

## UMA ESTRATÉGIA PARA AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE ALAGAMENTOS EM SISTEMAS VIÁRIOS URBANOS

**André Borgato Morelli**

**André Luiz Cunha**

Universidade de São Paulo

Escola de Engenharia de São Carlos

### RESUMO

Neste artigo foi proposto um método de avaliação do impacto de alagamentos em sistemas de transporte urbanos a partir das métricas Continuidade de Rede e Eficiência de Rotas. O método foi aplicado à cidade de São Carlos no interior de São Paulo. Os cenários de alagamento foram criados a partir das zonas de risco definidas no Plano Diretor (PD) da cidade, bem como na região circundante para simular eventos mais graves. No cenário mais brando, cerca de 11% das rotas são inviabilizadas na cidade, com perda média de 8% em eficiência no comprimento das rotas do sistema, implicando um aumento médio de aproximadamente 9% no comprimento total das rotas. No pior caso avaliado, em que o nível d'água sobe 1,0 m acima do esperado no PD, 18% das rotas são inviabilizadas e a eficiência média do sistema cai 35%. Notou-se também que existem regiões na cidade desproporcionalmente afetadas pelos alagamentos, com alguns pontos tendo aumentos de até três vezes no comprimento médio de rota para o caso mais grave de alagamento. Esses resultados mostram a fragilidade existente no sistema de transportes da cidade nesse tipo de evento, e reforçam a importância de se criar sistemas urbanos resilientes para evitar a ocorrência desse tipo de desastre.

### ABSTRACT

This paper proposes a method to evaluate the impact of flooding in urban transport systems using network continuity and route efficiency as metrics. The method was applied to the city of São Carlos in the interior of São Paulo. The flood scenarios were created from the hazard zones defined in the city's master plan (MP) as well as in the surrounding region to simulate more severe events. In the milder scenario, about 11% of the routes are unviable in the city, with an average loss of 8% in efficiency of routes, implying an average increase of approximately 9% in the total length of the routes. In the worst evaluated case, where water rises 1.0 m above the expected level in the MP, 18% of the routes are unviable and the average efficiency of the system drops 35%. It was also noted that there are regions in the city disproportionately affected by flooding, with some points having increases of up to three times in the average route length for the most severe flooding event. These results show the fragility of the city's transportation system in this type of event, and reinforce the importance of creating resilient urban systems to avoid the occurrence of this type of disaster.

### 1. INTRODUÇÃO

Alagamentos são uma realidade inconveniente em várias cidades pelo mundo, e configuram-se como fenômenos de grande potencial para desestabilizar sistemas de transporte urbano. A ocorrência de alagamentos e enchentes de grandes proporções é mais frequente em grandes assentamentos urbanos que tendem a impermeabilizar o entorno de rios (Cova e Conger, 2003) - caso comum já que existe uma tendência histórica de formação de cidades nos leitos de rios. Além disso, grandes avenidas e vias arteriais são frequentemente definidas ao longo da encosta de rios devido à maior regularidade topográfica tipicamente encontrada nessas regiões, o que potencializa impactos ao sistema de transporte em eventos de inundação dos arredores do rio.

No Brasil, os alagamentos figuram como problema crônico em diversas localidades, como evidenciado pelo número de trabalhos que exploram o tema em diferentes cidades brasileiras (Da Silva e Cavalcanti Nt, 2010; Vanz, Garbossa e Fernandes, 2014; Silva, Leite e Freitas Ferreira, 2018). Nesse sentido, é fundamental entender o impacto desses fenômenos nas redes de transporte urbano, pois a fragilização desses sistemas pode resultar em perdas de grande montante tanto no espectro econômico quanto social. Dada a magnitude do problema, é fundamental a previsão de vulnerabilidades a alagamentos em projetos urbanos para que a

fragilidade possa ser resolvida de maneira mais efetiva, criando sistemas de transporte mais resilientes. Resiliência é comumente definida como a capacidade de um sistema em se adaptar quando exposto a situações adversas evitando perdas em potencial (Westrum, 2006). Segundo Folke *et al.*, (2010) a resiliência pode ser tratada de maneira generalizada, sem necessariamente conhecer os fenômenos que têm potencial de desestabilizar o sistema; ou de maneira mais específica, através da análise do impacto de um fenômeno local. Para tratar o problema de alagamentos, é preciso entender como o fenômeno impacta uma rede urbana e quais elementos e populações são mais afetadas no processo de alagamento o que enquadra o processo na categoria de estudos específicos. Dada a importância do tema, este trabalho define algumas métricas que facilitam o entendimento do impacto de alagamentos em uma rede urbana tanto em nível global quanto local. Os parâmetros propostos foram calculados para a cidade de São Carlos-SP, onde alagamentos são recorrentes em períodos chuvosos.

## 2. TRABALHOS ANTERIORES

Estudos de resiliência de redes urbanas de transporte em geral avaliam a capacidade de uma malha em absorver impactos no sistema. Em uma análise mais geral, trabalhos exploram a ocorrência de redundâncias e a conectividade como um todo em um sistema para a determinação da capacidade em prover rotas alternativas em casos de desativação de algumas vias do sistema (Leu, Abbass e Curtis, 2010; Ip e Wang, 2011; Zhang, Miller-Hooks e Denny, 2015). Vários trabalhos dessa natureza mais geral utilizam a teoria dos grafos para compreender fragilidade nos sistemas, como o de Appert e Chapelon (2007) que estudaram o impacto da remoção de arestas específicas em uma rede de Montpellier, na França; análise similar à conduzida por Rodríguez-Núñez e García-Palomares (2014), que focaram na infraestrutura de transporte público, removendo ligações do sistema metroviário de Madrid, na Espanha, e verificando as rotas afetadas pela ação. O trabalho de Berche *et al.* (2009) analisou, a partir de uma lógica similar, o efeito de ataques sistemáticos a partir de parâmetros da teoria dos grafos a redes de transporte público em 14 cidades pelo mundo, em que o autor define como “ataque” remoção de conexões na rede de transporte público. No Brasil, uma estratégia similar foi utilizada por Morelli e Cunha (2019) dessa vez voltada a redes urbanas de infraestrutura de transporte terrestre. Nesse trabalho, os autores utilizaram ataques sistemáticos às redes das 309 maiores cidades brasileiras, medindo a continuidade do sistema a partir do número de rotas que se mantém viáveis depois de um ataque, a fim de determinar qual parâmetro da teoria dos grafos melhor representa a vulnerabilidade local do sistema.

Por outro lado, alguns estudos focam em problemas mais específicos, como crises de abastecimento de petróleo (Newman, Beatley e Boyer, 2009; Martins, Rodrigues da Silva e Pinto, 2019) e desastres naturais (Litman, 2005; Lu, Peng e Zhang, 2014). Estudos que avaliam diretamente o impacto de alagamentos na performance de da rede são mais escasso, contudo o trabalho de Gil e Steinbach (2008) fez uma análise interessante do impacto de um possível alagamento na cidade de Londres, no Reino Unido, em que os autores utilizaram a teoria da sintaxe espacial para comparar as características da rede da cidade antes e depois de um alagamento. Os autores encontraram uma redução significativa da acessibilidade global no sistema, além de verificarem uma mudança na dinâmica da cidade, com a região mais acessível da cidade passando da região oeste para a norte da cidade, além da efetiva segregação entre as regiões a norte e a sul do alagamento. Enquanto a abordagem dos autores é inovadora, abrangendo o impacto estrutural de um alagamento na rede, ela possui algumas fraquezas das quais a mais evidente é o fato de os autores apenas utilizarem a variação das métricas da teoria da sintaxe. Essa abordagem é falha já que não considera de fato a perda de continuidade na rede

em um evento de alagamento. Neste trabalho, esse problema é resolvido ao separar-se o impacto em dois índices distintos, um para avaliar a perda de continuidade e outro para medir a variação na distância média apenas para as rotas que se mantêm válidas no sistema, diferente do que é feito na abordagem da sintaxe espacial. Além disso, este trabalho considera a rede de transportes como um grafo direcionado, permitindo incorporar o sentido permitido de tráfego nas vias, o que não é possível na abordagem não direcionada da sintaxe espacial.

### 3. MÉTODO PROPOSTO

A estratégia de verificação de impactos de alagamentos em redes de transportes proposta neste artigo pode ser dividida em três partes principais:

- Delineamento de zonas de alagamento;
- Simulação de impacto em rede;
- Extração de métricas locais e globais.

Essas estratégias são de simples execução, necessitando apenas de dados topográficos e sobre as regiões de risco de alagamento. Isso implica em considerar toda e qualquer rota possível na cidade, sem analisar atração ou geração de viagens. Em trabalhos futuros serão consideradas matrizes origem/destino (OD) na avaliação, o que não implicará variação na metodologia utilizada (apenas no número e no tipo de rotas avaliadas), mas talvez gere resultados diferentes.

#### 3.1. Delineamento de zonas de alagamento

Os dados acerca da rede utilizados neste trabalho estão em forma de grafo, obtidos diretamente da plataforma *OpenStreetMap* (OSM) através da biblioteca de processamento de dados urbanos para a linguagem Python de programação, *OSMnx* (Boeing, 2017). Neste formato, as vias da cidade são expressas como arestas, enquanto os pontos de interseção são definidos como nós. O grafo para exemplificação do método foi obtido para a cidade de São Carlos-SP representando apenas as vias de veículos automotores (marcadas como “drive” na plataforma OSM). Através da biblioteca *OSMnx* foram também adicionados os dados de elevação do terreno aos nós do grafo, obtidos diretamente da API da *Google Elevation*. O grafo utilizado, com a elevação indicada por esquema de cores em seus nós pode ser observado na Figura 1.

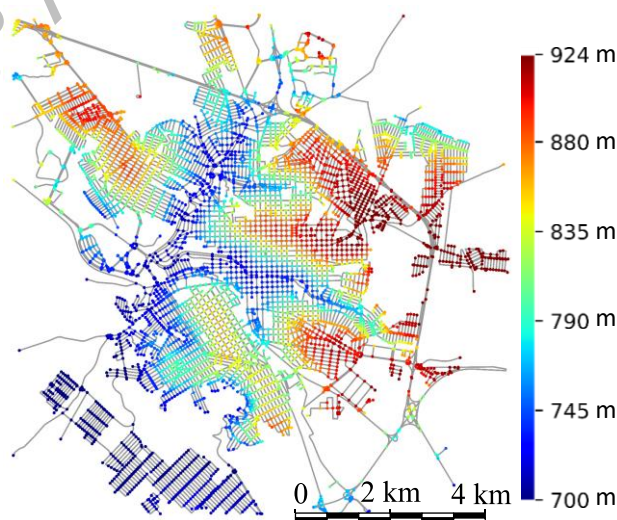
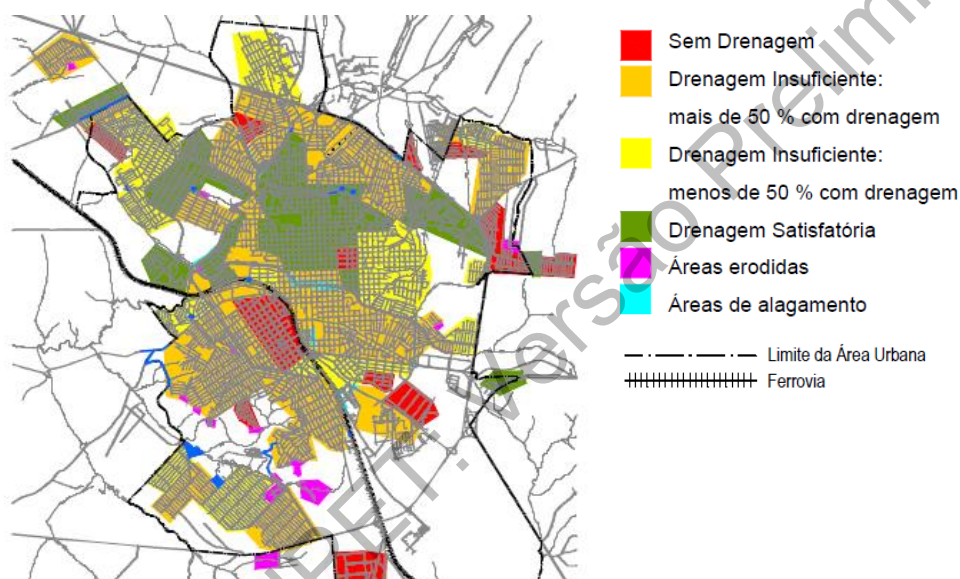


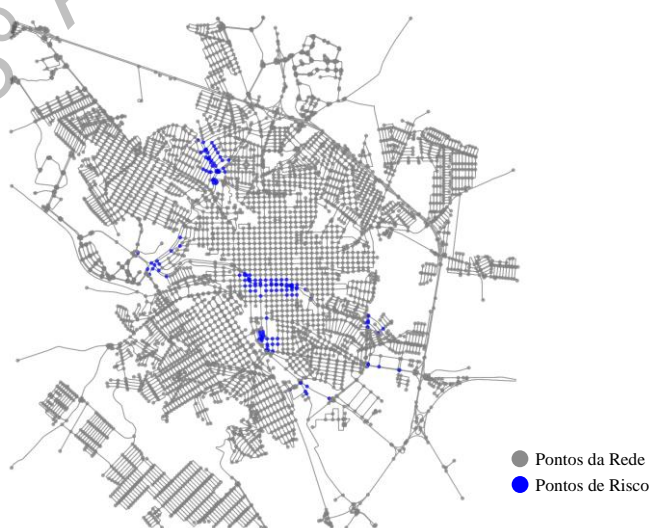
Figura 1: Grafo da cidade de São Carlos-SP com informação de elevação nos nós.

Essa elevação pode nortear de certo modo o processo de alagamento quando o nível d'água

sobe. Contudo, alagamentos são fenômenos extremamente complexos que dependem de vários fatores como intensidade de chuva e extensão da bacia hidrográfica, bem como de fatores mais diretamente ligados ao processo de urbanização como a impermeabilização do solo. Neste trabalho, não são tratados os processos hidrológicos já que essa é uma área de pesquisa por si só, mas foi utilizada a elevação do terreno e o mapa desenvolvido pela prefeitura da cidade de São Carlos-SP durante a confecção do Plano Diretor (PD) para a cidade, finalizado em 2005. Nesse mapa são marcadas regiões com risco de alagamento em períodos chuvosos de alta intensidade, como podem ser verificadas na Figura 2. O mapa com as regiões de risco existe em formato de imagem, provindo de uma mídia digital fornecida pela prefeitura. Para incorporação dos dados ao grafo, os pontos sujeitos a alagamento foram manualmente marcados no grafo como uma característica dos nós do grafo, e o resultado pode ser observado na Figura 3.



**Figura 2:** Mapa de regiões sujeitas a alagamento em São Carlos-SP.  
Fonte: Conferência da Cidade, São Carlos (2002) - CD-ROM



**Figura 3:** Grafo da cidade de São Carlos-SP com dados de pontos com risco de alagamento.



### 3.2. Simulação de cenários

Além da região de risco definida no PD de São Carlos, foram simulados cenários com maior impacto na rede. Para a obtenção de regiões afetadas por alagamentos mais severos que os previstos, foram utilizadas informações topográficas do terreno da cidade e um processo iterativo de verificação. Primeiramente, considera-se que os pontos pertencentes à região de risco original estão alagados. Depois considera-se um aumento  $\Delta y$  no nível da água no entorno dos pontos alagados, de forma que qualquer nó adjacente a um nó alagado também seja alagado, desde que a diferença entre sua elevação e a elevação do nó alagado adjacente seja inferior ou igual a  $\Delta y$ . Esse processo é então repetido até que não haja mais nenhum nó adjacente a um nó alagado com elevação inferior ao nível d'água. Uma esquematização do processo pode ser encontrada na Figura 4.

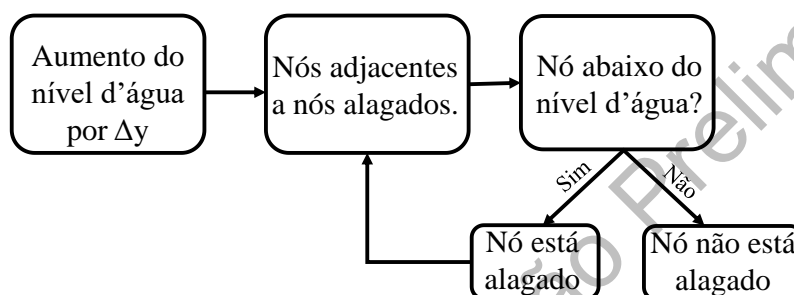


Figura 4: Esquematização do processo de simulação de alagamentos.

### 3.3. Simulação de impactos na rede

Nesse ponto foram simulados os impactos de um alagamento na rede de transportes terrestre. O processo é governado pela remoção de arestas no grafo representativo da rede, o que equivale, efetivamente, à desativação de uma via devido ao impacto da rede. Para simular o efeito de um alagamento na rede neste trabalho, desativa-se qualquer aresta que esteja conectada a um ponto alagado. Isso é uma simplificação, já que nem toda aresta conectada a um nó alagado está completamente submersa, podendo ter parte de sua extensão acima do nível d'água. Contudo, mesmo segmentos de via parcialmente alagados se tornam intransitáveis, pois o sistema de transporte depende da continuidade de suas vias para seu funcionamento pleno, portanto desativar os segmentos que possuem um alagamento em pelo menos uma de suas interseções extremas é uma aproximação próxima do real.

### 3.4. Extração de métricas locais e globais

Os cenários foram analisados de acordo com métricas relacionadas às rotas da rede: *Continuidade de Rede* e *Eficiência de Rotas*.

#### 3.4.1. Continuidade de rede

Uma das características mais importantes para uma cidade em momentos de crise é sua capacidade de manter o sistema de transporte contínuo, sem que regiões dentro de uma mesma cidade sejam desconectadas devido a um problema que ocorre na malha urbana. A continuidade de um sistema em períodos de crise depende do tipo de impacto que ocorre na rede, bem como do tipo de rede, principalmente com relação à redundância prevista no sistema. Uma rede que oferece várias opções de rota para um mesmo par origem/destino tende a ser capaz de manter sua continuidade mais facilmente já que não depende exageradamente de elementos específicos da rede.

Para medir continuidade na rede, foram computadas as rotas válidas no interior da rede. Neste trabalho, é definida **rota válida** uma rota possível entre uma origem e um destino através da rede definida pelo grafo, como proposto por Morelli e Cunha (2019). Em uma situação normal de operação, qualquer ponto na rede de São Carlos pode ser acessado a partir de qualquer outro. Dessa forma, o número inicial de rotas válidas é equivalente ao número total de combinações entre os nós de uma rede:

$$R_v(G) = N_G(N_G - 1) \quad (1)$$

Em que: G: Grafo de referência;  
N<sub>G</sub>: Número de nós no grafo G  
R<sub>v</sub>(G): Rotas Válidas do Grafo G

Por outro lado, quando ocorre um impacto na rede, algumas rotas ficam inviabilizadas, acarretando na divisão da rede, que deixa de ser um bloco único e integrado e começa a se deteriorar em um conjunto de blocos desconectados entre si. Para o cálculo das rotas válidas nessa nova configuração foi preciso definir quais são as componentes fortemente conectadas do grafo (conjuntos nos quais se pode chegar de um nó na rede até qualquer outro). Para encontrar as componentes fortemente conectadas de um grafo, utilizou-se a biblioteca de processamento de grafos *NetworkX* (Hagberg, Schult e Swart, 2008).

A partir da obtenção das componentes fortemente conectadas, pode-se determinar o número de rotas válidas na rede a partir de:

$$R_v(G_I) = \sum_{G' \in G_I} N_{G'}(N_{G'} - 1) \quad (2)$$

Em que: G<sub>I</sub>: Grafo de referência após um impacto;  
G': Componente fortemente conectada de G<sub>I</sub>;  
N<sub>G</sub>: Número de nós no grafo G'  
R<sub>v</sub>(G<sub>I</sub>): Rotas Válidas do Grafo G<sub>I</sub>

### 3.4.2. Eficiência de rotas

Pode-se medir a eficiência de um sistema de transportes após um choque a partir das distâncias médias percorridas nas rotas da malha. Quando um elemento da rede é removido, rotas que antes dependiam desse elemento têm que ser desviadas, em geral aumentando o comprimento total do trajeto. Uma rede é eficiente em absorver um impacto ambiental quando oferece rotas similares conectando os pontos da cidade, não requerendo grandes desvios e levando o aumento na distância média entre os pontos da rede a ser mínimo ou nulo. É fácil notar que a eficiência só pode ser definida para rotas válidas no sistema não havendo possibilidade de se comparar rotas impossíveis no sistema, assim a eficiência de um sistema pode ser definida como:

$$\eta(G_I) = \frac{\sum_{s \neq t \in G_I} \frac{\sigma_{st}(G)}{\sigma_{st}(G_I)}}{R_v(G_I)} \quad (3)$$

Em que: G<sub>I</sub>: grafo de referência após um impacto;  
G: Grafo original;  
s e t: nós existentes no grafo, em que a rota s-t é válida no grafo com impacto;  
σ<sub>st</sub>(G): distância entre s e t no grafo original;  
σ<sub>st</sub>(G<sub>I</sub>): distância entre s e t no grafo após o impacto;  
R<sub>v</sub>(G<sub>I</sub>): Rotas Válidas do Grafo G<sub>I</sub>

### 3.4.3. Análise local

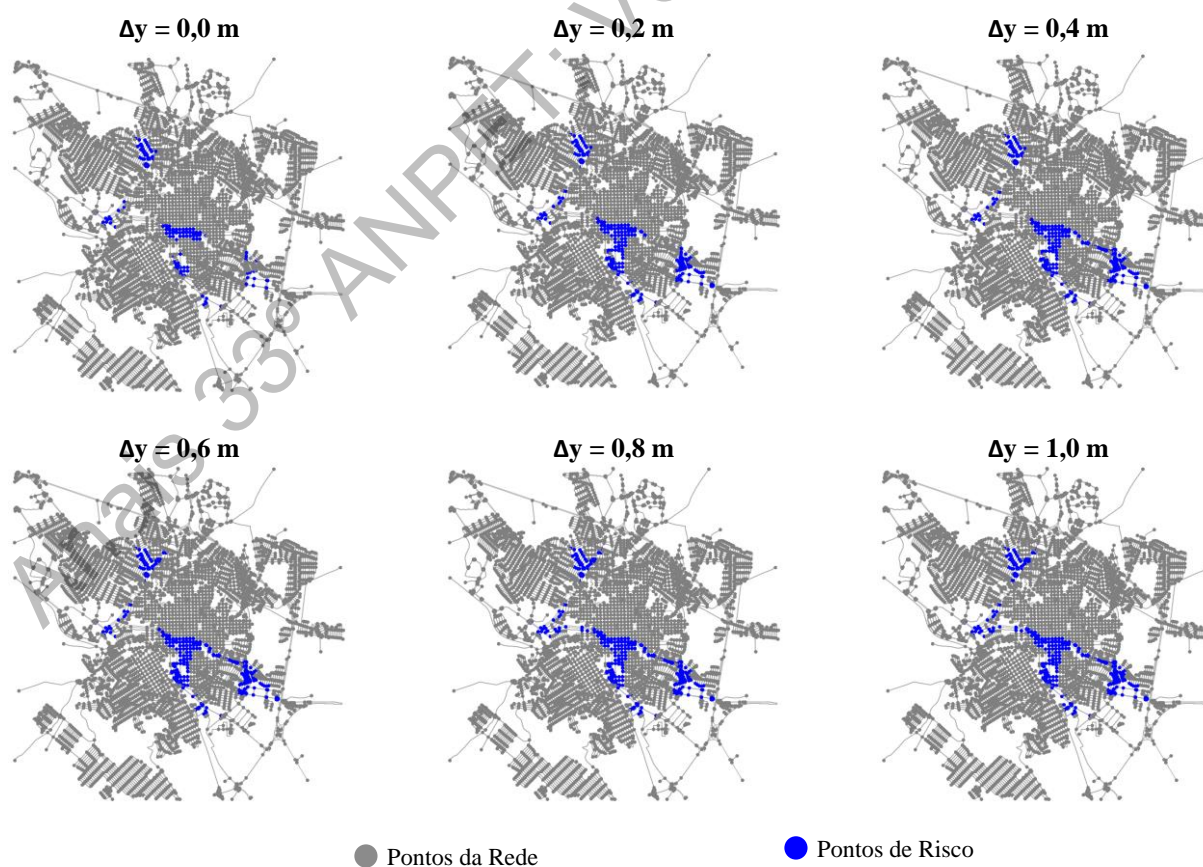
No caso da eficiência do sistema, foi verificada também a variação local do impacto de um alagamento. Nesse caso, em vez de analisar como os comprimentos médios variam para toda a cidade, analisou-se como os comprimentos médios variam ponto a ponto. Nesse caso, a equação de eficiência para o caso local é:

$$\eta(s) = \frac{\sum_{t \in G_I} \frac{\sigma_{st}(G)}{\sigma_{st}(G_I)}}{R_v(s)} \quad (4)$$

Em que:  $G_I$ : grafo de referência após um impacto;  
 $s$ : nó de referência  
 $t$ : nós existentes no grafo e diferentes de  $s$  em que a rota  $s-t$  é válida no grafo com impacto;  
 $\sigma_{st}(G)$ : distância entre  $s$  e  $t$  no grafo original;  
 $\sigma_{st}(G_I)$ : distância entre  $s$  e  $t$  no grafo após o impacto;  
 $R_v(s)$ : Rotas Válidas do para o nó  $s$

## 4. RESULTADOS

Foram analisados seis cenários de alagamento diferentes: o cenário base é referente às zonas de alagamento previstas no PD e a partir dele foram criados cenários aumentando o nível d'água de 20 cm em 20 cm até que o nível atingisse 1,0 m acima do que é previsto no PD. A Figura 5 contém os resultados para todos os cenários com os pontos alagados sendo marcados em azul.



**Figura 5:** Evolução dos alagamentos com o aumento do nível de água a partir das zonas de risco.

É possível notar que a partir de uma elevação de 40 cm não existe grande variação nos pontos alagados da rede. Isso se deve à topografia da cidade, que se caracteriza por grandes inclinações nas proximidades dos rios. Contudo, existe grande potencial de segregação na rede, com a linha do rio dividindo a cidade quando a água sobe acima de 40 cm do nível definido dos pontos críticos.

A partir das simulações foi possível traçar a variação da continuidade e da eficiência na rede para cada cenário de alagamento, como pode ser visto na Figura 6. Nota-se que a continuidade global do sistema não é muito comprometida com a expansão do alagamento, contudo é possível perceber que alagamentos na rede inviabilizam entre 11% e 18% das rotas, levando a uma continuidade de 89% no caso mais brando de alagamento e de 82% no caso mais grave. Por outro lado, a eficiência do sistema tem um decaimento mais expressivo, com um máximo de 92% no caso mais brando e um mínimo de 65% no caso mais grave. O comprimento médio dos trajetos depende do inverso da eficiência, o que implica no caso mais brando de alagamento as rotas na cidade são em média 9% mais longas, enquanto no caso mais grave as rotas são em média 54% mais longas. Esse impacto expressivo na eficiência média para o município reflete a grande dependência das rotas na cidade nas vias da região central do sistema. Nos casos de alagamento em que o sistema não pode mais contar com essas vias, o comprimento dos caminhos tende a aumentar significativamente.

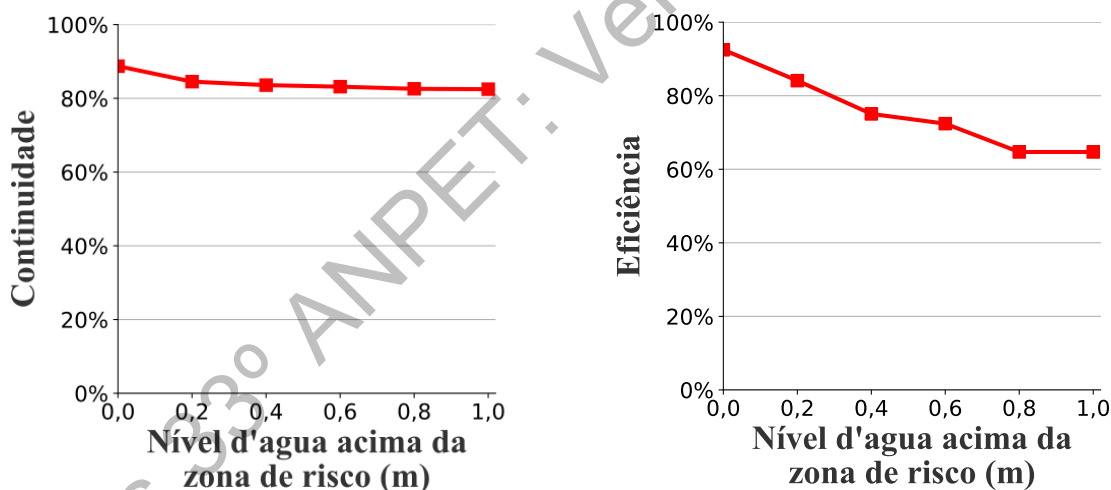


Figura 6: Gráficos de variação da continuidade e eficiência com o nível d'água acima da zona de risco.

Contudo, apenas os resultados médios para o município não refletem completamente realidade local do sistema. Como pode ser observado na Figura 7, existem regiões da cidade em que a eficiência média é significativamente impactada, como o sudoeste da cidade que, ao ser praticamente isolado do restante da cidade pela inundação tem seus caminhos médios aumentados significativamente, havendo pontos em que a eficiência chega a 30% com  $\Delta y$  maior que 40 cm. Isso significa que em alguns pontos da cidade os caminhos médios ficam três vezes mais longo durante um cenário do tipo.

Nota-se que a região sudeste da cidade é desproporcionalmente atingida pela ocorrência do alagamento e que, como esperado, as regiões mais próximas ao alagamento são mais impactadas pelo evento que regiões distantes. Por outro lado, as regiões mais altas da cidade e



mais afastadas do centro de maior impacto dos alagamentos são as menos afetadas. Contudo, pode-se notar que a eficiência do sistema como um todo é reduzida sem muitos pontos pouco ou não afetados no cenário de maior impacto.

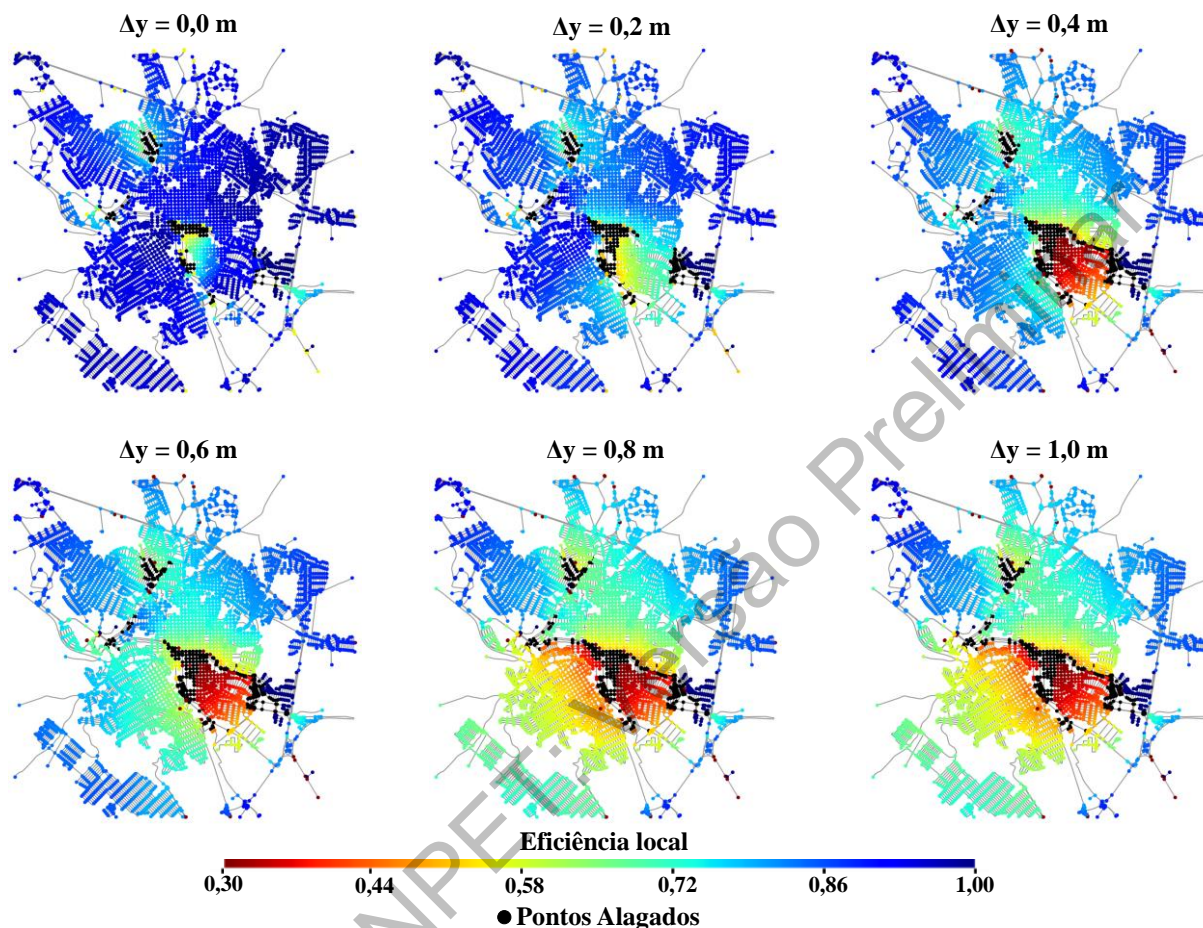


Figura 7: Evolução da eficiência local com a elevação do nível d'água.

## 5. CONCLUSÕES

Este artigo propôs um método de avaliação do impacto de alagamentos em sistemas de transporte urbanos a partir das métricas *Continuidade de Rede* e *Eficiência de Rotas*. O método foi aplicado à cidade de São Carlos no interior de São Paulo.

Para a criação de cenários, foram avaliadas a região de risco de alagamento fornecida pela cidade no PD, bem como o entorno dessa região para simular eventos mais graves que o esperado. No cenário que considera apenas a condição de risco estipulada no PD, cerca de 11% das rotas são inviabilizadas na cidade, com perda média de 8% em eficiência no comprimento das rotas do sistema, implicando um aumento médio de aproximadamente 9% no comprimento total das rotas. No pior caso avaliado, em que o nível d'água sobe 1,0 m acima do esperado no PD, 18% das rotas são inviabilizadas, resultado levemente superior ao da condição inicial, o que indica que o potencial de enchentes em isolar completamente regiões no sistema é relativamente baixo. Existe, contudo, uma tendência significativa de redução na eficiência do sistema no pior cenário, com uma redução de 35% na eficiência média do sistema. Nota-se também que existem regiões na cidade desproporcionalmente afetadas pelos alagamentos, com alguns pontos tendo aumentos de até três vezes no comprimento médio de rota para o caso mais

grave de alagamento.

O aumento do impacto na eficiência do sistema, principalmente a nível local, já é observável com a elevação de apenas 40 cm no nível d'água previsto no PD. Esse resultado é evidência do equilíbrio frágil que existe entre os fenômenos climáticos e os sistemas urbanos de transporte, o que é particularmente preocupante em um cenário futuro no qual a frequência de eventos climáticos extremos tende a aumentar. A fragilidade dos sistemas de transporte com relação a esses fenômenos denota ainda o quanto um sistema de transporte urbano resiliente deve possuir preocupação multidisciplinar. Além da forma urbana, outros fatores como drenagem e taxa de impermeabilização do solo têm impacto direto na possibilidade de ocorrência de fenômenos como os simulados neste artigo, o que expande a responsabilidade da criação de um sistema eficiente de transporte além do escopo isolado da infraestrutura de transportes.

Os fenômenos observados são específicos para a cidade de São Carlos-SP, contudo é esperado que outros sistemas, particularmente os que dependem excessivamente de vias marginais para a circulação de veículos, tenham comportamento similar, o que pode ser verificado em trabalhos futuros. Além disso, outros trabalhos podem verificar a relação entre parâmetros socioeconômicos, como renda e valor propriedade, e o impacto local nas redes durante alagamentos, já que se espera certa desvalorização dos imóveis mais afetados por esses eventos. Além disso, como discutido anteriormente, pode ser interessante utilizar rotas alocadas a partir da matriz OD da cidade no cálculo da continuidade e da eficiência, o que não implica variação metodológica na análise, mas muda as rotas consideradas e pode gerar resultados mais elucidativos.

#### Agradecimentos

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

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Appert, M. and Chapelon, L. (2007) 'Measuring urban road network vulnerability using graph theory: The case of Montpellier's road network', *La mise en carte des risques naturels*.
- Berche, B. *et al.* (2009) 'Resilience of public transport networks against attacks', *European Physical Journal B*. doi: 10.1140/epjb/e2009-00291-3.
- Boeing, G. (2017) 'OSMnx: New methods for acquiring, constructing, analyzing, and visualizing complex street networks', *Computers, Environment and Urban Systems*. doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2017.05.004.
- Cova, T. J. and Conger, S. (2003) 'Transportation Hazards', in *Transportation Engineers' Handbook*.
- Folke, C. *et al.* (2010) 'Resilience thinking: Integrating resilience, adaptability and transformability', *Ecology and Society*. doi: 10.5751/ES-03610-150420.
- Gil, J. and Steinbach, P. (2008) 'From flood risk to indirect flood impact: Evaluation of street network performance for effective management, response and repair', *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. doi: 10.2495/FRIAR080321.
- Hagberg, A. A., Schult, D. A. and Swart, P. J. (2008) 'Exploring network structure, dynamics, and function using NetworkX', in *Proceedings of the 7th Python in Science Conference (SciPy)*.
- Ip, W. H. and Wang, D. (2011) 'Resilience and friability of transportation networks: Evaluation, analysis and optimization', *IEEE Systems Journal*. doi: 10.1109/JSYST.2010.2096670.
- Leu, G., Abbass, H. and Curtis, N. (2010) 'Resilience of ground transportation networks: a case study on Melbourne', *33rd Australian Transport Research Forum Conference*.
- Litman, T. (2005) 'Lessons From Katrina and Rita: What Major Disasters Can Teach Transportation Planners', *Journal of Transportation Engineering*. doi: 10.1061/(asce)0733-947x(2006)132:1(11).
- Lu, Q.-C., Peng, Z.-R. and Zhang, J. (2014) 'Identification and Prioritization of Critical Transportation Infrastructure: Case Study of Coastal Flooding', *Journal of Transportation Engineering*. doi: 10.1061/(asce)te.1943-5436.0000743.
- Martins, M. C. da M., Rodrigues da Silva, A. N. and Pinto, N. (2019) 'An indicator-based methodology for

- assessing resilience in urban mobility', *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. doi: 10.1016/j.trd.2019.01.004.
- Morelli, A. B. and Cunha, A. L. (2019) 'Verificação de vulnerabilidades em redes de transporte: uma abordagem pela teoria dos grafos.', in *Artigo Submetido ao 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte*. Balneário Camboriú.
- Newman, P., Beatley, T. and Boyer, H. (2009) 'Resilient cities: Responding to peak oil and climate change', *Australian Planner*. doi: 10.1080/07293682.2009.9995295.
- Rodríguez-Núñez, E. and García-Palomares, J. C. (2014) 'Measuring the vulnerability of public transport networks', *Journal of Transport Geography*. doi: 10.1016/j.jtrangeo.2014.01.008.
- Silva, F. G., Leite, M. E. and Freitas Ferreira, M. F. (2018) 'ANÁLISE ESPACIAL DAS ÁREAS DE INUNDAÇÕES EM MONTES CLAROS/MG, ASSINALADAS PELO PLANO MUNICIPAL DE SANEAMENTO BÁSICO DE 2015', *Geoambiente On-line*. doi: 10.5216/revgeoamb.v0i31.47567.
- Da Silva, M. L. N. and Cavalcanti Nt, M. T. de O. (2010) 'IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS VULNERÁVEIS AO ALAGAMENTO PLUVIAL NA CIDADE DE NATAL/RN', *HOLOS*. doi: 10.15628/holos.2010.459.
- Vanz, A., Garbossa, L. H. P. and Fernandes, L. Go. (2014) 'Alagamentos devido a maré positiva em Florianópolis, SC, Brasil', *Resumos IV Congresso Brasileiro de Oceanografia*, (November). doi: 10.13140/2.1.3747.3607.
- Westrum, R. (2006) 'A typology of resilience situations', in *Resilience engineering: Concepts and percepts*.
- Zhang, X., Miller-Hooks, E. and Denny, K. (2015) 'Assessing the role of network topology in transportation network resilience', *Journal of Transport Geography*. doi: 10.1016/j.jtrangeo.2015.05.006.

---

André Borgato Morelli (andre.morelli@usp.br)

André Luiz Cunha (alcunha@usp.br)

Departamento de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo

Av. Dr. Carlos Botelho, 1465 – São Carlos, SP, Brasil