

Robustez das redes de mobilidade urbana da cidade de São Paulo

Vinícius Fonseca de Oliveira¹

Departamento de Computação, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG

Suleimane Ducure²

Departamento de Computação, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG

Leonardo Bacelar Lima Santos³

Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais, São José dos Campos, SP

Vander Luis de Souza Freitas⁴

Departamento de Computação, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG

Compreender matematicamente o deslocamento de pessoas entre as zonas de tráfego de uma cidade permite não somente potencializar a assertividade da tomada de decisões do setor público em situações que afetam diretamente o ir e o vir dos cidadãos, mas também traz contribuições estratégicas para elaboração de planos de contenção de doenças e imunização populacional [3]; isolar áreas sujeitas a catástrofes naturais; potencializar operações de cerco e bloqueio das forças policiais ostensivas; otimizar a rota de entrega de empresas de *delivery* e propiciar melhorias no transporte público [1, 5]. Neste contexto, o presente trabalho investiga os efeitos de ataques - remoções de nós - em redes de mobilidade urbana [2].

Como estudo de caso, utiliza-se os dados da Pesquisa Origem Destino 2017 [4], as quais representam os fluxos de pessoas entre as 342 zonas de tráfego do município de São Paulo a partir de modais de transporte (Figura 1a): modo coletivo, modo individual, modo motorizado, modo não motorizado e viagem a pé ou de bicicleta. Por modo coletivo compreende-se metrô, trem, ônibus, transporte fretado e transporte escolar. O modo individual implica em pessoas dirigindo automóvel, passageiro de automóvel, táxi e motocicleta. O modo motorizado é a soma das viagens por modos coletivo e individual e o modo não motorizado é a soma das viagens a pé e de bicicleta.

As zonas de tráfego são os nós da rede e a quantidade total de viagens realizadas entre pares de zonas corresponde ao peso vinculado às arestas. A construção das redes se dá a partir das matrizes de adjacências de cada modal, publicamente disponíveis na ref [4].

Para a análise de robustez, monitora-se a diminuição do tamanho do componente gigante, P_∞ , e do fluxo total remanescente, $\|W\|$, perante falhas aleatórias e ataques coordenados. Para esses últimos, considera-se força, s_i , grau, k_i , e *betweenness*, b_i , considerando duas abordagens distintas, comparadas: i) calculando as métricas apenas no início da análise [2] e; ii) atualizando as métricas a cada ataque.

Observa-se como cada estratégia de perturbação se comporta em cada uma das abordagens e como o índice R é afetado em ambos os casos [2]. Esse índice corresponde a $R = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\Gamma(\frac{i}{N})}{\Gamma(0)}$, sendo N o tamanho da rede, e Γ a função de resposta da rede (o que se está monitorando), P_∞ ou $\|W\|$, após a remoção de uma fração i/N dos seus nós. Um valor de R alto significa que a rede é robusta aos ataques perpetrados.

¹vinicius.fonseca1@aluno.ufop.edu.br

²suleimane.ducure@aluno.ufop.edu.br

³santoslbl@gmail.com

⁴vander.freitas@ufop.edu.br

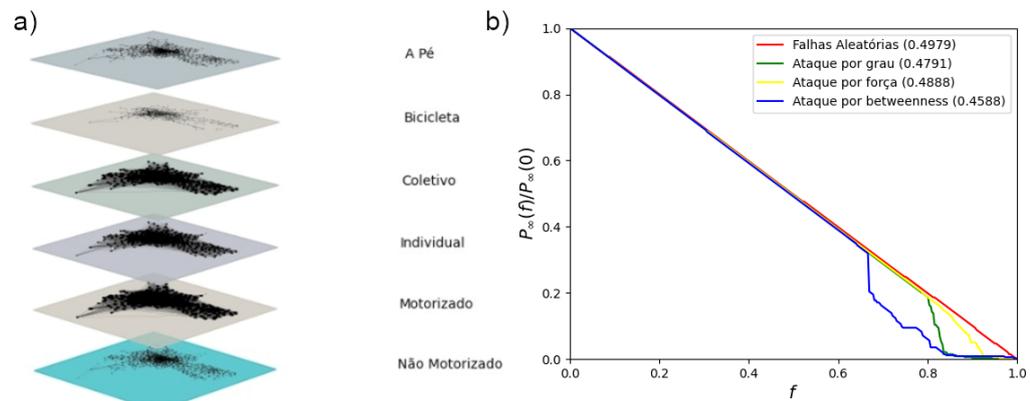


Figura 1: a) Representação das redes de cada um dos modais de transporte. Vértices representam o centróide de cada zona de tráfego, e arestas o fluxo de pessoas entre as zonas. b) Resultados da análise de robustez (R entre parênteses) para a rede agregada, usando a estratégia de atualização das métricas.

Por fim, analisa-se o R das redes de todos os modais citados, considerando-os juntos, em uma só rede (rede agregada - Figura 1b), e individualmente. Observa-se que: a melhor estratégia para diminuir P_∞ é o ataque por b_i ; a melhor estratégia para diminuir $\|W\|$ é o ataque aos nós de maior s_i ; em ambos os casos, a abordagem de se atualizar as métricas a cada ataque se mostra melhor do que a abordagem sem atualização; produzir falhas aleatórias na rede é a pior de todas as estratégias para diminuir R . Esses resultados podem ser utilizados para indicar as zonas a serem consideradas primeiro em casos de implementação de ações para controlar a propagação de doenças, encontrar áreas vulneráveis nas malhas de transportes urbanos, ou roteamento de barreiras sanitárias.

Agradecimentos

V.F.O., S.D. e V.L.S.F agradecem a Universidade Federal de Ouro Preto.

Referências

- [1] Giovanni Bonaccorsi et al. “Economic and social consequences of human mobility restrictions under COVID-19”. Em: **Proceedings of the National Academy of Sciences** 117.27 (2020), pp. 15530–15535. DOI: 10.1073/pnas.2007658117.
- [2] V. L. S. Freitas, G. J. P. Moreira e L. B. L. Santos. “Robustness analysis in an inter-cities mobility network: modeling municipal, state and federal initiatives as failures and attacks toward SARS-CoV-2 containment”. Em: **PeerJ** (2021). DOI: 10.7717/peerj.10287.
- [3] V. L. S. Freitas et al. “The correspondence between the structure of the terrestrial mobility network and the spreading of COVID-19 in Brazil”. Em: **Reports in Public Health** (2020).
- [4] GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Pesquisa Origem e Destino: 50 anos**. Data de acesso: 9 abr. 2021. Metrô São Paulo., 2019. URL: <http://http://www.metro.sp.gov.br/pesquisa-od/>.
- [5] Jéssica D. Lamosa et al. “Topological indexes and community structure for urban mobility networks: Variations in a business day”. Em: **PLOS ONE** 16.3 (mar. de 2021), pp. 1–17. DOI: 10.1371/journal.pone.0248126.