

Influência de Medidas da Topologia de Redes de Ruas na Análise da Mobilidade Urbana: Um Estudo Aplicado à Cidade de João Pessoa – PB

Paulo Ribeiro Lins Júnior¹, LÍlian Honorio Teixeira¹,

¹Grupo de Pesquisa em Comunicações e Processamento de Informação – GComPI
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB
Campina Grande – PB – Brazil

paulo.lins@ifpb.edu.br, lilian.honorio@academico.ifpb.edu.br

Abstract. *The article investigates the influence of the topology of street networks in a given location as a possible set of indicators for analyzing urban mobility. It proposes an index based on measures of these networks, considering neighborhoods as the level of granularity. A use case considers ten neighborhoods in João Pessoa - PB, ranked first based on each network characteristic individually, then with the index that considers the joint influence of all. The results point to the importance of considering topological aspects of street networks as possible indicators and the impact of the granularity of the area observed in studies on urban mobility.*

Resumo. *O artigo investiga a influência da topologia das redes de ruas de uma dada localidade, como possível conjunto de indicadores para análise de mobilidade urbana e propõe um índice baseado em medidas dessas redes, considerando os bairros como nível de granularidade. Um caso de uso é realizado com 10 bairros da cidade de João Pessoa - PB, ranqueados primeiro com base em cada característica de rede individualmente, depois com o índice que considera a influência conjunta de todas. Os resultados apontam para a importância de considerar aspectos topológicos das redes de rua como possíveis indicadores, e do impacto da granularidade da área observada nos estudos sobre de mobilidade urbana.*

1. Introdução

A Lei nº 12.587, de janeiro de 2012, instituiu a Política Nacional de Mobilidade Urbana (PNMU), com o objetivo de orientar a atuação governamental em busca de uma mobilidade urbana cada vez mais sustentável [Semob 2018].

Com isso, gestores de todas as esferas do governo tiveram de propor metodologias e indicadores para propor e avaliar seus planos de mobilidade urbana, contemplando aspectos como os serviços de transporte público coletivo, a circulação viária, as infraestruturas do sistema de mobilidade urbana, entre outros.

Nesse âmbito, o relatório *Indicadores para monitoramento e avaliação da efetividade da Política Nacional de Mobilidade Urbana* (PNMU) [Semob 2018], produzido em 2018 pela Secretaria Nacional de Mobilidade Urbana, vinculada ao Ministério das Cidades, apresenta uma lista de 31 indicadores, construídos a partir de 7 eixos temáticos.

Porém, praticamente nenhum desses indicadores leva em consideração a estrutura da malha viária, ou dos espaços de deslocamento de pedestres e/ou ciclistas, desconsiderando que investimentos nessas estruturas podem impactar em diversos outros indicadores importantes, como, por exemplo, peso do custo de transporte público na renda média ou percentual da população que gasta uma hora ou mais no deslocamento casa/trabalho.

Dessa forma, é importante o desenvolvimento de modelos que possam representar e facilitar a mensuração de características dessas estruturas viárias, e, nesse aspecto, modelos que usam representação de redes de ruas são importantes aliados.

Redes de ruas são basicamente representações em grafos da estrutura viária de uma região, construídas a partir do mapa original, do qual são filtrados todos os elementos que não são malhas viárias. Nesse contexto, os nós dessa rede representam estruturas urbanas, como praças, edificações ou espaços urbanos, e os enlaces representam as vias de tráfego das ruas.

Diversos trabalhos tem investigado a influência de características e medidas de redes de rua no contexto de mobilidade urbana, como [Tokuda et al. 2022], [Tsiotas and Polyzos 2017], [Geng and Zhang 2023] e [Altaweel et al. 2021]. No entanto, em todos esses trabalhos, são consideradas escalas de redes que contemplam cidades ou regiões maiores, o que muitas vezes pode fazer passar despercebidas as variações dessas características de redes quando consideramos estruturas com menor granularidade.

Esse trabalho tem como objetivo principal investigar a influência da topologia das redes de ruas de uma dada localidade como possível conjunto complementar de indicadores para análise de mobilidade urbana e propor um índice de mobilidade urbana baseado em medidas da rede de ruas, considerando os bairros como nível de granularidade dessa análise, para auxiliar gestores a direcionar recursos para melhoria da mobilidade urbana e de todos os aspectos sócio-econômicos associados a ela.

O restante do trabalho é organizado como a seguir: na seção 2 é apresentada a proposta de um índice de mobilidade urbana com base nas medidas da rede de ruas de uma localidade; na seção 3, é apresentada a metodologia do estudo desenvolvido nesse trabalho; os resultados e suas discussões são apresentados na seção 4; e, por fim, a seção 5 traz as conclusões do trabalho.

2. Índice de Mobilidade Urbana com Base nas Medidas da Rede de Ruas

A ideia central da construção desse índice é usar medidas da rede como critérios e, então, usar um método de decisão multicritério para ranquear as localidades analisadas de acordo com as informações topológicas da rede de ruas.

Dessa forma, a primeira coisa é construir uma matriz de decisão X contendo em suas linhas as m localidades a serem analisadas $A_1, A_2 \dots A_m$, e nas colunas, os n critérios $C_1, C_2 \dots C_n$ a serem considerados, que nesse trabalho são as medidas de rede.

A matriz de decisão obtida serve de entrada para um método decisório multicritério. Para a construção desse índice, optou-se pelo TOPSIS (*Technique of Order Preference Similarity to the Ideal Solution*), uma técnica de avaliação de performances de alternativas através da similaridade com uma solução ideal, de modo que a melhor alternativa seja aquela mais próxima da solução ideal e mais distante da solução não ideal, o

que casa perfeitamente com a necessidade do trabalho [Chakraborty 2022].

A aplicação do TOPSIS segue os seguinte passos:

1. **normalização da matriz de decisões**, que permite que todos os critérios possam ser comparados diretamente, independente de suas ordens de grandeza ou de sua natureza. A normalização é feita pela equação

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}, i = 1, 2, 3, \dots, m; j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

2. **cálculo das soluções ideal e não ideal**, usando a seguinte equação

$$A^+ = (p_1^+, p_2^+, \dots, p_n^+) \quad A^- = (p_1^-, p_2^-, \dots, p_n^-) \quad (2)$$

sendo $p_j^+ = \max(r_{ij})$ e $p_j^- = \min(r_{ij})$.

3. **cálculo das medidas de separação** entre os valores de cada critério e as soluções ideal (d_i^+) e não ideal (d_i^-), utilizando medidas de distância (nesse trabalho optou-se, por simplicidade, pela norma L2)

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (p_j^+ - r_{ij})^2} \quad d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (p_j^- - r_{ij})^2} \quad (3)$$

4. **cálculo do índice de proximidade relativa**, permitindo escolher como melhor alternativa aquela mais próxima da solução ideal positiva e mais distante da solução ideal negativa. Para o caso específico desse trabalho, como o objetivo é que no topo do *ranking* esteja a localidade com maior necessidade de investimento, optou-se por uma alteração no cálculo desse índice, sendo usada a seguinte equação

$$C_i = \frac{d_i^+}{d_i^+ + d_i^-}, \quad 0 \leq C_i \leq 1. \quad (4)$$

Ao final, com base no índice de proximidade relativa C_i , pode-se, então, ranquear as alternativas do problema, que no caso desse trabalho, são os bairros considerados no estudo.

3. Metodologia

Nesse trabalho, foram consideradas as informações da topologia da cidade de João Pessoa, capital da Paraíba. Foram selecionados aleatoriamente 10 bairros da cidade – Torre, Tambauzinho, Expedicionários, Miramar, Cabo Branco, Tambaú, Manaíra, Costa do Sol, Barra de Gramame e Muçumagro

que tiveram os dados de suas redes de ruas obtidos do OpenStreetMap [OpenStreetMap contributors 2017], um banco de dados de mapeamento mundial colaborativo e de código aberto, no qual pode-se obter dados de ruas e interseções, juntamente com dados de atributos sobre tipos de estradas, nomes e (quando disponíveis) velocidades, larguras e números de faixas, tendo licença *Open Data Commons Open Database License*. Foram obtidos dados de redes de ruas referentes ao deslocamento de automóveis e de pedestres, utilizando-se a biblioteca OSMNx [Boeing 2017], escrita em Python.

Foram consideradas as seguintes medidas de rede:

- **n** : contagem de nós no grafo;
- **m** : contagem de arestas (ruas) no grafo;
- **k-avg** : grau médio do nó do grafo (grau de entrada e grau de saída);
- **edge-length-total**: comprimento total da aresta do grafo (metros);
- **edge-length-avg**: comprimento médio da borda;
- **streets-per-node-avg**: quantidade média de ruas que se conectam a cada nó;
- **streets-per-node-counts**: quantidade de ruas por nó;
- **streets-per-node-proportions**: proporção de ruas por nó;
- **intersection-count**: quantidade de interseções no grafo;
- **street-length-total**: comprimento total do segmento de rua do grafo;
- **street-segment-count**: contagem dos segmentos de rua do grafo;
- **street-length-avg**: comprimento médio da rua;
- **circuitry-avg**: comprimento médio do circuito de rua usando as arestas não direcionadas;
- **self-loop-proportion**: proporção de arestas que são auto loops no grafo;
- **clean-intersection-count**: quantidade de intersecções limpas entre as arestas;
- **node-density-km**: contagem de nós no grafo por quilômetro quadrado;
- **intersection-density-km**: densidade de intersecções por quilômetro;
- **edge-density-km**: densidade de borda por quilômetro;
- **street-density-km**: densidade de rua por quilômetro
- **clean-intersection-density-km**: densidade de interseção limpas por quilômetro.

A análise desenvolvida no artigo é dividida em duas partes. No primeiro momento, todas as medidas acima listadas foram comparadas isoladamente com relação à rede de ruas referentes ao deslocamento de automóveis e de pedestres, e os bairros foram ranqueados com relação a cada medida. Essa comparação é necessária para dar uma visão de que características da rede se diferenciam mais nas localidades analisadas e como elas podem impactar isoladamente na mobilidade considerando as duas formas de tráfego.

Em um segundo momento, as métricas foram consideradas de forma conjunta, para obter um ranqueamento dos bairros analisados com base na sua necessidade de melhor estruturar suas redes de ruas, usando o TOPSIS, descrito na seção 2 do artigo.

4. Resultados e Discussões

Nas Figuras 1a à 2a e 2b à 2h são apresentados os gráficos de cada uma das métricas de rede listadas na seção 3, agrupadas por bairros, considerando as redes de ruas do ponto de vista dos automóveis e dos pedestres. Em todos os gráficos, os valores estão ordenados (com relação aos automóveis) de forma decrescente, visando facilitar a leitura das informações apresentadas.

O primeiro ponto a ser destacado observando os gráficos é que não existe uma unanimidade com relação ao ordenamento dos bairros analisados em todas as medidas consideradas.

De fato, é perceptível que existem diferenças nas distribuições conjuntas apresentadas em cada gráfico, sendo a distribuição apresentada na Figura 1c muito mais próxima de uma distribuição uniforme, o que não acontece com a distribuição do número de nós

(Figura 1a), na qual existe uma grande concentração de ocorrências em alguns bairros, gerando quase um efeito de cauda nos bairros com menor quantidade de nós.

Por outro lado, quando se comparam as distribuições apresentadas nos gráficos das Figuras 1a, 1b, 1d, 1g, 1h e 1i, por exemplo, é possível perceber que elas tem praticamente a mesma forma, inclusive com praticamente as mesmas posições no ranqueamento dos bairros. É possível observar esse comportamento também entre outras medidas.

Curiosamente, essas similaridades nas distribuições das medidas consideradas acontecem com medidas que foram computadas de forma similar. É possível, observando esses gráficos, notar a ocorrência de, ao menos, três grupos: medidas obtidas por contagem, medidas formadas por médias de outros valores e medidas de densidade.

Também é interessante lançar um olhar sobre as diferenças nas distribuições do ponto de vista do automóvel e do pedestre. Observando os gráficos das medidas obtidas por contagem (Figuras 1a, 1b, 1d, 1g, 1h e 1i), pode-se perceber discrepância significativa entre os bairros, com destaque para o Costa do Sol, em que essas medidas tem sempre valores significativamente mais altos do ponto de vista dos pedestres (tipicamente com valores superiores à 40% quando comparados com os automóveis). Isso é um indicador de que o bairro Costa do Sol tem mais estrutura para deslocamento de pedestres do que de automóveis, e mesmo assim, para ambos, apresenta resultado melhor do que outros bairros considerados mais nobres, que abriga uma população com maior poder aquisitivo, como é o caso de Manaíra, Cabo Branco e Tambaú, por exemplo.

Além disso, é importante destacar que as características das redes de rua não se mantêm as mesmas para bairros adjacentes, que compartilham fronteiras. É o que acontece quando se comparam os resultados apresentados para a densidade de nós por quilômetro (Figura 2d). Os resultados obtidos para os bairros de Costa do Sol e Barra de Gramame se assemelham, porém são mais de 300% menores do que o resultado para o bairro do Muçumagro. O mesmo fenômeno também é observável quando são comparados os bairros de Cabo Branco, Miramar e Tambaú, que são todos adjacentes, porém Cabo Branco apresenta, do ponto de vista dos automóveis, cerca de $35 \text{ nós}/\text{km}^2$, Miramar tem aproximadamente $147 \text{ nós}/\text{km}^2$ e Tambaú $110 \text{ nós}/\text{km}^2$. Para além desses exemplos, essa discrepância entre bairros vizinhos se repete em praticamente todas as medidas observadas.

No entanto, não se pode desconsiderar que cada localidade apresentou uma distribuição quase singular das medidas observadas. Essa diferença entre as medidas para os diferentes bairros se apresenta como uma dificuldade na implementação de políticas públicas e investimentos que por ventura possam utilizar métricas de rede como indicadores de mobilidade urbana, uma vez que existe uma variabilidade destacada entre os tipos de transporte considerados, entre as formas com que as medidas são realizadas, além, claro, entre as diferentes localidades.

Uma possível opção para transpor essas limitações é construir medidas de comparação que considerem as influências de todas as medidas de forma conjunta. Uma das contribuições desse trabalho é justamente apresentar como alternativa uma medida unificada que possa indicar que localidades teriam prioridade para receber investimentos, considerando todas as medidas de forma conjunta, conforme foi apresentado na seção 3.

O resultado dessa análise é apresentado no gráfico da Figura 3, no qual são mostra-

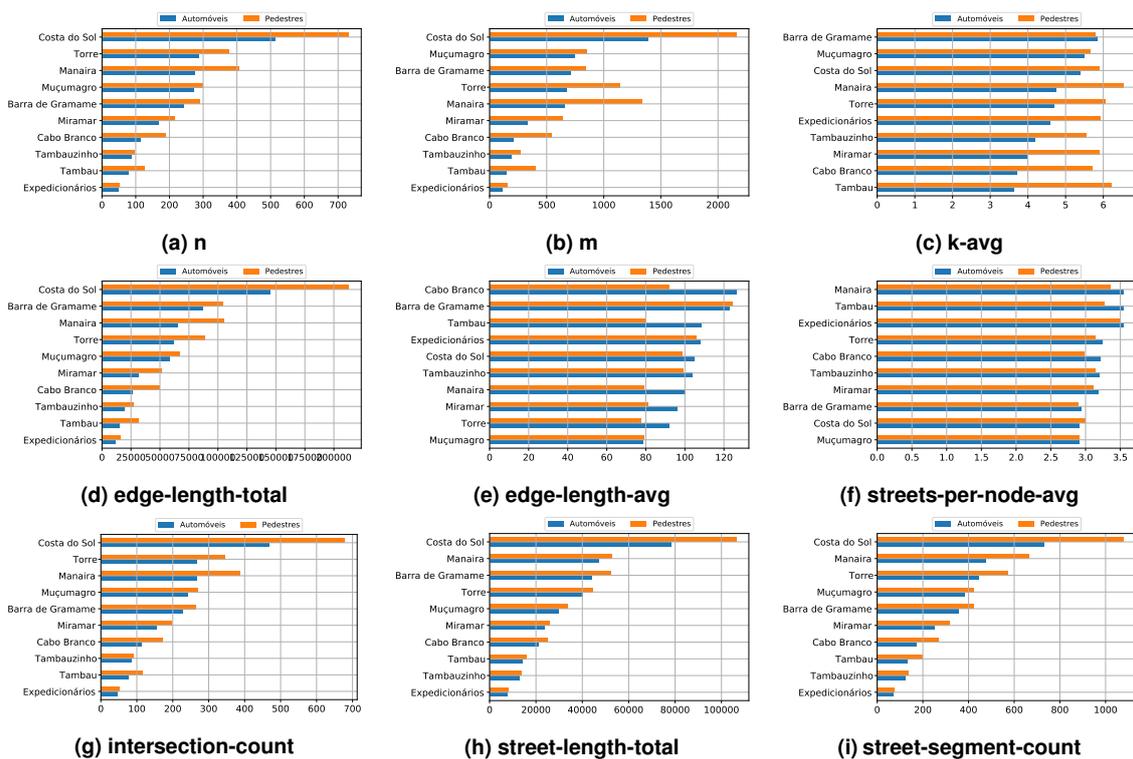


Figura 1. Comparação entre medidas da rede de ruas com relação aos automóveis e aos pedestres - parte 1

dos os índices de proximidade relativa da melhor solução calculado pelo TOPSIS, descrito na seção anterior.

Como é possível ver, o bairro do Cabo Branco é indicado como o bairro mais necessitado de estrutura de mobilidade, com um índice cujo valor é 280% superior, no caso dos automóveis, e 321%, no caso dos pedestres quando comparado com o melhor caso, o bairro da Costa do Sol.

Tal afirmação contraria, em um primeiro momento, o senso comum, considerando que a comparação contempla o Cabo Branco, bairro nobre do litoral pessoense, no qual estão localizados aparelhos urbanos como praças, parques, museu, calçadão de orla, polo ecoturístico, e no qual existe uma grande quantidade de edifícios e moradias de alto custo, com o bairro da Costa do Sol, mais popular, que embora esteja localizado na orla, não agrega os espaços de lazer litorâneo mais procurados por turistas e moradores da cidade, nem é localização de grandes edificações que agreguem valor ao bairro.

5. Conclusões

Esse trabalho procurou analisar a influência da topologia das redes de ruas em 10 bairros da cidade de João Pessoa – PB como possível conjunto de indicadores para análise de mobilidade urbana, usando para isso duas abordagens.

Primeiro, foram analisadas as 17 medidas de rede consideradas para todos os bairros, separadamente. Dessa análise, observou-se que as medidas de rede consideradas são fortemente relacionadas com a área de observação considerada, e que áreas adjuntas, mesmo com fronteiras comuns podem apresentar diferentes características nas suas redes

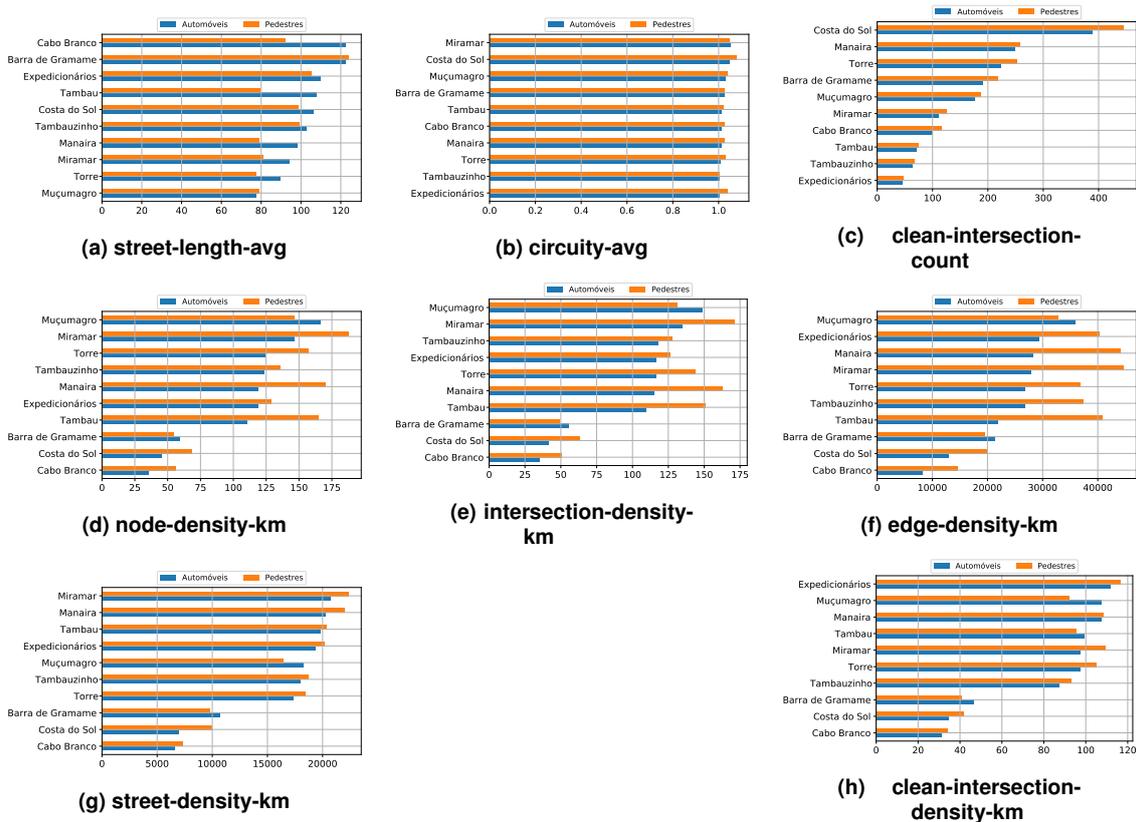


Figura 2. Comparação entre medidas da rede de ruas com relação aos automóveis e aos pedestres - parte 2

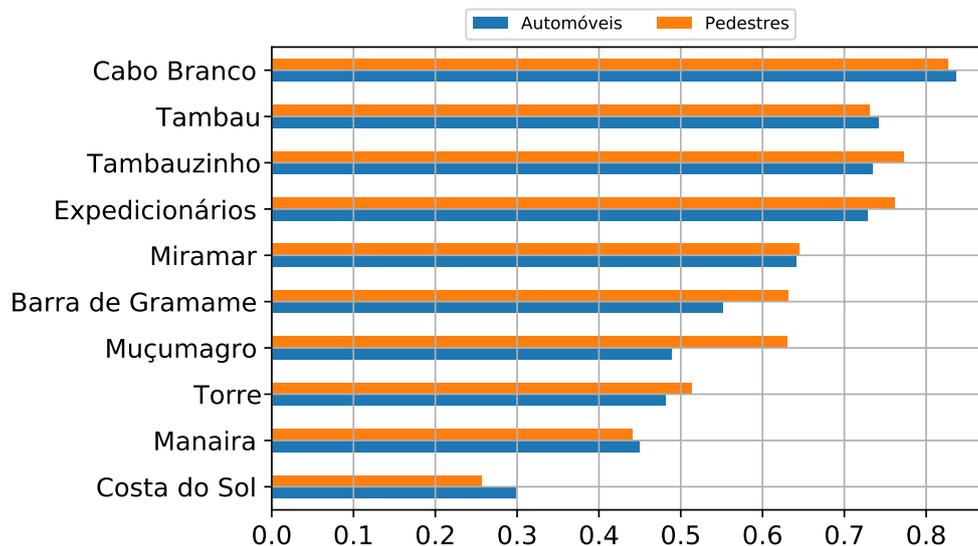


Figura 3. Ranqueamento obtido a partir dos resultados do TOPSIS.

de rua.

Ou seja, para monitoramentos e planos de ação mais eficientes é necessário que as características da rede de rua e dos indicadores de mobilidade urbana relacionados sejam mapeados na menor granularidade possível, sob risco do gestor/analista não ter

uma visão realista das medidas observadas. Essas informações podem guiar gestores à observar a necessidade de investimentos em ações mais específicas que possam alterar os valores dessas medidas de rede e que influenciem numa melhor mobilidade para os usuários da estrutura de mobilidade urbana.

Num segundo momento, considerou-se a influência conjunta de todos os indicadores a partir da análise do índice de mobilidade urbana apresentado na seção 2.

Como as medidas consideradas para a construção do índice usado no ranqueamento contemplam a topologia da rede de ruas, ligada diretamente a infraestrutura viária dessa localidades, e não outros indicadores, como os apontados em [Semob 2018], o ranqueamento mostrado na Figura 3 pode ser importante indicador de que a estrutura de mobilidade, tanto para automóveis quanto para pedestres em bairros que fazem parte da rota turística da cidade, como Cabo Branco e Tambaú, precisa ser expandida. Na prática, isso significaria a construção de novos espaços de circulação tanto de veículos quanto de transeuntes, bem como a realização de alterações de fluxo de trânsito nos espaços já existentes.

Tal observação também pode indicar que essa necessidade de estruturação pode ser realizada com roteamentos de fluxo de trânsito que acessem bairros vizinhos com melhor estrutura, como nos casos do Miramar e de Manaíra, que são bairros adjuntos aos dois casos citados anteriormente, e possuem índices muito melhores de mobilidade com base nas medidas da rede de ruas.

Referências

- Altaweel, M., Hanson, J., and Squitieri, A. (2021). The structure, centrality, and scale of urban street networks: Cases from Pre-Industrial Afro-Eurasia. *PLOS ONE*, 16(11).
- Boeing, G. (2017). Osmnx: New methods for acquiring, constructing, analyzing, and visualizing complex street networks. *Computers, Environment and Urban Systems*, 65:126–139.
- Chakraborty, S. (2022). Topsis and modified topsis: A comparative analysis. *Decision Analytics Journal*, 2:100021.
- Geng, L. and Zhang, K. (2023). Correlation of Road Network Structure and Urban Mobility Intensity: An Exploratory Study Using Geo-Tagged Tweets. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 12(1).
- OpenStreetMap contributors (2017). Planet dump retrieved from <https://planet.osm.org> . <https://www.openstreetmap.org>.
- Semob (2018). Indicadores para monitoramento e avaliação da efetividade da Política Nacional de Mobilidade Urbana (PNMU). Technical report, Secretaria Nacional de Mobilidade Urbana/Ministério das Cidades.
- Tokuda, E. K., Comin, C. H., and da F Costa, L. (2022). Impact of the topology of urban streets on mobility optimization. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2022(10):103204.
- Tsiotas, D. and Polyzos, S. (2017). The topology of urban road networks and its role to urban mobility. *Transportation Research Procedia*, 24:482–490. 3rd Conference on Sustainable Urban Mobility, 3rd CSUM 2016, 26 – 27 May 2016, Volos, Greece.