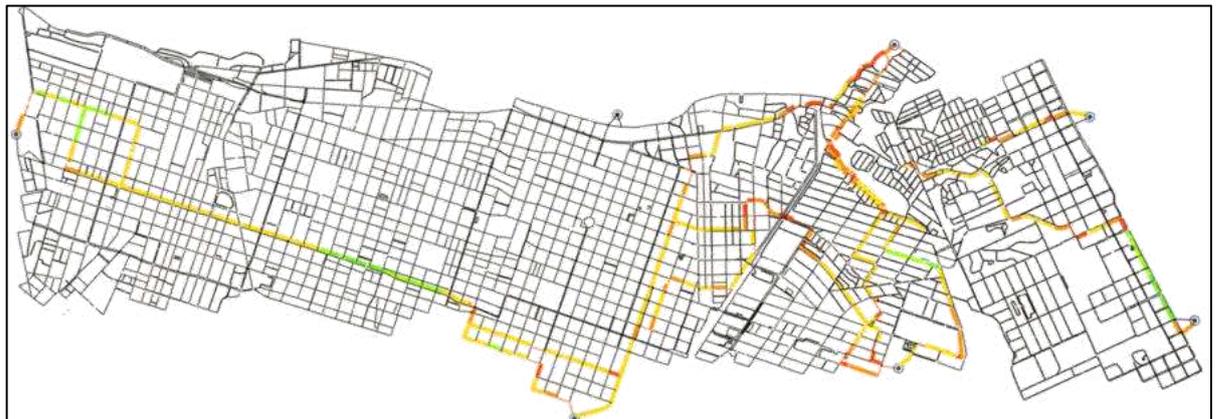


Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

Figura 3.32 - Simulação com dois links interrompidos (11117 + 7383). Intervalo: 14:00 às 16:00.



(a) Parâmetro: Tempo de Viagem (segundos).



(b) Parâmetro: Velocidade (km/h).



(c) Parâmetro: Tempo de Atraso (segundos).

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

Figura 3.33 - Comportamento do parâmetro Tempo de Viagem (minutos) em diferentes intervalos de medição.



(a) Primeiro intervalo: 08:00 - 10:00.



(b) Segundo intervalo: 10:00 - 12:00.

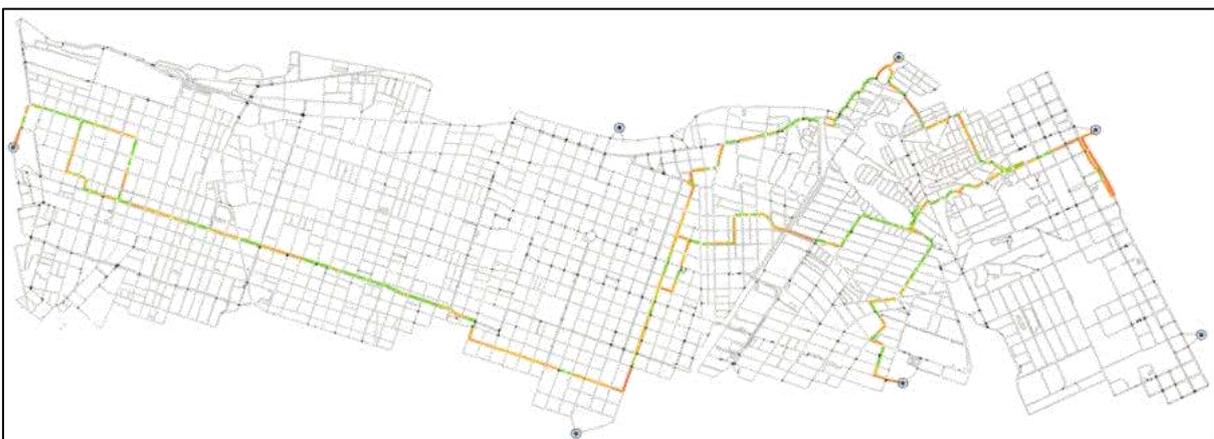


(c) Terceiro intervalo: 12:00 - 14:00.

Figura 3.34 - Comportamento do parâmetro Tempo de Viagem (minutos) em diferentes intervalos de medição.  
Link interrompido: 11117.



(a) Primeiro Intervalo: 08:00 – 10:00.



(b) Segundo Intervalo: 10:00 – 12:00.



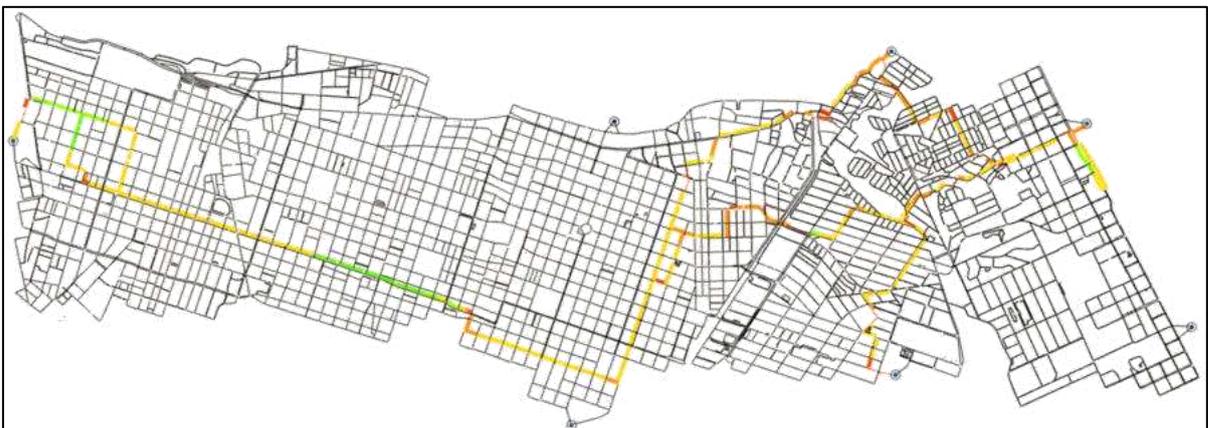
(c) Terceiro Intervalo: 12:00 – 14:00.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

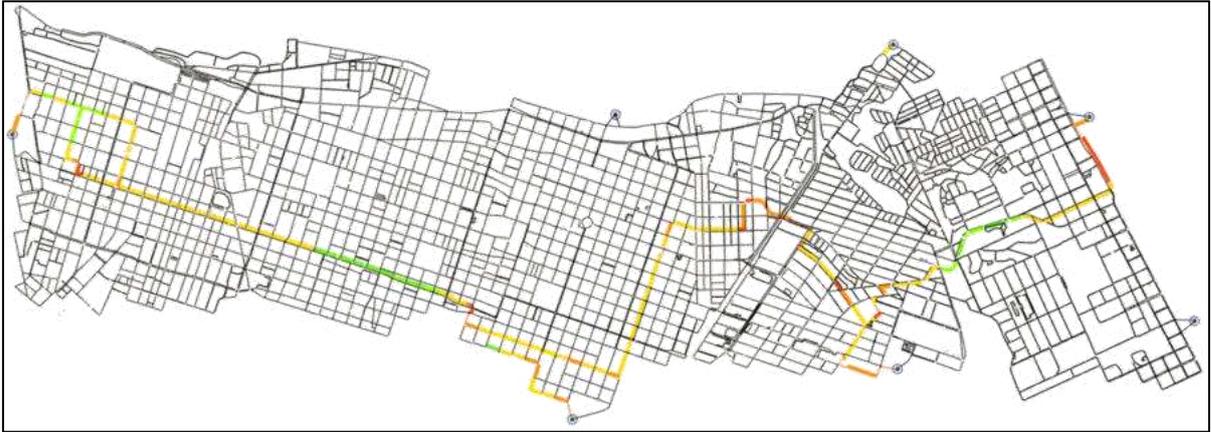
Figura 3.35 - Comportamento do parâmetro Velocidade (km/h) em diferentes intervalos de medição. Link interrompido: 11117.



(a) Primeiro Intervalo: 08:00 – 10:00



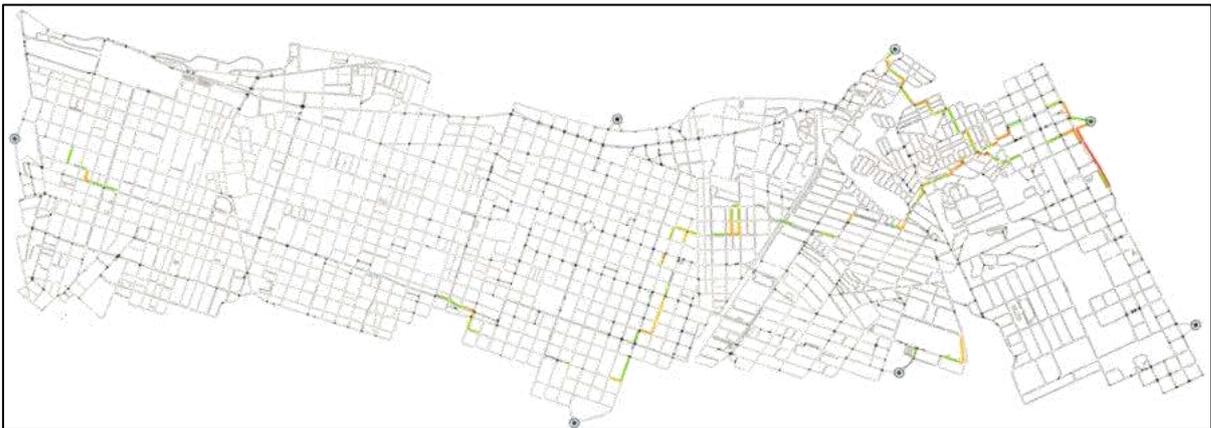
(b) Segundo Intervalo: 10:00 – 12:00



(c) Terceiro Intervalo: 12:00 – 14:00

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

Figura 3.36 - Comportamento do parâmetro Tempo de Atraso Simulado (segundos) em diferentes intervalos de medição. Link interrompido 11117.



(a) Primeiro intervalo: 08:00 – 10:00.



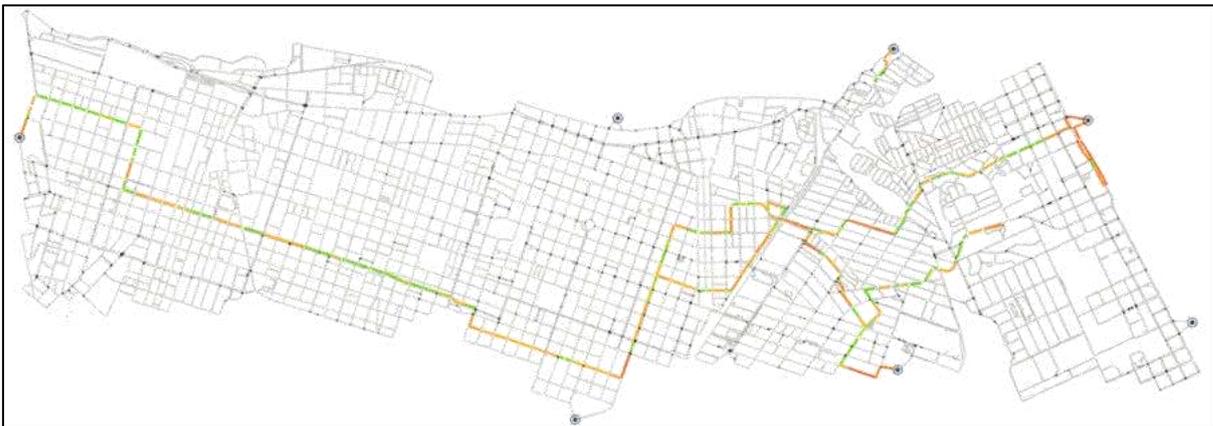
(b) Segundo intervalo: 10:00 – 12:00.



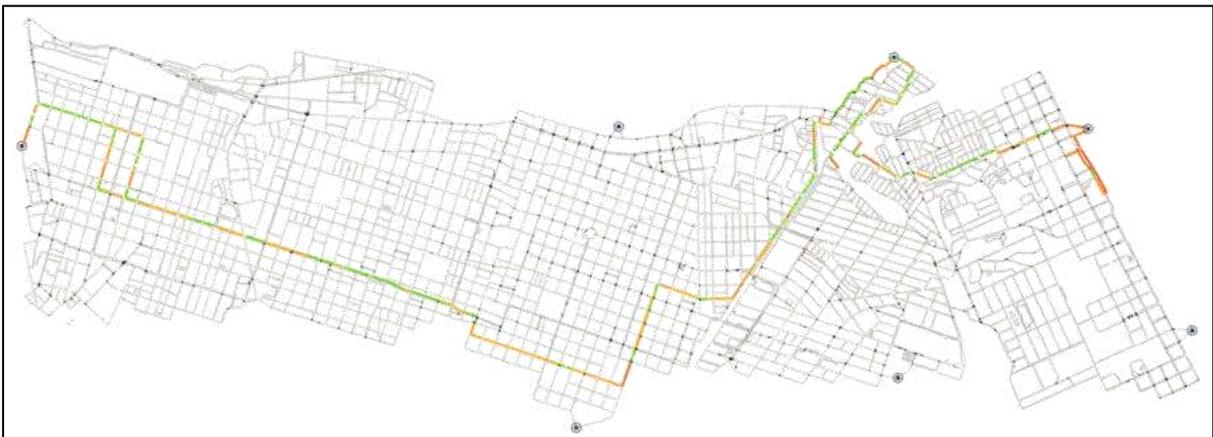
(c) Terceiro intervalo: 12:00 – 14:00.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

Figura 3.37 - Comportamento do parâmetro Tempo de Viagem (minutos) em diferentes intervalos de medição.  
Link interrompido 7383.



(a) Primeiro intervalo: 08:00 – 10:00.



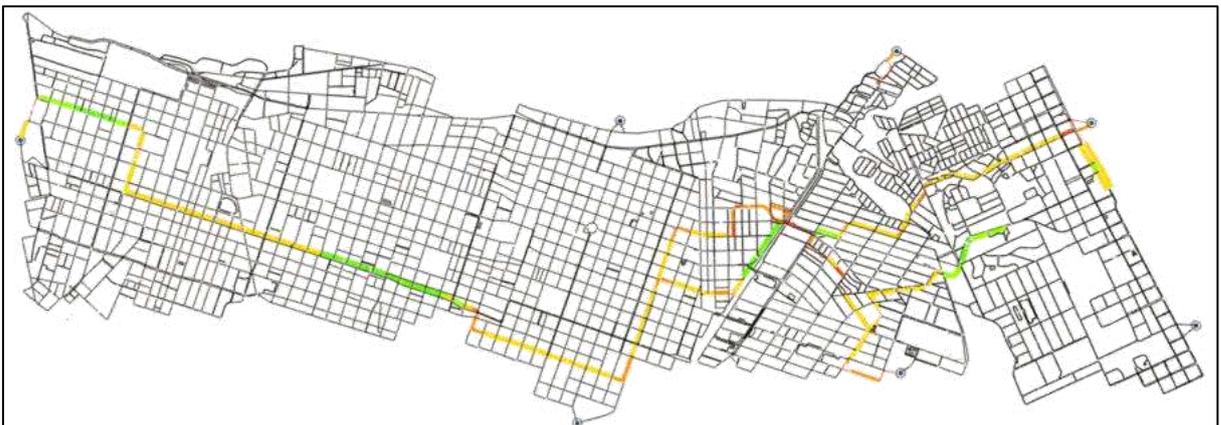
(b) Segundo intervalo: 10:00 – 12:00.



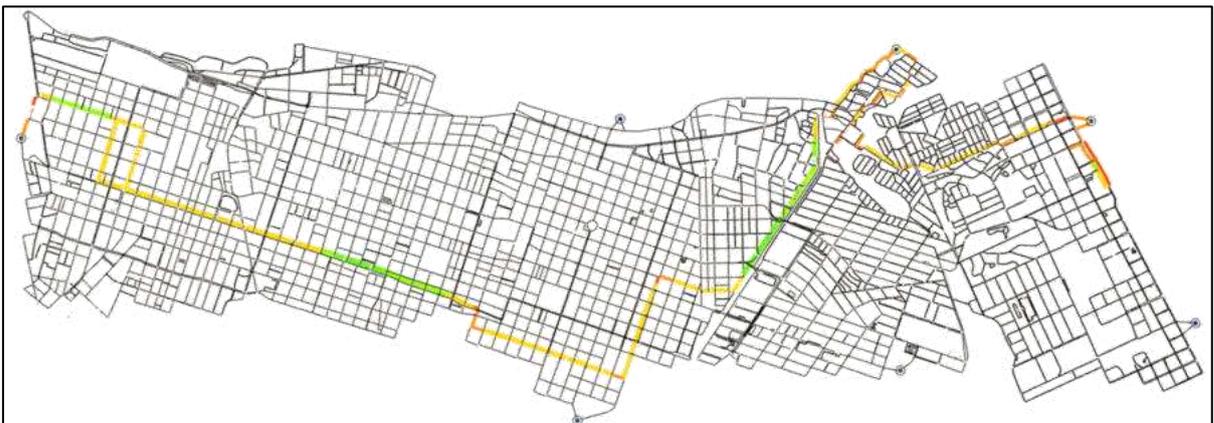
(c) Terceiro intervalo: 12:00 – 14:00.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

Figura 3.38 - Comportamento do parâmetro Velocidade (km/h) em diferentes intervalos de medição. Link Interrompido 7383.



(a) Primeiro intervalo: 08:00 – 10:00.



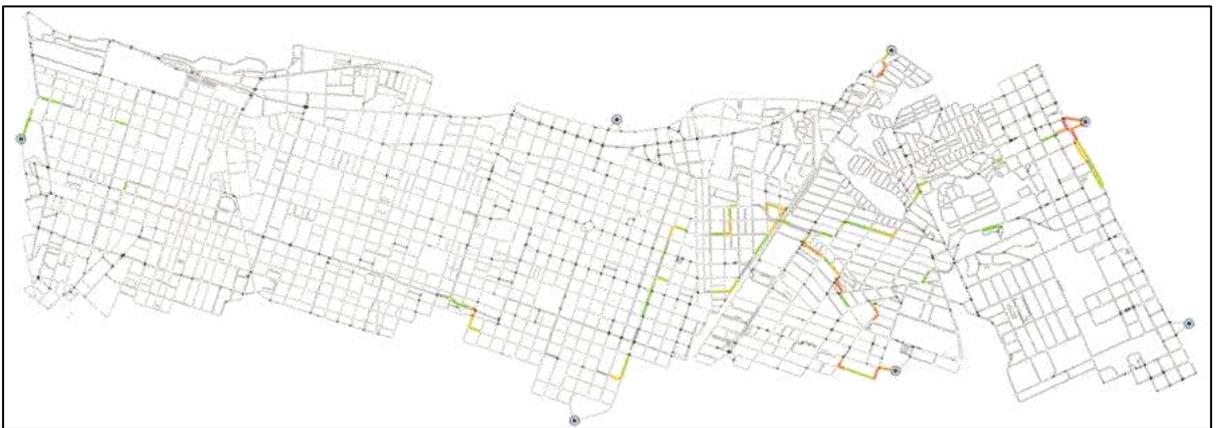
(b) Segundo intervalo: 10:00 – 12:00.



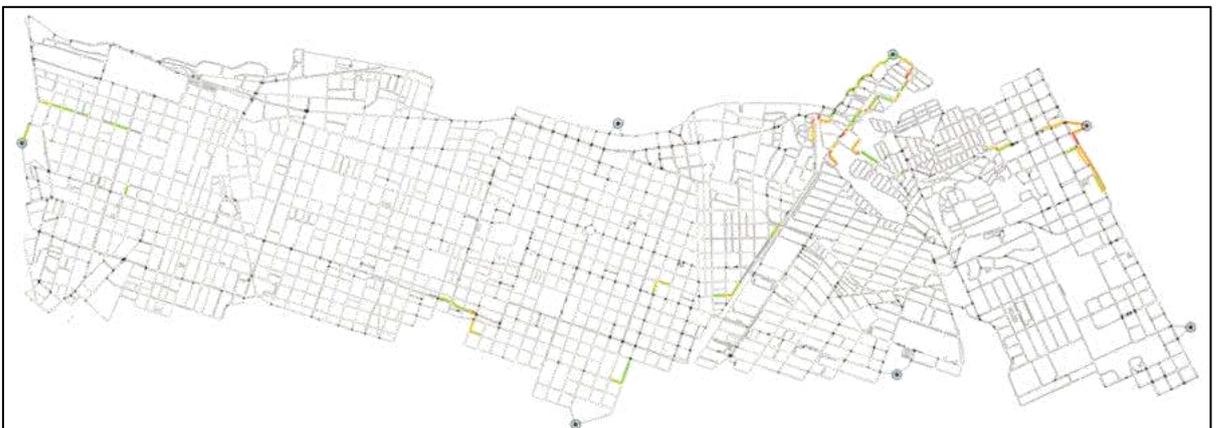
(c) Terceiro intervalo: 12:00 – 14:00.

Fonte: Elabora pelo Autor (2023).

Figura 3.39 - Comportamento do parâmetro Tempo de Atraso (segundos) em diferentes intervalos de medição. Link Interrompido 7383.



(a) Primeiro intervalo: 08:00 – 10:00.



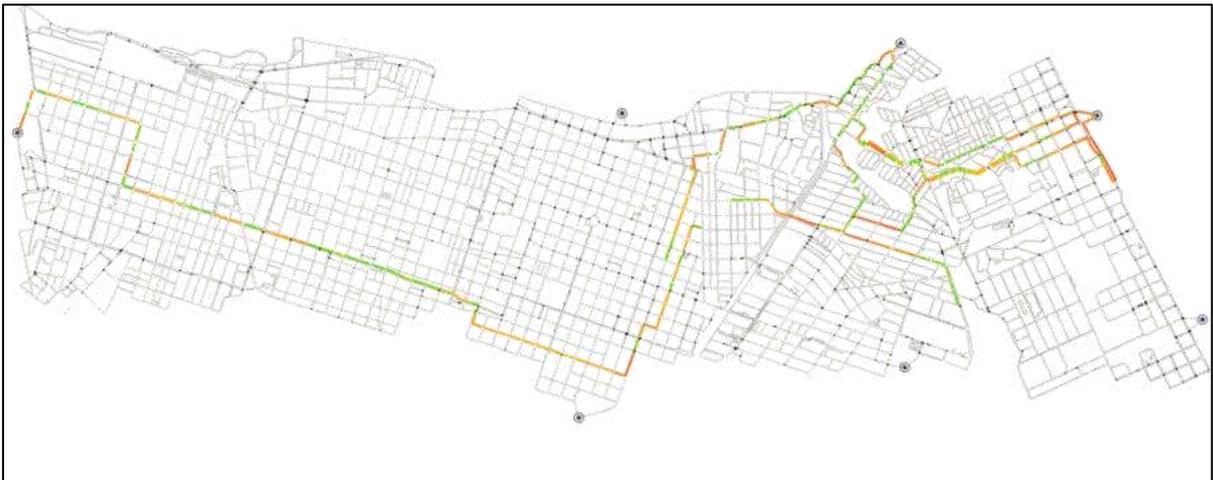
(b) Segundo intervalo: 10:00 – 12:00.



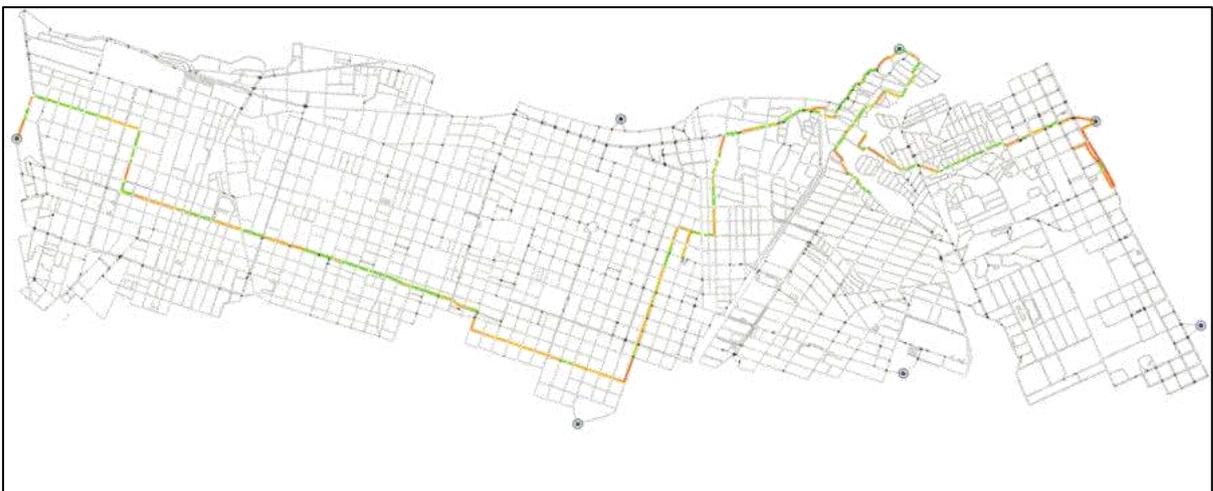
(c) Terceiro intervalo: 12:00 – 14:00.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

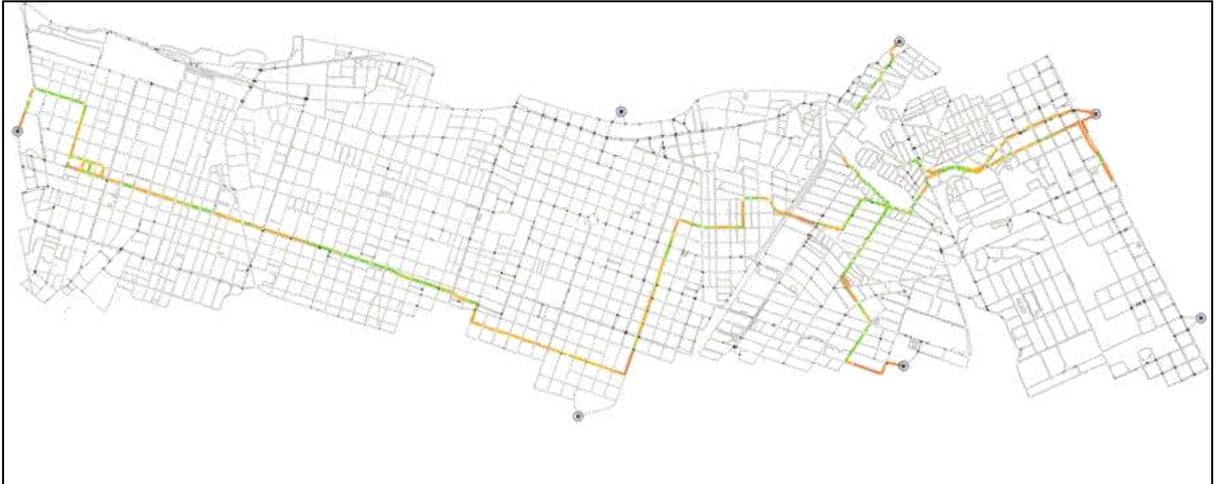
Figura 3.40 - Comportamento do parâmetro Tempo de Viagem (minutos) em diferentes intervalos de medição.  
Link interrompido: 11117 + 7383.



(a) Primeiro intervalo: 08:00 – 10:00.



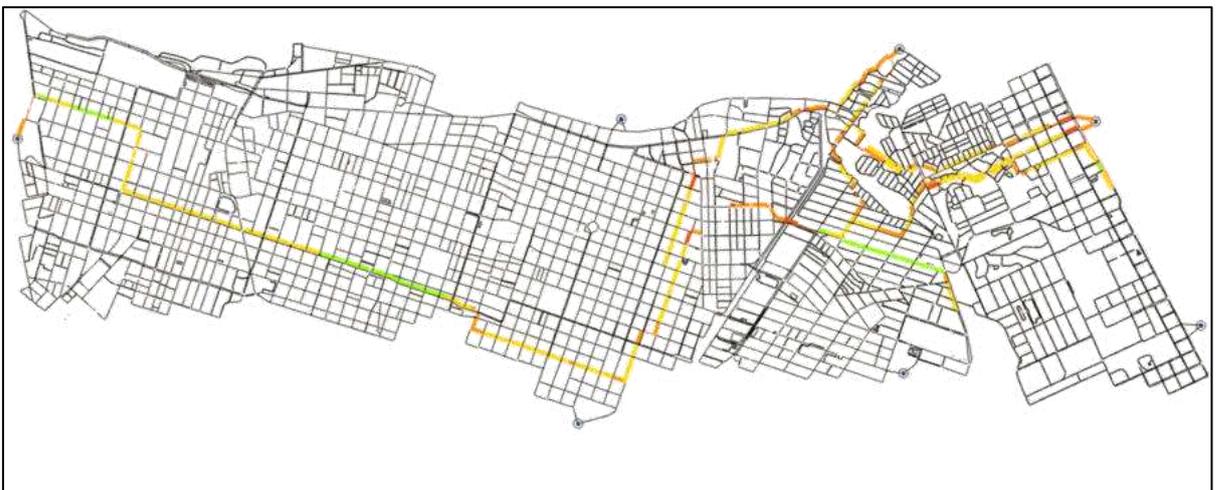
(b) Segundo intervalo: 10:00 – 12:00.



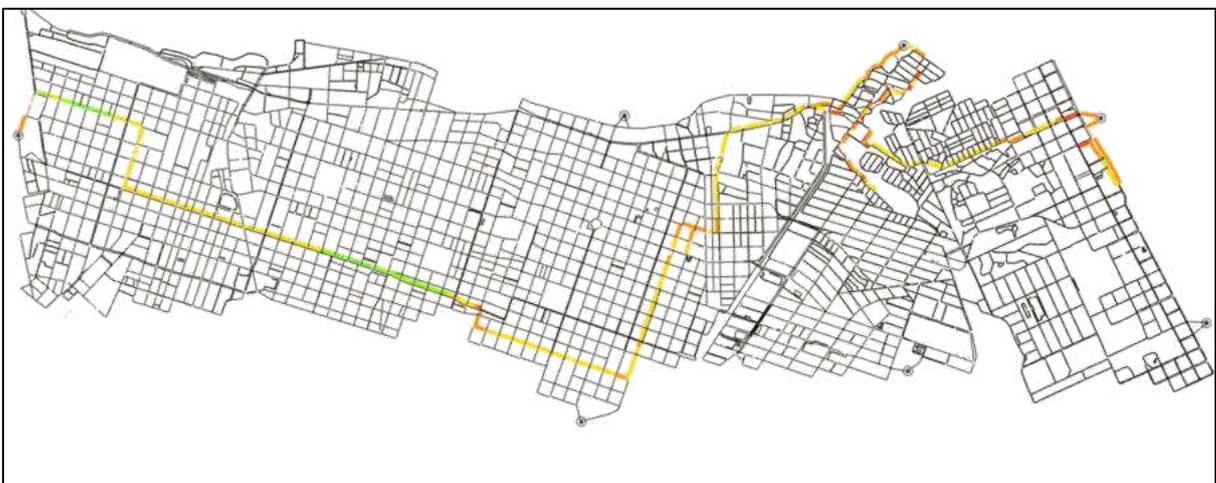
(c) Terceiro intervalo: 12:00 – 14:00.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

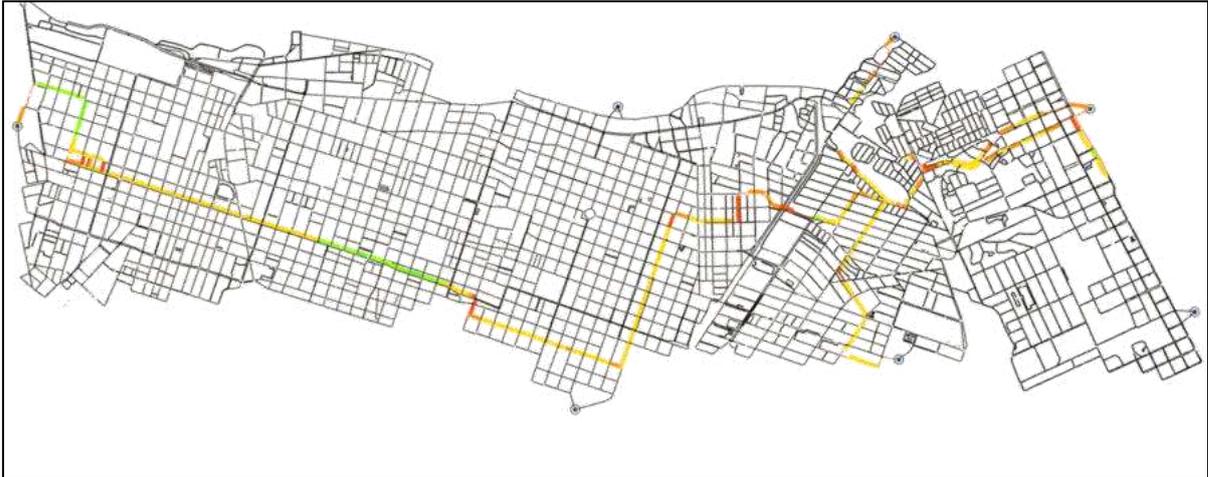
Figura 3.41 - Comportamento do parâmetro Velocidade (km/h) em diferentes intervalos de medição. Link interrompido: 11117 + 7383.



(a) Primeiro intervalo: 08:00 – 10:00.



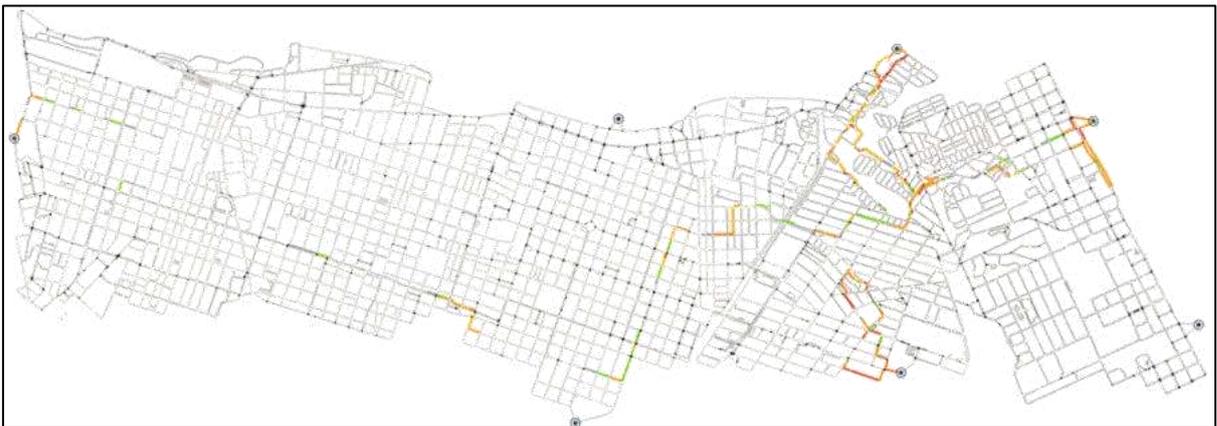
(b) Segundo intervalo: 10:00 – 12:00.



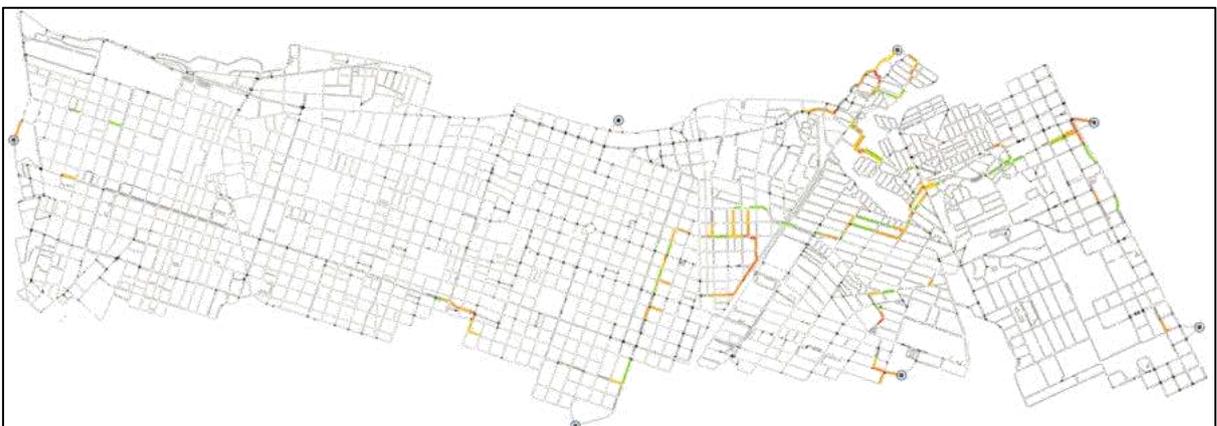
(c) Terceiro intervalo: 12:00 – 14:00.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

Figura 3.42 - Comportamento do parâmetro Tempo de Atraso (segundos) em diferentes intervalos de medição.  
Link interrompido: 11117 + 7383.



(a) Primeiro intervalo: 08:00 – 10:00.



(b) Segundo intervalo: 10:00 – 12:00.



(c) Terceiro intervalo: 12:00 – 14:00.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).