



APLICAÇÃO DE ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA VALIDAÇÃO DE PARÂMETROS NA MEDIÇÃO DE DESEMPENHO DA VULNERABILIDADE DA REDE VIÁRIA

APPLICATION OF STATISTICAL ANALYSIS FOR PARAMETER VALIDATION IN MEASURING ROAD NETWORK VULNERABILITY PERFORMANCE

APLICACIÓN DE ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LA VALIDACIÓN DE PARÁMETROS EN LA MEDICIÓN DEL DESEMPEÑO DE LA VULNERABILIDAD DE LA RED VIAL

João Evangelista Dantas dos Santos ^{1*} & Bruno Vieira Bertoncini ²

^{1,2} Universidade Federal do Ceará

^{1*} joaoevangelista@det.ufc.br ² bruviber@det.ufc.br

ARTIGO INFO.

Recebido: 23.05.2024

Aprovado: 04.06.2024

Disponibilizado: 08.06.2024

PALAVRAS-CHAVE: Vulnerabilidade da Rede Viária; Parâmetros de Desempenho; Análise Estatística; Topologia.

KEYWORDS: Road Network Vulnerability; Performance Parameters; Statistical Analysis; Topology.

PALABRAS CLAVE: Vulnerabilidad de la Red Vial; Parámetros de Desempeño; Análisis Estadístico; Topología.

*Autor Correspondente: Santos, J. E. D., dos.

RESUMO

A forma da rede viária influencia o tempo de viagem dos usuários em situações de interrupções. Estudos sobre a vulnerabilidade da rede viária geralmente não consideram essa característica, o que pode levar a conclusões incorretas. O objetivo deste trabalho é o de analisar o impacto da escolha do parâmetro de desempenho na avaliação da vulnerabilidade, utilizando redes regulares e irregulares como modelos. Para isso, este trabalho consistiu de uma revisão da literatura sobre topologia viária e vulnerabilidade da rede viária, da modelagem e simulação de dois cenários e da análise dos resultados utilizando estatística descritiva e testes paramétricos. O tempo de viagem se mostrou um parâmetro sensível à forma da rede, com a rede irregular apresentando tempos de viagem maiores que a rede regular. Já os parâmetros fluxo e velocidade não apresentaram diferenças significativas entre as redes. A escolha de parâmetros adequados é crucial para entender o impacto das interrupções no sistema de transporte. O tempo de viagem, sendo sensível à forma da rede, deve ser considerado no planejamento e na gestão de redes viárias. Os resultados deste estudo auxiliam nas decisões por parte dos gestores públicos, na comunicação com a sociedade e no desenvolvimento de cidades mais resilientes.

ABSTRACT

The form of the road network influences users' travel time in interruption situations. Studies on road network vulnerability generally do not consider this characteristic, which can lead to incorrect conclusions. The objective of this

work is to analyze the impact of choosing the performance parameter in the assessment of vulnerability, using regular and irregular networks as models. For this purpose, this work consisted of a literature review on road topology and road network vulnerability, modeling and simulation of two scenarios, and analysis of the results using descriptive statistics and parametric tests. Travel time proved to be a parameter sensitive to the form of the network, with the irregular network showing longer travel times than the regular network. On the other hand, the flow and speed parameters did not show significant differences between the networks. Choosing appropriate parameters is crucial to understanding the impact of interruptions on the transportation system. Travel time, being sensitive to the form of the network, should be considered in the planning and management of road networks. The results of this study assist in decision-making by public managers, communication with society, and the development of more resilient cities.

RESUMEN

La forma de la red vial influye en el tiempo de viaje de los usuarios durante interrupciones. Sin embargo, estudios sobre vulnerabilidad vial a menudo ignoran esta característica, lo que puede llevar a conclusiones incorrectas. Este trabajo analiza el impacto de la elección del parámetro de desempeño en la evaluación de la vulnerabilidad, utilizando redes regulares e irregulares como modelos. La investigación incluyó una revisión de literatura sobre topología y vulnerabilidad vial, modelización y simulación de dos escenarios, y análisis de resultados mediante estadística descriptiva y pruebas paramétricas. Los resultados mostraron que el tiempo de viaje es un parámetro sensible a la forma de la red, con redes irregulares presentando tiempos mayores que las regulares. En contraste, los parámetros de flujo y velocidad no mostraron diferencias significativas entre los tipos de red. La selección de parámetros adecuados es crucial para comprender el impacto de las interrupciones en el sistema de transporte. Dado que el tiempo de viaje es sensible a la forma de la red, debe considerarse en la planificación y gestión viales. Los hallazgos de este estudio apoyan a los gestores públicos en la toma de decisiones, la comunicación con la sociedad y el desarrollo de ciudades más resilientes.

INTRODUÇÃO

A vulnerabilidade da rede viária pode ser definida como potenciais degradações da oferta da infraestrutura viária, bem como pela forma como impactam na sociedade (Leobons et al., 2019). Eventos recorrentes na rede viária aumentaram a conscientização de que seus usuários estarão constantemente vulneráveis às interrupções e, por isso, inúmeros pesquisadores buscam desenvolver novos métodos para avaliar as consequências dessas interrupções no sistema, ainda que grande parte destes eventos seja de natureza recorrente (Lordan et al., 2017; Liao et al., 2018; Wan et al., 2018; Ulak et al., 2021).

Na literatura, os índices de vulnerabilidade baseiam-se principalmente na distância ou no custo total da viagem, mantendo o foco na análise pontual à ocorrência do evento, porém desconsiderando o efeito que este mesmo evento possa provocar na região, gerando dois possíveis cenários. Primeiro, os usuários poderão ser forçados a realizar longos retornos para conseguir alcançar seus destinos, caso a rede possua poucas conexões, ou segundo, os usuários conseguirão manter o equilíbrio dos seus custos se tais interrupções ocorrerem em uma rede com alta densidade de alternativas (Comes et al., 2020; Renne et al., 2020; Sun et al., 2020).

Mesmo assumindo esses dois cenários, como comumente é explorado em vários experimentos, essa abordagem sobre a vulnerabilidade é bastante genérica e pode não refletir com coesão os impactos provocados pela ocorrência desses eventos. Segundo Muñuzuri et al. (2018), o comportamento dos elementos presentes no meio urbano varia em função da sua natureza e pela forma como interagem com os demais elementos e características da rede viária, a citar: geometria da via, quantidade e sentido das faixas, desenho da rede, densidade e qualidade das conexões, capacidade e velocidade projetada da via, disponibilidade de vagas para estacionamento, restrições de circulação, dentre outros (LI et al., 2019; YABE et al., 2020). A geometria urbana influencia diretamente a existência de polos geradores e atratores de viagens, os quais moldam padrões de movimento e congestionamento, afetando a distribuição de tráfego e a acessibilidade dentro da cidade. Essa dinâmica impacta significativamente a vulnerabilidade urbana, uma vez que áreas com alta concentração de polos geradores e atratores de viagens tendem a ser mais suscetíveis a congestionamentos e interrupções no fluxo viário, amplificando os efeitos adversos em situações de emergências ou desastres.

Para Demir et al. (2014), estes elementos citados são categorizados como parâmetros de rede, em que independem do funcionamento da cadeia de suprimentos e das rotas de abastecimento, pois leva em consideração apenas as características geométricas da rede e suas condições operacionais. Dessa forma, em um pequeno recorte de uma rede viária podem existir inúmeras variáveis que inferem certa complexidade à análise da vulnerabilidade, e controlar todas essas variáveis se torna um obstáculo para os pesquisadores e planejadores, pois muitas vezes são qualificados pelo seu comportamento dinâmico e difícil reprodução em simulações (Susilawati & Yaw, 2017).

Entretanto, certas variáveis podem não apresentar uma complexidade considerável, podendo ser facilmente simuladas (XU et al., 2022; LI et al., 2021; CHEN et al., 2018), o que viabiliza uma análise mais precisa da vulnerabilidade da rede, tendo como exemplo o desenho da malha viária urbana. Cada cidade possui um desenho próprio, e entender como a vulnerabilidade se comporta em cada caso é crucial para o planejamento urbano da cidade. Todavia, alguns padrões de configuração de rede se repetem como é o caso de algumas das grandes capitais do Brasil como Recife, Salvador, Rio de Janeiro, São Paulo, dentre

outras, em que se pode observar uma miscelânea de formas da rede, regular e irregular, se conectando ao longo de todo o território.

Desta forma, com base no contexto apresentado, o objetivo do estudo é avaliar os impactos que a combinação de diferentes elementos e características da rede, quando somados a análise da vulnerabilidade, podem provocar à escolha de caminhos. Em complementação, será realizada a identificação dos principais elementos e características viárias mais abordados em estudos sobre a análise da vulnerabilidade a partir de uma revisão sistemática da literatura, em seguida será a estruturação e simulação de cenários distintos combinando tais elementos e características viárias somando-os à vulnerabilidade, e por fim serão comparados e avaliados os resultados obtidos em cada um dos cenários simulados.

REVISÃO DA LITERATURA

TOPOLOGIA VIÁRIA URBANA

A topologia viária urbana é um aspecto crucial no planejamento e funcionamento das cidades modernas. Ela se refere à disposição e interconexão das ruas e estradas dentro de uma área urbana, influenciando diretamente a acessibilidade, mobilidade e eficiência do tráfego. Segundo Porta et al. (2006), a topologia da rede viária pode ser categorizada em diferentes tipos, como redes radiais, reticulares e híbridas, cada uma apresentando características únicas que afetam o fluxo de tráfego e a acessibilidade dos usuários.

Redes viárias urbanas bem estruturadas promovem uma distribuição eficiente do tráfego, reduzindo congestionamentos e melhorando a segurança viária. Estudos de Newman e Kenworthy (2006) mostram que redes com alta conectividade e redundância de rotas são mais resilientes a interrupções e oferecem maior flexibilidade para os usuários. Além disso, a geometria das vias, incluindo a largura das ruas, o número de faixas e a presença de ciclovias e calçadas, também desempenha um papel vital na determinação da capacidade e segurança da rede viária.

A otimização da topologia viária é essencial para manter o desempenho do sistema de transporte urbano, especialmente em cenários de eventos adversos. Zhang et al. (2015) e Gao et al. (2019) destacam que a adaptação e o aprimoramento contínuo da estrutura viária podem mitigar os impactos negativos de eventos inesperados, como acidentes ou desastres naturais, assegurando um fluxo contínuo e seguro de veículos e pedestres.

VULNERABILIDADE DA REDE VIÁRIA

A vulnerabilidade da rede viária urbana refere-se à suscetibilidade da infraestrutura de transporte a interrupções e seu impacto na mobilidade urbana. Este conceito ganhou destaque devido à crescente ocorrência de eventos que afetam a rede viária, como acidentes, obras, desastres naturais e congestionamentos severos. Segundo Berdica (2002), a vulnerabilidade pode ser avaliada pela capacidade da rede em absorver e se recuperar de tais interrupções, minimizando os impactos adversos na mobilidade urbana e na economia local.

Para compreender e mitigar a vulnerabilidade, é essencial analisar os elementos constitutivos da rede viária e suas interações. Muñozuri et al. (2018) enfatizam a importância de variáveis como geometria da via, densidade de conexões, capacidade viária e restrições de circulação. Essas variáveis influenciam diretamente a resiliência da rede, determinando a capacidade de redirecionar o tráfego em caso de interrupções.

Estudos recentes como os abordados por Gao et al. (2019), López et al. (2017) e Hing et al. (2020), têm adotado abordagens de simulação computacional para avaliar a vulnerabilidade viária. Cats e Jenelius (2016) utilizaram modelos de simulação para demonstrar que diferentes graus de interferência resultam em variados níveis de redução da capacidade das vias, destacando a importância de uma topologia viária bem estruturada para aumentar a resiliência. Além disso, Hong et al. (2020) argumentam que a análise da vulnerabilidade deve considerar não apenas a localização e a frequência das interrupções, mas também a disponibilidade de rotas alternativas e a flexibilidade da rede.

A implementação de estratégias para reduzir a vulnerabilidade viária inclui o aprimoramento da conectividade da rede, a diversificação das opções de transporte e a adoção de tecnologias de gestão de tráfego. Por exemplo, sistemas de transporte inteligentes (ITS) podem fornecer dados em tempo real sobre condições de tráfego, ajudando a otimizar rotas e a responder rapidamente a incidentes, conforme discutido por Yabe et al. (2020).

A compreensão aprofundada da topologia viária urbana e da vulnerabilidade da rede é crucial para o desenvolvimento de cidades resilientes e eficientes. A pesquisa contínua e a implementação de inovações tecnológicas são essenciais para enfrentar os desafios da mobilidade urbana e assegurar que as redes viárias possam sustentar a demanda crescente e mitigar os impactos de eventos adversos.

METODOLOGIA

MODELAGEM E SIMULAÇÃO

Nesta etapa estão estruturados e simulados dois cenários que reproduzem variações da combinação desses elementos e características viárias ao entender que, segundo Cavalcante (2009), a forma como a cidade está configurada interfere e explica, parcial ou totalmente, o comportamento dos movimentos veiculares, isto é, a influência dessas características no desempenho dos parâmetros de viagem e no conflito pelo espaço viário.

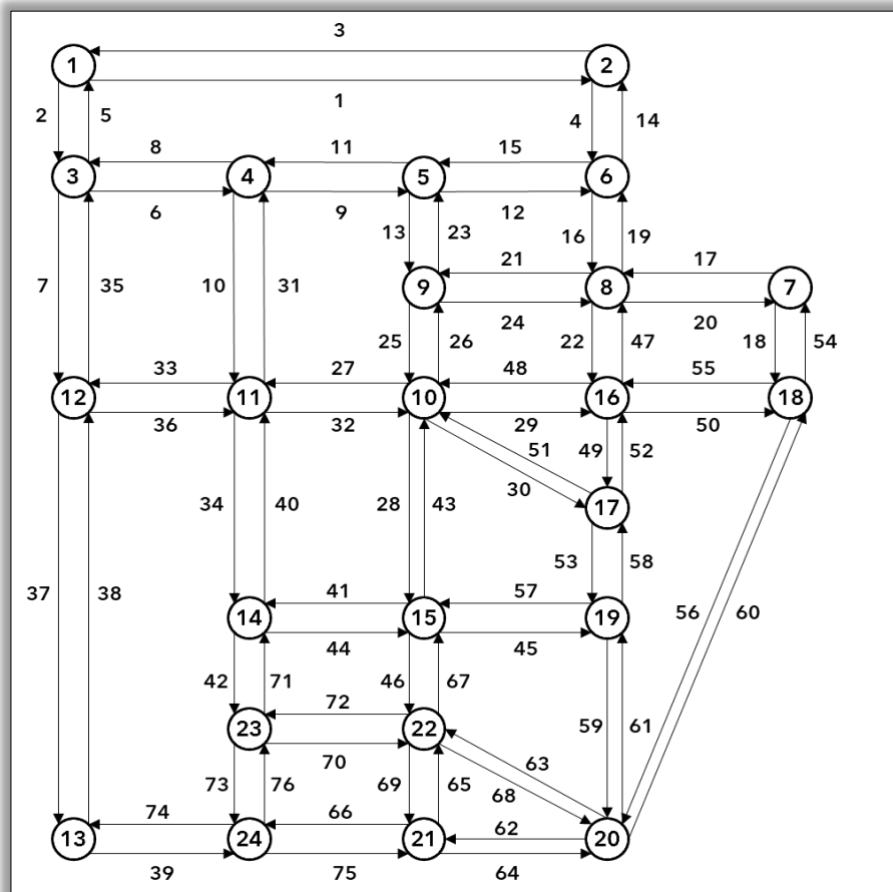
A proposta dessa modelagem e simulação de cenários é avaliar o impacto da vulnerabilidade não exatamente no ponto em que ela acontece, mas em como pode influenciar nas decisões e comportamentos de viagem ao redor desse ponto interrompido. Autores como Cats e Jenelius (2016) e Gu et al. (2019) investigaram a vulnerabilidade usando simulação computacional onde foi possível observar que diferentes graus de interferência causam diferentes níveis de redução da capacidade das vias atingidas em toda a sua extensão.

Outros autores, como Singh et al. (2018), Hong et al. (2020) e Comes et al. (2020), defendem que a magnitude da vulnerabilidade e a forma como se manifesta, depende principalmente do tipo de evento que ocorre e das características da rede. Já autores como Duan e Lu (2015), Sun e Guan (2016), López et al. (2017) e Gao et al. (2019) reiteram que a coleção de diferentes elementos da rede pode refletir diferentes desempenhos do sistema. Ainda de forma complementar, os autores Zhang et al. (2015), Dunn e Wilkinson (2016) e Guidotti et al. (2017) assumem que a otimização da topologia da rede pode efetivamente manter o desempenho do sistema sob ocorrência do evento.

Desse modo, para o processo de modelagem e simulação desta pesquisa, buscou-se abordar duas características distintas na etapa de modelagem da rede viária considerando-as de forma hipotéticas, sendo uma regular e outra irregular, como definido por Ratti (2004), He et al. (2020) e Cavalcante (2009). Os autores afirmam que redes regulares são caracterizadas por um desenho topológico bem definido com conexões limitadas de até três ou quatro ligações, enquanto as redes irregulares se destacam para característica de desenho desforme, podendo conter nós de conexão com duas ou até cinco ligações.

A rede regular foi modelada tendo como base a proposta apresentada por Shao et al. (2014), conforme ilustrada na figura 1, em que possui 24 nós, 76 links com capacidade viária de 2000 unidades de carro de passageiro por hora (ucp/hr) e cada par de origem e destino assumindo 300 ucp/hr. Contudo, em vez de 48 pares OD, como adotado pelos autores, foram definidos 12 pares OD em cada rede (Nós de origem/destino: 1 e 2, nós de destino/origem: 24, 21 e 20). Por fim, o fluxo a ser simulado foi composto por 10% de caminhões, 26% de ônibus e 64% de veículos particulares, tomando como referência Tsitsokas et al. (2021).

Figura 1. Ilustração da rede original usada de base para modelagem e estruturação das redes regular e irregular



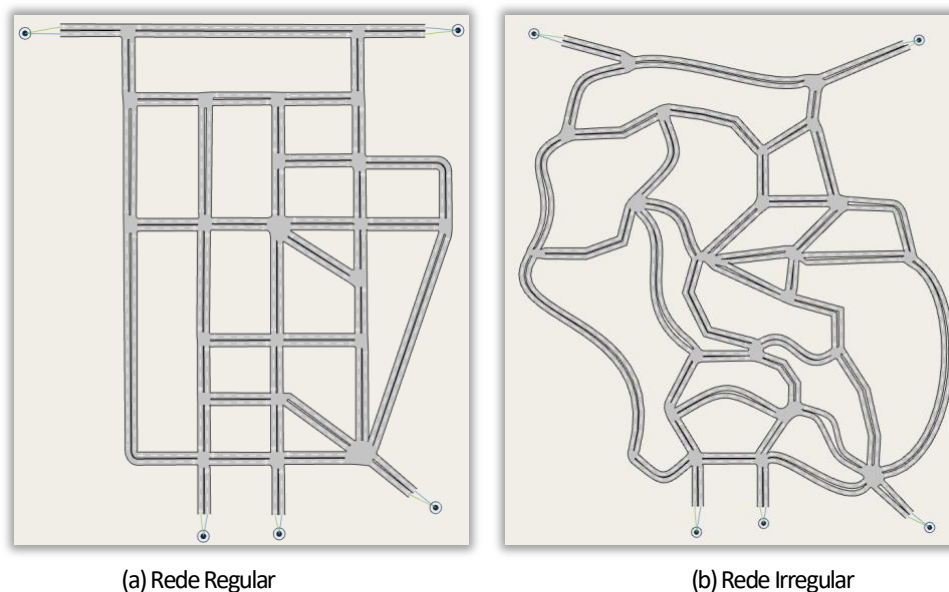
Fonte: Adaptado de Shao et al. (2014).

No entanto, para a rede irregular foi criada uma rede também hipotética, porém sem qualquer referência a modelos já existentes na literatura, mas estabelecendo um requisito de que se mantivessem as mesmas características dos nós e ligações anteriormente definido para a rede regular, todavia atribuindo a essa rede irregular uma configuração mais desarmônica, assimétrica, como descrito por Ratti (2004), He et al. (2020), e Cavalcante (2009).

Com isso, foi utilizado o software AIMSUN NEXT[®] para modelar e estruturar as redes definidas, como visto na figura 2. Os parâmetros de calibração do software não foram alterados, mantendo-se na configuração padrão, uma vez que se trata de redes hipotéticas (ACUTO et al., 2022). Isso se justifica pelo fato de que o objetivo é apenas o de comparar a sensibilidade da dispersão do fluxo entre essas redes simuladas com base nas suas características estruturais a partir da reprodução de uma vulnerabilidade existente, e não a de avaliar a sensibilidade da rede como resposta às alterações nos parâmetros de calibração.

Além disso, foi definido um período de aquecimento de 15 minutos, em que Vilarinho et al. (2014) afirmam que o período de aquecimento depende principalmente do tamanho da rede, sendo corroborado por autores como Acuto et al. (2022), Wismans et al. (2014), Kavicka et al. (2021) e Rahimi et al. (2021), que fazem uso de redes de pequenas dimensões, de até 40 nós, adotando o referido período de aquecimento.

Figura 2. Representação das redes regular (a) e rede irregular (b) modeladas e estruturadas utilizando o software AIMSUN NEXT[®].



Fonte: Autores (2024).

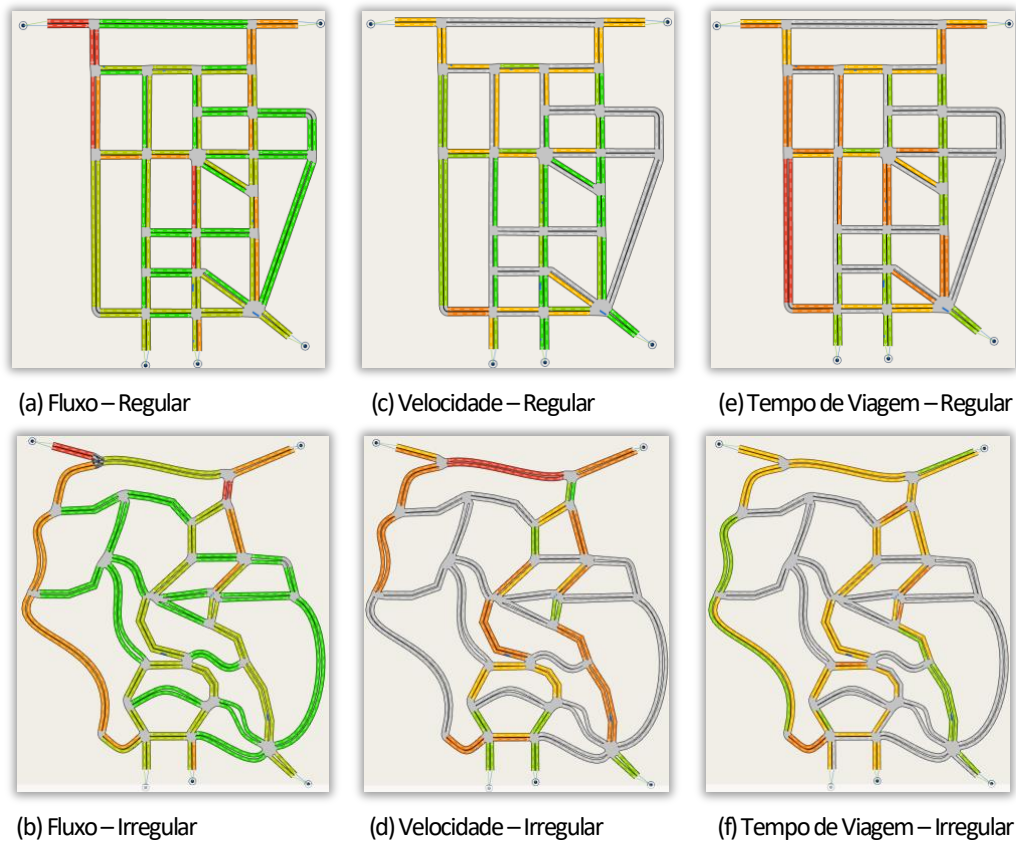
Para avaliar a vulnerabilidade, Jun-qiang et al. (2018) assumem os parâmetros tempo de viagem, distância, e velocidade como essenciais para a compreensão do impacto dos bloqueios nos custos de viagem. Para Esfeh et al. (2022), além destes já citados, buscar compreender o efeito da vulnerabilidade na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

ANÁLISE DOS RESULTADOS

A realização de uma análise comparativa prévia desses parâmetros para ambos os cenários permite inferir que o design da malha viária pode influenciar o comportamento da viagem. Além disso, essa análise facilita a compreensão de que, apesar de diferenças físicas, as redes viárias podem não apresentar variações significativas nos parâmetros avaliados para a análise da vulnerabilidade. Para verificar se as redes viárias regular e irregular possuem performances distintas, foi realizada uma análise preliminar utilizando estatística descritiva. Essa análise preliminar visa determinar se há diferenças significativas entre as redes, constituindo um ponto de partida para uma análise mais aprofundada e exploratória dos dados. Para essa etapa subsequente, serão aplicadas técnicas estatísticas mais específicas para cada um dos parâmetros definidos, tais como tempo de viagem, fluxo e velocidade média.

Antes da abordagem estatística, após a realização das simulações dos cenários, foi feita uma avaliação visual da rede comparando cada um dos parâmetros. Estes resultados apresentaram redes com comportamentos visualmente diferentes, como mostrado na Figura 3, dando a entender que a forma da rede pode de fato inferir alguma diferença de desempenho entre elas. Todavia, com a finalidade de validar essa afirmativa, aplicou-se a estatística descritiva nos resultados apresentados na Tabela 1, que correspondem a cálculos obtidos a partir da média de cada intervalo de tempo medido.

Figura 3. Comparativo realizado através da análise visual entre os parâmetros das redes regular e irregular após as simulações



Fonte: Autor (2024).

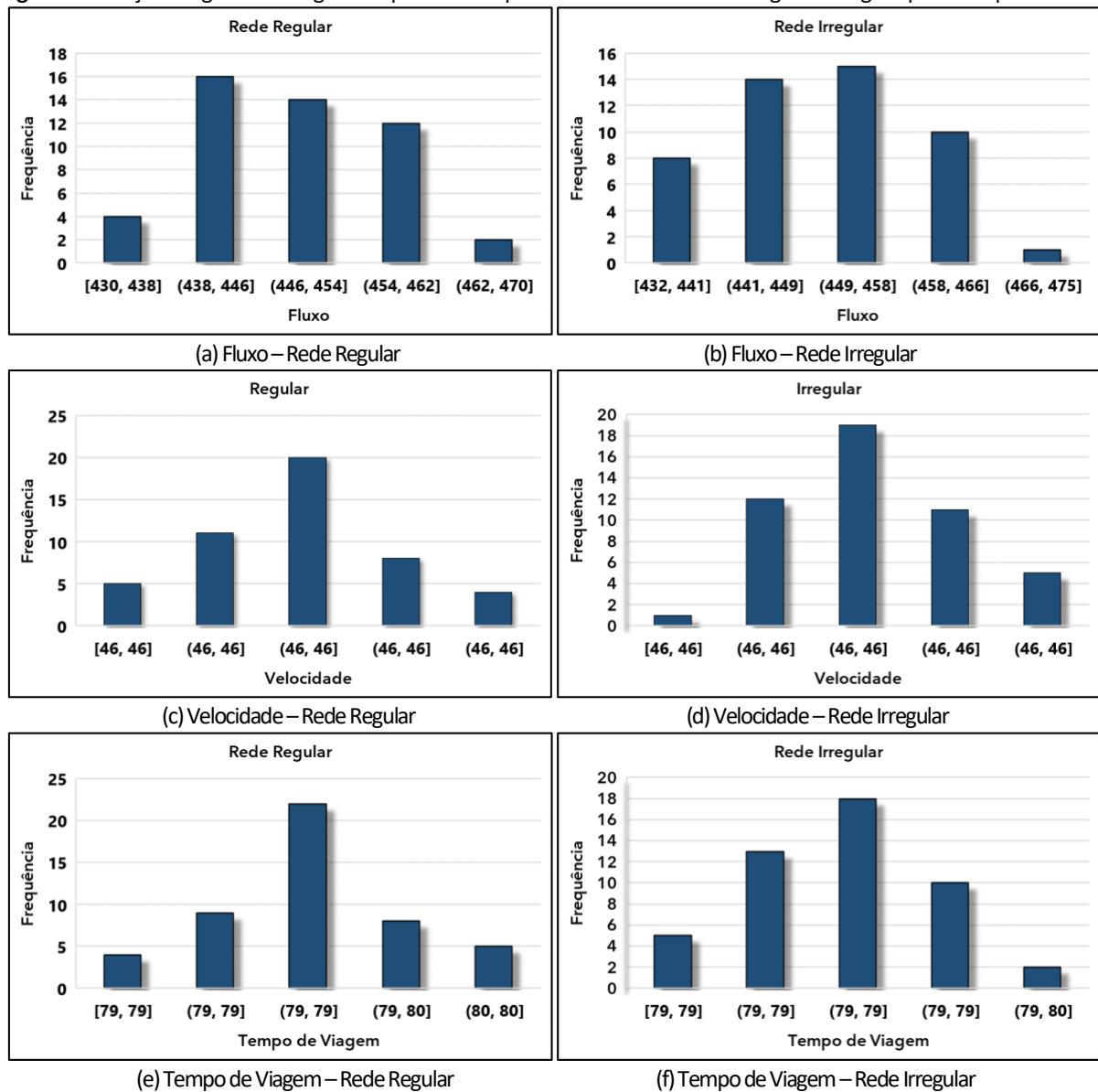
Tabela 1. Comparativo dos resultados das análises estatísticas descritiva das simulações das redes regular e irregular

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 4 ilustra os resultados da modelagem dos gráficos de histograma para cada parâmetro, em ambas as redes.

Figura 4. Ilustração dos gráficos histograma reproduzidos a partir das medidas das redes regular e irregular para cada parâmetro.

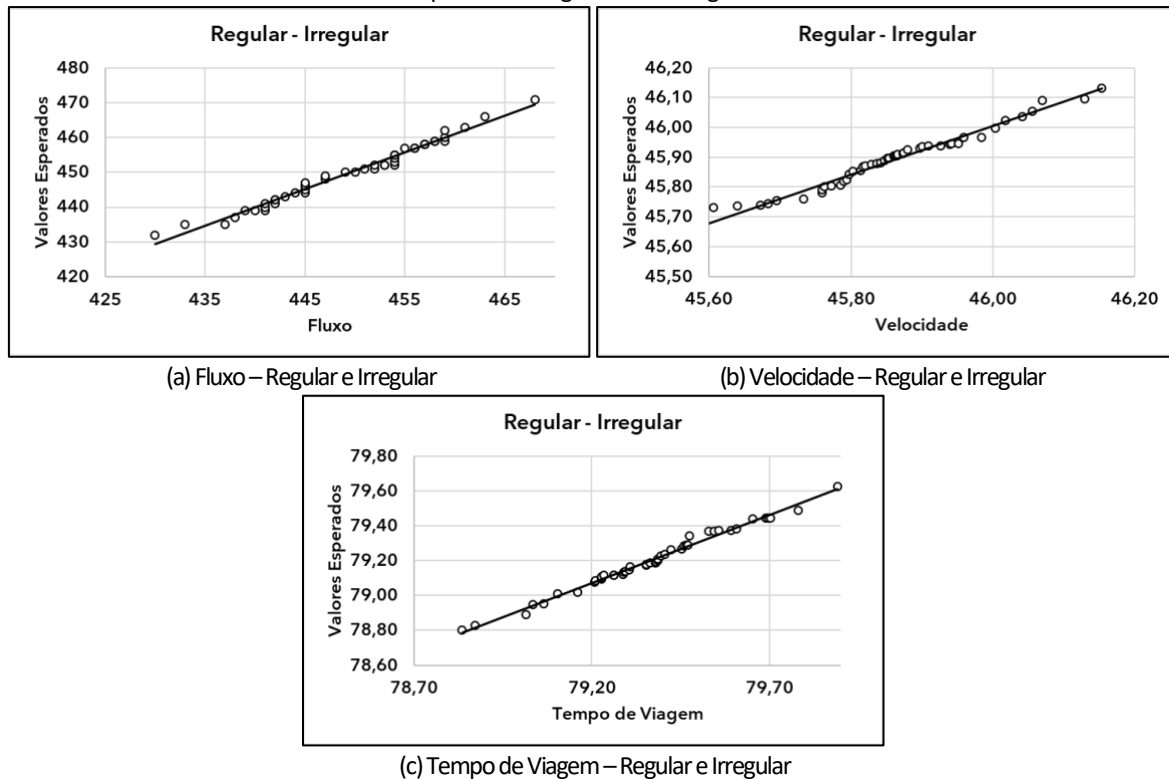


Fonte: Autor (2024).

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 08 (a) e (b). Dessa forma, na figura 5, 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 5. 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.



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 a seguir apresenta os resultados da aplicação do teste de normalidade Shapiro-Wilk para cada um dos parâmetros, em ambas as redes.

Tabela 2. 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 (μ_1) não segue o mesmo comportamento que a rede regular (μ_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 3 apresenta os resultados que foram obtidos com a aplicação do teste t Student.

Tabela 3. 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 3, 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.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise estatística descritiva, aplicada aos dados coletados, revelou que embora os parâmetros de fluxo e velocidade não apresentem variações estatisticamente significativas entre as redes regular e irregular, o tempo de viagem mostrou-se um parâmetro sensível à forma da rede. Esta diferença foi confirmada pelo teste t para amostras independentes, que indicou um efeito significativo da forma da rede sobre o tempo de viagem, com um valor de $t(94) \cong 4,12$ e $p < 0,001$, rejeitando a hipótese nula de igualdade das médias entre as redes para este parâmetro. A observação subjetiva dos comportamentos das redes durante as simulações já sugeria que a forma da rede influenciava os parâmetros, mas os resultados estatísticos proporcionaram uma confirmação objetiva desta influência. Esta constatação sublinha a necessidade de escolher parâmetros que reflitam de forma precisa as particularidades das redes viárias em estudo, especialmente em cenários de vulnerabilidade.

Os trabalhos de Jun-qiang et al. (2018) e Esfeh et al. (2022) destacam a importância de considerar múltiplos parâmetros, incluindo fluxo, velocidade e tempo de viagem, na avaliação da vulnerabilidade viária. Este estudo corrobora essas recomendações, mostrando que a escolha do parâmetro adequado é crucial para captar a real dinâmica do sistema viário sob condições adversas. Portanto, ao projetar e analisar redes de transporte, é fundamental realizar uma avaliação prévia dos parâmetros disponíveis, selecionando aqueles que melhor representam o desempenho da rede em situações de vulnerabilidade. Este processo garantirá uma compreensão mais aprofundada dos impactos das intervenções e das características estruturais das redes, permitindo um planejamento mais robusto e resiliente.

A identificação de parâmetros adequados para medir a vulnerabilidade das redes viárias permite aos gestores públicos tomar decisões informadas sobre onde e como investir recursos para melhorar a resiliência do sistema de transporte. A sensibilidade do tempo de viagem à forma da rede, por exemplo, pode orientar intervenções específicas em áreas onde a configuração da rede causa maiores atrasos em situações de interrupção. Além disso, a capacidade de simular cenários de vulnerabilidade e avaliar seus impactos ajuda a prever e mitigar os efeitos de eventos adversos, como desastres naturais ou acidentes, antes que eles ocorram. Isso permite uma resposta mais proativa e eficiente, minimizando os custos socioeconômicos associados a tais eventos.

A aplicação prática dos resultados deste estudo também pode melhorar a comunicação e a colaboração entre diferentes níveis de governo e com a sociedade civil. Ao utilizar parâmetros claros e bem-definidos, os gestores públicos podem justificar melhor suas escolhas de investimento e políticas de mobilidade, promovendo maior transparência e confiança pública. Por fim, o estudo destaca a importância de um planejamento urbano integrado, que considere as especificidades da rede viária e suas vulnerabilidades. Isso pode levar ao desenvolvimento de estratégias de crescimento urbano que promovam redes de transporte mais equilibradas e menos suscetíveis a interrupções, contribuindo para cidades mais sustentáveis e resilientes no longo prazo. Em suma, este estudo não só avança o conhecimento acadêmico sobre a vulnerabilidade das redes viárias, mas também oferece ferramentas práticas para melhorar a gestão pública, promovendo um transporte urbano mais eficiente, seguro e resiliente.

REFERÊNCIAS

- Acuto, F., Coelho, M. C., Fernandes, P., Giufrè, T., Macioszek, E., & Granà, A. (2022). Assessing the Environmental Performances of Urban Roundabouts Using the VSP Methodology and AIMSUN. *Energies*, 15, 1371. <https://doi.org/10.3390/en15041371>.
- Ariza-Álvarez, A., Soria-Lara, J. A., & Aguilera-Benavente, F. (2022). 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* 60, 274-281. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.12.036>
- Balijepalli, C. & Oppong, O. (2014). Measuring vulnerability of road network considering the extent of serviceability of critical road links in urban areas. *Journal of Transport Geography*, 39, 145-155. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2014.06.025>
- Berdica, K. (2002). An introduction to road vulnerability: what has been done, is done and should be done. *Transport Policy*, 9(2), 117-127. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.12.036>
- Bešinović, N. (2020). Resilience in railway transport systems: a literature review and research agenda. *Transportation Review*, 1-22. <https://doi.org/10.1080/01441647.2020.1728419>
- Cats O. & Jenelius E. (2016). Beyond a complete failure: the impact of partial capacity degradation on public transport network vulnerability. *Transportmeter B*, 6(2), 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. <https://doi.org/10.1080/21680566.2016.1149260>
- Cavalcante, A. P. H. (2009). A Arquitetura da Cidade e os Transportes: O Caso dos Congestionamentos em Fortaleza, Ceará. Antonio Paulo de Hollanda Cavalcante. – Brasília: PPG/FAU/UnB. 347p.: 118 il.
- Chen, A., Yang, C., & Kongsomsaksakul, S., Lee, M. (2007). Network-based Accessibility Measures for Vulnerability Analysis of Degradable Transportation Networks. *Network Spatial Economic*, 7, 241-256. <https://doi.org/10.1007/s11067-006-9016-4>
- Comes, T., Warnier, M., Feil, W., & Van de Walle, B. (2020). Critical airport infrastructure disaster resilience: A framework and simulation model for rapid adaptation. *Journal Management Engineering*, 36(5), 04020059. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000810](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000810)
- Demir, E., Bektas, T., & Laporte, G. (2014). A review of recent research on green road freight transportation. *Eur. J. Oper. Res.*, 237, 775-793. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.12.033>
- Duan, Y. & Lu, F. (2015). 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., pp. 127-143.
- Dunn, S. & Wilkinson, S.M. (2016). Increasing the resilience of air traffic networks using a network graph theory approach. *Transp. Res. E*, 90, 39-50. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2016.02.007>
- Esfeh, M. A., Kattan, L., Lam, W. H. K., Safari, M., & Esfe, R. A. (2020). Road network vulnerability analysis considering the probability and consequence of disruptive events: A spatiotemporal incident impact approach. *Transportation Research Part C* 136. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102560>
- Gao L., Liu, X., Liu, Y., Wang, P., Deng, M., Zhu, Q., & Li, H. (2019). Measuring road network topology vulnerability by Ricci curvature. *Physica A*, 527, 121071. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.04.241>
- Gao, L., Xu, L., Sun, G., & Shi, Y. (2019). Vulnerability analysis of urban road network from a resilience perspective. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 526, 120828. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.121071>
- Gu, Y., Fu, X., Liu, Z., Xu, X., & Chen, A. (2019). Performance of transportation network under perturbations: Reliability, vulnerability, and resilience. *Transportation Research E*, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.01.001>
- Guidotti, R., Gardoni, P., & Chen, Y. (2017). Network reliability analysis with link and nodal weights and auxiliary nodes. *Structure Safety*, 65. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2017.01.007>
- He, S., Yu, S., Li, G., & Zhang, J. (2020). Exploring the influence of urban form on land-use efficiency from a spatiotemporal heterogeneity perspective: Evidence from 336 Chinese cities. *Land Use Policy*, 95. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104624>
- Hong L., Ouyang M., Xu M., & Hu P. (2020). Time-varied accessibility and vulnerability analysis of integrated metro and high-speed rail systems. *Reliability Engineer System Safety*, 193 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2020.08.012>
- Hong, L., Cong, H., & Zhang, S. (2020). A hybrid method for urban road network vulnerability analysis. *Transport Policy*, 99, 121-131. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2020.08.012>
- Husdal, J. (2004). Reliability/vulnerability versus costs/benefits, in: *ETC 2004*.
- Jenelius, E., Petersen T., & Mattsson, L. (2006), "Importance and exposure in road network vulnerability analysis". *Transportation Research Part A*, 40, 537-560. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2005.11.003>

- Jun-qiang, L., Jing, Z., Qian-wen, L., & Lin, Z. (2018). Construction of road network vulnerability evaluation index based on general travel cost. *Physica A*, 493, 421-429. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2017.11.018>.
- Kavicka, A., Divis, R., Bazant, M., & Krivka, P. (2021). Simulations of road traffic at light-controlled Intersections. 33rd European Modeling & Simulation Symposium. *18th International Multidisciplinary Modeling & Simulation Multiconference*. ISSN 2724-0029 ISBN 978-88-85741-57-7.
- Leobons, C. M., Barcellos, V., Campos, G., De, & R. A. (2019). Assessing urban transportation systems resilience: A proposal of indicators, *Transportation Research Procedia* 37 322 – 329. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.200>
- Li, Z., Jin, C., Hu, P., & Wang, C. (2019). Resilience-based transportation network recovery strategy during emergency recovery phase under uncertainty. *Reliability Engineering System Safety*, 188, 503-514. <https://doi.org/10.1016/j.res.2019.03.025>
- Liao, T. Y., Hu, T. Y., & Ko, Y. N. (2018). A resilience optimization model for transportation networks under disasters. *National Hazards*, 93(1), 469-489. <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3306-8>
- López, F. A., Páez, A., Carrasco, J. A., & Ruminot, N. A. (2017). Vulnerability of nodes under controlled network topology and flow autocorrelation conditions. *Journal Transportation Geography*, 59, 77-87. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2017.01.003>
- Lordan, O. & Klophaus, R. (2017). Measuring the vulnerability of global airline alliances to member exits. *Transportation Research, Procedia*, 25(2017), 7-16. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.178>
- Lordan, O., Sallan, J.M., Simon, P., & Gonzalez-Prieto, D. (2014). Robustness of the air transport network. *Transportation Research E*, 68, 155-163. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2014.05.011>
- Mattsson, L.G., & Jenelius, E., 2015. Vulnerability and resilience of transport systems - A discussion of recent research. *Transportation Research A*, 81, 16-34. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.06.002>
- Muñuzuri, J., Rivas, A., Guadix, J., & Gallego, F. (2018). The use of rail freight transport for the urban distribution of goods. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 39, 402-414. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.03.118>
- Newman, P., & Kenworthy, J. (2006). Urban design to reduce automobile dependence. *Opolis: An International Journal of Suburban and Metropolitan Studies*, 2(1).
- Oliveira, E. L., Portugal, L. S., & Porto Jr., W. (2016). Indicators of reliability and vulnerability: Similarities and differences in ranking links of a complex road system. *Transportation Research A*, 88, 195-208. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.04.004>
- Ouyang, M., Zhao, L., Hong, L., & Pan, Z. (2014). Comparisons of complex network-based models and real train flow models to analyze Chinese railway vulnerability. *Reliability Engineering System Safety*, 123, 38-46. <https://doi.org/10.1016/j.res.2013.10.014>
- Porta, S., Crucitti, P., & Latora, V. (2006). The network analysis of urban streets: A primal approach. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 33(5), 705-725. <https://doi.org/10.1068/b32045>
- Rahimi, A. M., Dulebenets, M. A., & Mazaheri, A. (2021). Evaluation of Microsimulation Models for Roadway Segments with Different Functional Classifications in Northern Iran. *Infrastructures*, 6, 46. <https://doi.org/10.3390/infrastructures6030046>.
- Ratti, C. (2004). Space syntax: some inconsistencies. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 31, 487-499. <https://doi.org/10.1068/b3019>
- Renne, J., Wolshon, B., Murray-Tuite, P., & Pande, A. (2020). Emergence of resilience as a framework for state departments of transportation (DOTs) in the United States. *Transportation Research D*, 82, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102178>
- Santos, J. E. D. (2016). 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.
- Singh, P., Sinha, V. S. P., Vijhni, A., & Pahuja, N. (2018). Vulnerability assessment of urban road network from urban flood. *Int. J. Disaster Risk Reduction*, 28, 237-250. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.03.021>
- Snelder, M., Vanzuylen, H. J., & Immers, L. H. (2012). A framework for robustness analysis of road network for short term variations in supply. *Transportation Research Part A*, 46(5), 828-842. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2012.02.011>
- Su, Z., Li, L., Peng, H., Kurths, J., Xiao, J., & Yang, Y. (2014). Robustness of interrelated traffic networks to cascading failures. *Science Rep.*, 4, 1-7. <https://doi.org/10.1038/srep05417>
- Sullivan, J.L.; Novak, D.C.; Aultman-Hall, L.; & Scott, D.M. (2010). 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, 323–336. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2010.03.010>
- Sun, D. J. & Guan, S. (2016). Measuring vulnerability of urban metro network from line operation perspective. *Transp. Res. A*, 94(800), 348-359. <https://doi.org/10.1080/23789689.2020.1742815>

- Sun, W., Bocchini, P., & Davison, B. D. (2020). Resilience metrics and measurement methods for transportation infrastructure: the state of the art. *Sustainable Resilience Infrastructure*, 5(3), 168-199. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.09.020>
- Taylor, M. A. P.; Sekhar, S. V. C.; D'este, G. M. (2006). Application of accessibility-based methods for vulnerability analysis of strategic road networks. *Networks and Spatial Economics*, 6(3-4), 267-291. <https://doi.org/10.1007/s11067-006-9284-9>
- Testa, A.C, Furtado, M.N., & Alipour, A. (2015). Resilience of coastal transportation networks faced with extreme climatic events, *Transportation Research Rec.* 2532 29–36. <https://doi.org/10.3141/2532-04>
- Tsitsokas, D., Kouvelas, A., & Geroliminis, N. (2021). Modelagem e otimização da alocação de espaço de corredores de ônibus dedicados em grandes redes com congestionamento. *Transportation Research Part C*, 127, 103082. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103082>
- Ulak, M.B., Konila, S. L. M., Kocatepe, A., Ozguven, E. E., & Arghandeh, R. (2021). Resilience characterization for multi-layer infrastructure networks, *IEEE Intelligence Transportation Systems Mag.* 2-13. <https://doi.org/10.1109/MITS.2021.3050286>
- Vilariño, C., Soares, G., Macedo, J., Tavares, R., Rossetti, R. J. F. (2014). 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. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.01.059>
- Wan, C., Yang, Z., Zhang, D., Yan, X., & Fan, S. (2018). Resilience in transportation systems: a systematic review and future directions. *Transp. Rev.*, 38 (4) 479-498. <https://doi.org/10.1080/01441647.2017.1383532>
- Wang, X., Koç, Y., Derrible, S., Ahmad, S.N., Pino, W.J., & Kooij, R.E., 2017. Multi-criteria robustness analysis of metro networks. *Physical A*, 474. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2017.01.041>
- Wismans, L., Romph, E., Friso, K., Zantema, K. (2014). 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. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2014.11.021>
- Yabe, T., Rao, P. S. C., & Ukkusuri, S. V. (2020). Regional differences in resilience of social and physical systems: Case study of Puerto Rico after Hurricane maria, *Environmental Planet. B*, 2399808320980744. <https://doi.org/10.1177/2399808320980744>
- Yabe, T., Tsubouchi, K., Fujiwara, N., Sekimoto, Y., & Ukkusuri, S. V. (2020). Understanding post-disaster population recovery patterns. *Journal of The Royal Society Interface*, 17(163), 20200439. <https://doi.org/10.1098/rsif.2020.0439>
- Yang, Y., Liu, Y., Zhou, M., Li, F., & Sun, C. (2015). Robustness assessment of urban rail transit based on complex network theory: A case study of the Beijing Subway. *Safety Science*, 79 149–162. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.06.017>
- Zhang, J., Fricker, J. D., & Landman, J. A. (2015). Enhancing network resilience by developing bridge management strategies: A case study of Indiana. *Transportation Research Record*, 2459(1), 37-45. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2015.05.006>
- Zhang, X., Miller-Hooks, E., & Denny, K. (2015). Assessing the role of network topology in transportation network resilience. *Journal Transportation Geography*, 46, 35-45. <https://doi.org/10.3141/2459-05>
- Zhou, Y., Wang, J., & Huang, G. Q. (2019). Efficiency and robustness of weighted air transport networks. *Transportation Research*, E 122. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.01.007>