

USABILIDADE E LIMITAÇÕES DE DADOS DE MAPAS COLABORATIVOS EM ANÁLISES DE ACESSIBILIDADE

Bruna Kuramoto

André Luiz Cunha

Universidade de São Paulo

Escola de Engenharia de São Carlos

RESUMO

Este trabalho examinou a qualidade dos mapas colaborativos através da demonstração da usabilidade e limitações dos dados em análises de acessibilidade de diferentes localidades. Os dados das informações geográficas voluntárias foram confrontados com os do estudo de Lima, Silva e van der Waerden, elaborado em 2003, antes do lançamento do Projeto *OpenStreetMap*. A comparação foi feita sobre a determinação de uma medida de acessibilidade global por separação espacial para 8 cidades brasileiras e 3 estrangeiras, com o objetivo de investigar a proximidade das representantes nacionais em relação aos exemplos norte-americanos e europeu. Enquanto este trabalho utilizou as bibliotecas *OSMnx* e *Networkx*, aquele utilizou um software de Sistemas de Informações Geográficas. As redes viárias foram obtidas de modo rápido em formato de grafos computacionalmente manipuláveis. A pesquisa também avaliou as distinções entre os resultados alcançados no estudo de referência e no atual e suas explicações. Apesar das diferenças entre as ferramentas utilizadas, as maiores discrepâncias nos indicadores calculados ocorreram devido às alterações das malhas viárias que foram atualizadas no período de 15 anos entre os trabalhos.

ABSTRACT

This paper examined the quality of collaborative maps by demonstrating usability and data limitations in accessibility tests of different locations. Voluntary geographic information data were compared with the study by Lima, Silva and van der Waerden, prepared in 2003, prior to the launch of the OpenStreetMap Project. The comparison was performed on the calculations of a global accessibility metric for spatial separation for 8 Brazilian and 3 foreign cities, in order to verify the proximity of national representatives to the North American and European examples. While this work used the OSMnx and Networkx libraries, that one used Geographic Information Systems software. The road networks were obtained quickly in computationally manipulable graphs format. The research also evaluated the distinctions between the results achieved in the reference study and the current one and their explanations. Despite the differences between the tools used, the largest discrepancies in the calculated indicators were due to changes in road networks that were updated over 15 years between works.

1. INTRODUÇÃO

O sistema viário permite diversos tipos de deslocamentos em uma aglomeração, por isso ele é alvo de questões relativas à eficiência operacional e à sustentabilidade de cidades. O diagnóstico da situação pode ser feito com parâmetros que denotam a configuração da rede. Este é um tema discutido na morfologia viária urbana, estudo da forma dos sistemas viários presentes nas cidades. Uma maneira de analisar o sistema viário é através de grafos, formas de representação das relações entre diferentes elementos que possuem uma ampla teoria embasada na matemática.

No contexto urbano, as ruas podem ser representadas por arestas e as interseções por nós, em uma abordagem chamada de primal, conforme exemplo da Figura 1. Os grafos podem ser de diferentes tipos, de acordo com as relações mais importantes para cada tipo de análise. Por exemplo, no contexto urbano, a versão não direcionada do grafo representa somente a estrutura física disponível para a malha viária, enquanto a versão direcionada representa as restrições de direções dos movimentos nas ruas e é utilizada em casos de avaliação do impacto dessas limitações na eficiência do uso da rede. Outras informações podem ser inseridas nos grafos através de atributos, como geometria e sinalização.

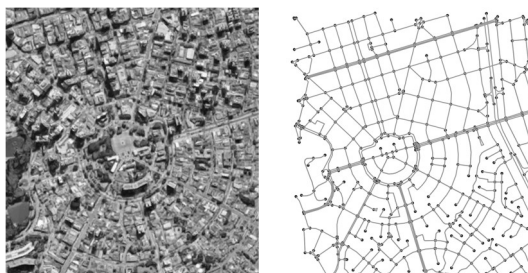


Figura 1: vista aérea de uma área urbana (esquerda) e respectiva representação em forma de grafo (direita)

A formação das malhas viárias urbanas é influenciada por diferentes fatores como contexto histórico de surgimento da cidade, modos de expansão, limites geográficos e integração com outros tipos de modos de transportes. Por isso, a obtenção de dados atualizados e georreferenciados é importante para investigar as características de cada sistema viário. Essa tem sido uma dificuldade encontrada em análises de morfologia urbana, visto que os dados de malhas viárias, foram tradicionalmente disponibilizados por entidades estatais, como prefeituras e departamentos de trânsito. Contudo, esses bancos de dados geralmente eram fornecidos em formatos digitais inadequados para edição, manipulação ou desatualizados, com inconsistências (Lima *et al.*, 2010). Essas situações dificultavam a replicação dos estudos em outros locais ou outros momentos.

No Brasil, várias entidades, públicas e privadas, realizam trabalhos topográficos e compõem o Sistema Cartográfico Nacional, como o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a Diretoria de Serviço Geográfico (DSG), a Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) e o Instituto de Cartografia Aeronáutica (ICA). O mapeamento topográfico do Brasil é representado de forma sistemática e contínua nas escalas padrões de 1:1.000.000, 1:500.000, 1:250.000, 1:100.000, 1:50.000 e 1:25.000 (Brasil, 1967). A Figura 2, de Camboim, Bravo e Sluter (2015), mostra a cobertura do mapeamento topográfico no Brasil por escalas em 2015. Na escala de 1:250.000, quase a integralidade do território está mapeada, porém, na escala 1:25.000 somente alguns locais foram elencados.

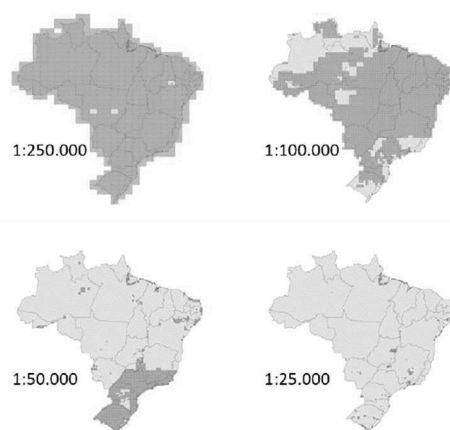


Figura 2: Cobertura do território brasileiro por escalas

Outras ações do governo mapearam elementos específicos, como por exemplo a rede georreferenciada dos modos de transporte de carga, um dos produtos do Plano Nacional de

Logística (PNL). Esse Plano foi uma resposta do governo brasileiro ao problema de dependência do país em relação ao transporte de cargas por rodovias (Chapola, 2018). O PNL tem como um dos seus objetivos a representação da realidade da infraestrutura atual e das alternativas futuras, utilizando elementos geográficos dos diferentes sistemas de transporte do país. O PNL foca na matriz de transporte de cargas, por isso não detalha as redes viárias internas das cidades, mas somente as ligações entre elas. Uma comparação entre as abrangências das redes cadastradas no *OSM* e no PNL (EPL, 2018) está na Figura 3 que traz a sobreposição das redes viárias extraídas da cidade de São Carlos no estado de São Paulo. As informações do PNL são reduzidas às rodovias, enquanto as do *OSM* abrangem rodovias, ruas, avenidas e acessos.



Figura 3: Sobreposição das redes viárias extraídas do *OpenStreetMap* (linhas brancas finas) e do PNL (linhas vermelhas grossas)

A geração dos mapas digitais ganhou um novo impulso com o desenvolvimento de novas tecnologias. Inicialmente com a adoção das mesas digitalizadoras e *scanners* e em seguida com a disseminação dos equipamentos com GPS e da internet (Goodchild, 2007), as informações de mapas estão cada vez mais disponíveis e acessíveis na web. Neste contexto, surgiram os mapas colaborativos ou informações geográficas voluntárias (*Volunteered Geographic Information – VGI*), plataformas de mapeamento realizados pelos próprios usuários, de acordo com suas experiências locais.

Alguns projetos recentes de *VGI* foram elencados por Neis e Zielstra (2014). Os precursores foram o *OpenStreetMap* (*OSM*), fundado em 2004, e o *WikiMapia*, em 2006. Em outro momento, com bases de dados parcialmente estruturadas por empresas, surgiram: *MapMaker* (Google), *HereMap Creator* (Nokia), *Map Share* (TomTom), *Waze*, dentre outros. Porém a disponibilidade do uso dos dados da maioria dessas plataformas está sob propriedade de empresas privadas, diferentemente do que ocorre nas plataformas pioneiras. No caso do *WikiMapia*, a licença de conteúdo permite a alteração e o compartilhamento dos dados, desde que os devidos créditos sejam atribuídos. O *OSM* é disponibilizado em dados abertos e é hospedado por diversas organizações, como a Universidade College London (UCL), a Universidade de Zagreb e a Universidade de Zaragoza.

Um problema unânime está relacionado à qualidade dos dados dessas fontes. O Projeto *OSM* possui membros voluntários dispostos em grupos de trabalhos responsáveis pela correção dos dados, juntamente com algoritmos automáticos de manutenção (Szwoch, 2019). Em uma avaliação das informações do *OSM* em relação à base de dados da agência nacional de

mapeamento do Reino Unido, Haklay (2010) listou os parâmetros de qualidade de informações espaciais sintetizados por Oort (2006):

- a) Histórico: perspectiva sobre a história da base de dados, como foi a coleta e a evolução.
- b) Precisão posicional: análise da relação entre a posição do objeto na base de dados e a posição real.
- c) Precisão de atributos: análise da correção das informações adicionais.
- d) Consistência lógica: consistência interna da base de dados em termos de correção topológica.
- e) Integridade: medida da ausência de dados.
- f) Precisão semântica: analisa a interpretação do objeto na base de dados de acordo com o significado no mundo real.
- g) Qualidade temporal: métrica da validade das mudanças na base de dados em relação às mudanças no mundo real.
- h) Usabilidade e limitações: aspecto qualitativo relacionado à adequação de finalidade, deve auxiliar usuários na decisão de como os dados podem ser utilizados.

O parâmetro de usabilidade e limitações envolve o potencial de uso dos dados de mapas colaborativo por diferentes usuários. Dentro do contexto de análises de morfologia urbana, uma forma de avaliar essa característica é replicar, com dados de mapas colaborativos, estudos que utilizaram dados de outras origens e comparar os resultados. Dessa forma, é possível verificar a cobertura da plataforma de informações geográficas voluntárias sobre diferentes locais e confrontar com dados existentes. A investigação sobre a usabilidade e limitações de mapas colaborativos também pode apurar a adequação dos dados para manipulação computacional e exportação para formatos utilizados em programas de análises espaciais.

O objetivo deste trabalho é avaliar o potencial de uso de dados de malha viária urbana obtidos de mapas colaborativos em estudos de acessibilidade e compacidade assim como os realizados na pesquisa de Lima, Silva e van der Waerden (2003). O estudo de referência teve como objetivo analisar características das malhas viárias urbanas brasileiras e estrangeiras e identificar a proximidade em relação a dois padrões: cidades espalhadas e dependentes do automóvel e cidades compactas e adaptadas aos sistemas de transporte público. Nesse estudo, as malhas viárias de 11 cidades foram desenhadas e analisadas em ambientes de sistemas de informações geográficas (SIG).

Além de replicar o estudo de Lima, Silva e van der Waerden (2003), este trabalho busca fornecer soluções para as dificuldades encontradas pelos autores na época. Uma limitação foi detectada em relação à baixa quantidade de cidades analisadas, dentro do propósito de identificar padrões. Outra questão foi a necessidade de desenhar manualmente as malhas viárias obtidas em ambientes de sistemas de informações geográficas.

2. MATERIAIS E MÉTODO

2.1. Plataforma de dados colaborativos

O Projeto *OpenStreetMap* é a principal plataforma usada em pesquisas acadêmicas e referência para diferentes mecanismos de criação e exploração de dados. Ademais, essa plataforma é uma fonte de livre acesso e por isso foi escolhida para o fornecimento das informações geográficas voluntárias deste trabalho. A colaboração com o Projeto *OSM* pode

ser feita por qualquer pessoa, através inserções e alterações de informações. Para isso, é exigido que os contribuidores cadastrem-se na plataforma e concordem com a distribuição das informações sob a licença do *OSM*. As contribuições disponibilizadas pelo Projeto *OSM* podem ser acessadas através do site da plataforma (www.openstreetmap.org). Para usos diversos além da simples visualização das informações, o projeto disponibiliza uma interface de programação de aplicação (*API*) (*OpenStreetMapWiki*, 2018a). Outro mecanismo de levantamento dos dados do Projeto *OSM* é o *Nominatim*, ferramenta de busca de informações através do nome de local ou endereço.

2.2. Ferramentas de análise de rede

Esta seção tem como objetivo exemplificar como construir a camada das ruas de uma malha viária urbana em forma de grafo, gerar os resultados em diferentes formatos de arquivo e avaliá-los de acordo com parâmetros distintos. As documentações das bibliotecas *OSMnx*, versão 0.8.2 e *Networkx*, versão 2.1 foram consultadas para reconhecer as bibliotecas de análise de rede. As rotinas computacionais foram escritas em linguagem de programação *Python*.

2.2.1. Biblioteca *Networkx*

O *Networkx* é um pacote de ferramentas para exploração e análise de redes e algoritmos de redes (Hagberg *et al.*, 2008). O pacote foi liberado como software de código aberto em 2005, possui núcleo escrito completamente em linguagem *Python* e foi desenvolvido no Laboratório Nacional de Los Alamos, Novo México (EUA). A instalação da biblioteca é fácil e interage com outros pacotes da linguagem *Python*, tais como *NumPy*, *SciPy* e *Matplotlib*.

2.2.2. Biblioteca *OSMnx*

O pacote *OSMnx* coleta fronteiras administrativas e redes viárias a partir da base de dados do *OpenStreetMap* e é uma ampliação das funcionalidades da biblioteca *Networkx*. A obtenção dos dados inicia com a determinação de uma área de interesse que pode ser definida de diferentes maneiras, entre elas: (1) a partir do nome da cidade e do país; (2) definição de coordenadas dos extremos de um retângulo; ou (3) as coordenadas de um ponto central.

As informações obtidas, relacionadas à morfologia da estrutura viária, foram expressas em forma de grafos através das funções da biblioteca *OSMnx*. Além da localização de nós internos da rede, também foram extraídos dados como extensão do trecho de rua e direção de movimento permitidas.

2.3. Método Proposto

A replicação do estudo de Lima, Silva e van der Waerden (2003) visou verificar a acessibilidade e a compacidade das mesmas 11 cidades, com o uso de dados do Projeto *OpenStreetMap* e de bibliotecas de análises de rede (*OSMnx* e *Networkx*). A primeira etapa foi a obtenção das malhas viárias urbanas, a partir da informação disponível na plataforma do *OSM*. As redes foram geradas em forma de grafos, com arestas como representantes das ruas e nós nos locais de interseções entre as ruas.

Os grafos foram obtidos com a função *graph_from_place* da biblioteca *OSMnx*. Os parâmetros de entrada alterados nesta função foram *query*, que recebeu os nomes das cidades, e *network_type*, que recebeu o valor *drive* - filtra somente as vias públicas dirigíveis. A saída desta função é o grafo do tipo direcionados. A Tabela 1 traz a descrição de cada parâmetro de

entrada da função *graph_from_place*.

Tabela 1: Parâmetros de entrada da função *graph_from_place*

Parâmetro	Valor <i>default</i>	Descrição
<i>query</i>		O lugar para codificação
<i>network_type</i>	"allprivate"	Tipo de rede viária que comporá o grafo
<i>simplify</i>	<i>True</i>	Se assume valor <i>True</i> , simplifica a topologia do grafo
<i>retain_all</i>	<i>False</i>	Se assume valor <i>True</i> retorna todo grafo interno à área, mesmo que desconexo.
<i>truncate_by_edge</i>	<i>False</i>	Se assume valor <i>True</i> , nós que estão fora da área delimitada, mas possuem vizinhos que estão dentro são retidos no grafo
<i>name</i>	"unnamed"	Nome do grafo
<i>which_result</i>	1	número máximo de resultados a serem retornados e quais processar após o recebimento dos dados
<i>buffer_dist</i>	<i>None</i>	distância em metros para aumentar a área abrangida em torno da geometria requisitada
<i>timeout</i>	180	Intervalo de tempo limite para obter resposta da API
<i>memory</i>	<i>None</i>	Tamanho em bytes da alocação de memória do servidor. Se nenhum valor é determinado, o servidor utilizará o tamanho padrão
<i>max_query_area_size</i>	2500000000	Tamanho máximo da área delimitado em metros quadrados. Se o grafo possuir área maior que este limite, será dividido em várias consultas para a API
<i>clean_periphery</i>	<i>True</i>	Se assume valor <i>True</i> e o parâmetro <i>simplify</i> também está ativado, utiliza uma margem de 0,5 km para extrair um grafo maior que o requerido, que em seguida é simplificado e truncado para o tamanho delimitado
<i>infrastructure</i>	'way["highway"]'	Tipo de infra-estrutura. O padrão é rodovia (<i>highway</i>)
<i>custom-filter</i>	<i>None</i>	Filtro de rede personalizado a ser usado em vez das predefinições do tipo determinado em <i>network_type</i> .

Através da função *to_undirected* da biblioteca *Networkx*, os grafos obtidos foram convertidos para as versões não-direcionadas. Em seguida, foi construída uma matriz com os comprimentos dos caminhos mínimos entre todos os nós da rede, com o uso do algoritmo de *Dijkstra*. A biblioteca *Networkx* possui a função *all_pairs_dijkstra_path_length* que aplica o algoritmo de modo iterativo para todos os pares de nós. A Tabela 2 traz a descrição de cada parâmetro de entrada da função *all_pairs_dijkstra_path_length*.

Tabela 2: Parâmetros de entrada da função *all_pairs_dijkstra_path_length*

Parâmetro	Tipo de dado	Descrição
<i>G</i>	Grafo do <i>Networkx</i>	Objeto de análise
<i>cutoff</i>	inteiro ou decima	Limite máximo de caminho mínimo a ser computado
<i>weight</i>	<i>String</i>	Nome do atributo que será considerado como peso nas arestas. Se assume valor <i>length</i> , computa os caminhos mínimos com os valores dos comprimentos das arestas

A matriz foi gerada de forma que a primeira coluna e a primeira linha receberam os nós do grafo. Os valores dos caminhos mínimos entre cada par de nó, medidos em metros, preencheram a matriz. A Tabela 3 traz uma parte da matriz de caminhos mínimos gerada para a cidade de São Carlos-SP.

Tabela 3: Parte da matriz de caminhos mínimos de São Carlos-SP

7191 nós

Nós	997687296	1015709698	...	539721724	1015709695
997687296	0,000	6.732,988	...	5.527,118	6.219,194
1015709698	6.732,988	0,000	...	6.544,137	795,337
...
539721724	5.527,118	6.544,137	...	0,000	5.845,473
1015709695	62.19,194	795,337	...	5.845,473	0,000

A acessibilidade real (E_{real}) foi calculada pelo Índice de Allen (Allen *et al.*, 1993), em que o custo do deslocamento entre dois pontos foi adotado como o caminho mínimo entre eles, segundo a equação (1).

$$E_{real} = \frac{1}{v} \sum_i \frac{1}{v-1} \sum_j c_{ij} \quad (1)$$

Sendo:

c_{ij} : custo do deslocamento entre os nós i e j .

v : quantidade de nós da malha viária

A compacidade foi obtida através da relação $(E_{real}-E_{circ}) / E_{real}$. Para a determinação da acessibilidade ideal (E_{circ}), Lima, Silva e van der Waerden (2003) adotaram o padrão ideal de cidade circular, com quadras de 100 por 100 metros. Desta forma, o valor de E_{circ} ficou definido como abaixo:

$$E_{circ} = 0,0651 * I^{0.4995} \quad (2)$$

Sendo:

E_{circ} : índice de acessibilidade global de uma cidade circular;

I : quantidade de interseções.

Os autores consideraram que o padrão ideal em termos de compacidade é o circular, desta forma, quanto mais próximo o E_{real} do E_{circ} , melhor a configuração da cidade. Com base nisso, eles avaliaram as diferenças entre os valores reais e os ideais para cada cidade. Ao final, foi verificada a proximidade dos índices brasileiros com os das cidades estrangeiras.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As características dos grafos das redes viárias das cidades selecionadas estão na Tabela 4. As quantidades de arestas e de nós são relativas ao grafo não direcionado e o comprimento médio das arestas é dado em metros (C).

Tabela 4: Características dos grafos de malhas viárias urbanas

Local	Arestas	Nós	C [m]
Araraquara-SP (Brasil)	13.063	8.118	127,47
Bauru-SP (Brasil)	17.585	10.683	105,38
Columbus-GA (EUA)	12.699	9.206	195,36
Eindhoven-BN (Holanda)	10.284	7.109	99,33
Limeira-SP (Brasil)	12.235	8.018	123,60
Madison-WI (EUA)	11.700	7.940	131,63
Marília-SP (Brasil)	12.067	7.744	140,36
Maringá-PR (Brasil)	16.249	9.930	127,53
Piracicaba-SP (Brasil)	17.035	11.580	131,63
Presidente Prudente-SP (Brasil)	13.899	8.706	107,91
São Carlos-SP (Brasil)	11.260	7.191	133,57

3.1. Acessibilidade global

A quantidade de nós, assim como os valores de E_{real} estão na Tabela 5 junto com o resumo dos valores do trabalho de Lima, Silva e van der Waerden (2003).

Tabela 5: Resultados de acessibilidade real

Cidades	Lima, Silva e van der Waerden (2003)		Estudo proposto (2018)	
	Nós	E_{real} (km)	Nós	E_{real} (km)
Araraquara-SP (Brasil)	4.893	5,66	8.118	6,91
Bauru-SP (Brasil)	10.518	7,49	10.683	6,72
Columbus-GA (EUA)	8.498	9,69	9.206	11,68
Eindhoven-BN (Holanda)	5.814	4,98	7.109	5,29
Limeira-SP (Brasil)	4.872	4,97	8.018	6,91
Madison-WI (EUA)	7.228	10,37	7.940	11,92
Marília-SP (Brasil)	5.301	6,32	7.744	8,57
Maringá-PR (Brasil)	7.268	6,70	9.930	7,73
Piracicaba-SP (Brasil)	6.372	7,11	11.580	9,67
Presidente Prudente-SP (Brasil)	5.323	6,01	8.706	7,37
São Carlos-SP (Brasil)	4.957	5,23	7.191	7,93

O índice E_{real} é uma medida de separação média entre os nós de uma malha; quanto maior a distância entre as interseções, maior o seu valor. Em 9 das 11 cidades avaliadas, foi detectado uma ampliação média de 47% da quantidade de nós entre 2003 e 2018, relacionado a um aumento médio de 29% do E_{real} , possivelmente atribuído ao crescimento das aglomerações. Piracicaba mostrou o maior acréscimo na quantidade de nós, de 82%, com E_{real} avançando de 7,11 km para 9,67 km. Este comportamento, de aumento simultâneo de E_{real} e quantidade de nós, não foi detectado nas mesmas proporções em Bauru e em Eindhoven.

Na cidade de Bauru foi detectada uma alteração de somente 2% na quantidade de nós entre 2003 e 2018, e o índice E_{real} diminuiu 10% entre os períodos analisados. Uma causa desse fato pode ser a diminuição dos comprimentos dos caminhos mínimos, ocasionada pela

alteração da topologia da rede, através da criação de conexões entre os nós devido a abertura de vias. Neste sentido, a Tabela 4 mostra que a rede viária de Bauru foi a que apresentou o segundo menor comprimento médio de aresta, indicação de uma rede mais conexa e compacta.

No outro caso, em Eindhoven, houve uma ampliação de 22% do tamanho da rede enquanto o índice E_{real} cresceu somente 6%. Isto pode indicar que os nós adicionados a malha viária a expandiram, porém de forma mais compacta do que o constatado nos outros exemplos. Esta verificação também pode ser feita através Tabela 4 em que a cidade de Eindhoven apresenta o menor comprimento médio de aresta, de 99,33 metros, que pode ser atribuído a maior densidade urbana na cidade europeia, em relação aos outros casos avaliados.

3.2. Acessibilidade global ideal

O estudo de Lima, Silva e van der Waerden (2003) também buscou avaliar a diferença entre as redes viárias das cidades analisadas e o padrão de rede circular idealizado pelos autores. Os resultados das variações dos índices ideais (E_{circ}) foram comparados em relação aos índices reais (E_{real}), o que gerou valores indicadores do grau de compacidade. Os autores então montaram um panorama internacional. A Tabela 6 e a Tabela 7 mostram os resultados do estudo de 2003 e os deste trabalho, respectivamente, em ordem crescente de grau de compacidade.

Tabela 6: Valores de E_{real} e E_{circ} e variações percentuais em relação a E_{real} (resultados de 2003)

Cidade-Estado (País)	Nós	E_{real}	E_{circ}	Variação de E_{circ} %
Eindhoven-BN (Holanda)	5.814	4,98	4,94	0,8%
Limeira-SP (Brasil)	4.872	4,97	4,52	9,1%
Bauru-SP (Brasil)	10.518	7,49	6,65	11,2%
São Carlos-SP (Brasil)	4.957	5,23	4,56	12,8%
Maringá-PR (Brasil)	7.268	6,7	5,53	17,5%
Araraquara-SP (Brasil)	4.893	5,66	4,53	20,0%
Presidente Prudente-SP (Brasil)	5.323	6,01	4,73	21,3%
Marília-SP (Brasil)	5.301	6,32	4,72	25,3%
Piracicaba-SP (Brasil)	6.372	7,11	5,17	27,3%
Columbus-GA (EUA)	8.498	9,69	5,97	38,4%
Madison-WI (EUA)	7.228	10,37	5,51	46,9%

Tabela 7: Valores de E_{real} e E_{circ} e variações percentuais em relação a E_{real} (resultados atuais)

Cidade-Estado (País)	Nós	E_{real}	E_{circ}	Variação de E_{circ} %
Eindhoven-BN (Holanda)	7.109	5,29	5,46	-3,3%
Bauru-SP (Brasil)	10.683	6,72	6,70	0,3%
Araraquara-SP (Brasil)	8.118	6,91	5,84	15,6%
Limeira-SP (Brasil)	8.018	6,91	5,80	16,0%
Maringá-PR (Brasil)	9.930	7,73	6,46	16,5%
Presidente Prudente-SP (Brasil)	8.706	7,37	6,05	17,9%
Piracicaba-SP (Brasil)	11.580	9,67	6,97	27,9%
São Carlos-SP (Brasil)	7.191	7,93	5,50	30,7%
Marília-SP (Brasil)	7.744	8,57	5,70	33,5%
Columbus-GA (EUA)	9.206	11,68	6,22	46,8%
Madison-WI (EUA)	7.940	11,92	5,77	51,5%

O valor negativo do grau de compacidade calculado para a rede atual de Eindhoven mostra a necessidade de revisão do padrão ideal proposto por Lima, Silva e van der Waerden (2003). Ainda assim, o resultado mostrou coerência com o argumento defendido pelos autores de que a cidade europeia é a mais compacta. A Figura 4 mostra os valores de variação percentual de E_{circ} em relação ao E_{real} em cada cidade, para os dois períodos comparados. Uma observação está na quase manutenção dos graus de compacidade nas cidades de Maringá e Piracicaba. Isto pode indicar que as expansões destas redes ocorreram sem torná-las mais compactas.

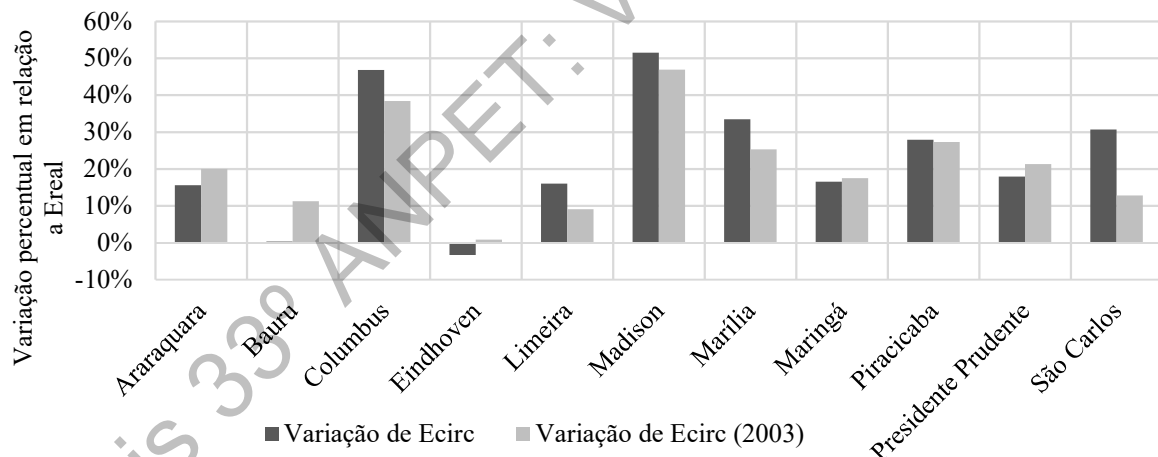


Figura 4: Comparação das variações percentuais dos índices E_{circ} em relação aos E_{real} , entre os dois períodos

As cidades de Araraquara, Bauru, Eindhoven, e Presidente Prudente apresentaram diminuição da variação percentual de E_{circ} , o que indica que as novas ligações aproximaram as redes do padrão circular. As cidades de Columbus, Limeira, Madison, Marília e São Carlos apresentaram as maiores variações positivas de E_{circ} , o que sugere que estas redes foram desenvolvidas em direção oposto ao modelo adotado como ideal. Eindhoven continuou ocupando a posição de cidade mais próxima do ideal, seguida por Bauru. As cidades mais divergentes do modelo circular continuam sendo as americanas, descritas pelos autores como espalhadas e altamente dependentes de automóveis.

3.3. Panorama internacional

O trabalho de Lima, Silva e van der Waerden (2003) teve como objetivo identificar de qual padrão viário as cidades brasileiras mais se aproximavam, em termos de compacidade. Os valores de variação percentual de E_{circ} das cidades americanas foram utilizados como extremos superiores e os da cidade holandesa como extremo inferior, em uma escala normalizada. Valores de compacidade acima de 0,5 indicou uma proximidade do padrão americano, abaixo, mostrou inclinação ao padrão holandês/europeu. A Figura 5 mostra a classificação das cidades brasileiras com Eindhoven e Madison como padrões europeu e americano, respectivamente. A cidade de São Carlos, que, no estudo de 2003, estava mais próxima do padrão europeu, passou a figurar no grupo do padrão americano. As outras cidades continuaram nos mesmos agrupamentos.

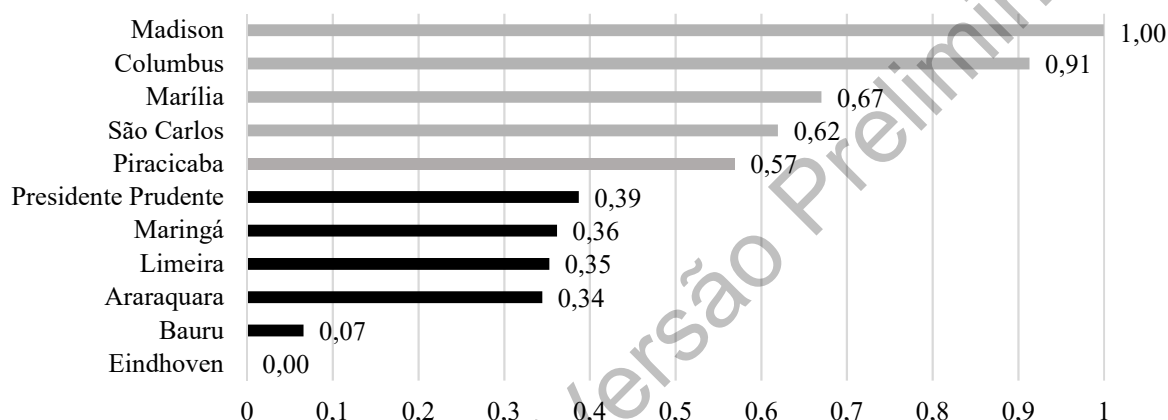


Figura 5: Valores normalizados de compacidade por Eindhoven e Madison

A Figura 6 mostra a classificação com Eindhoven e Columbus como extremos. Esta classificação considerou o fato de Madison ter em seu território grandes lagos, o que interfere na seleção dela como boa referência de padrão americano. Esta segunda categorização mostrou um comportamento distinto do constatado no estudo de 2003. Presidente Prudente e Araraquara mudaram de grupo e apresentaram valores de compacidade mais próximos do de Eindhoven, enquanto São Carlos passou a se aproximar mais do padrão de Columbus.

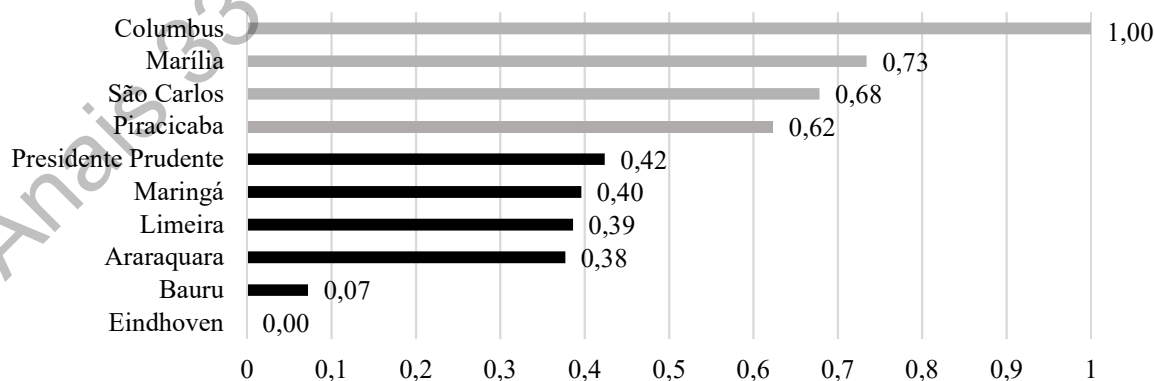


Figura 6: Valores normalizados de compacidade por Eindhoven e Columbus

As discordâncias entre os panoramas de cada pesquisa não sugerem erro no método deste trabalho, mas somente uma revisão do cenário de cada cidade. Com as ferramentas apresentadas, outras cidades podem ser incluídas no panorama com intuito de formar o perfil

de cada região.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A reprodução das análises do estudo de referência verificou a acessibilidade e a compacidade das cidades avaliadas no estudo de Lima, Silva e van der Waerden (2003), realizado em ambiente de SIG, porém, com o uso de dados da plataforma *OpenStreetMap* e de ferramentas computacionais de análises de rede (*OSMnx* e *Networkx*). As maiores alterações nos indicadores calculados ocorreram devido às atualizações das malhas viárias que foram modificadas no intervalo de 15 anos entre os trabalhos. A replicação do estudo em outro intervalo possibilita o acompanhamento do crescimento das cidades. Com as técnicas abordadas neste trabalho, é possível expandir o banco de dados com outras cidades para ampliar o alcance das comparações entre diferentes sistemas viários. Também podem ser analisadas a acessibilidade e a compacidade de outros padrões viários além do adotado como ideal, para estabelecer o mais adequado para cada situação.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pelo suporte financeiro sob a forma de bolsa de mestrado.

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

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, W.B., Liu, D. & Singer, S. (1993). *Accessibility measures of U.S. metropolitan areas*. Transportation Research Part B: Methodological 27, 439–449.
- Boeing, G. (2017). *OSMnx: New methods for acquiring, constructing, analyzing, and visualizing complex street networks*. Computers, Environment and Urban Systems Elsevier Ltd 65, 126–139.
- Brasil. (1967). *Decreto-lei nº 243, de 28 de fevereiro de 1967. Fixa as Diretrizes e Bases da Cartografia Brasileira e dá outras providências*. Diário Oficial da União.
- Camboim, S.; Bravo, J.; Sluter, C. *An Investigation into the Completeness of, and the Updates to, OpenStreetMap Data in a Heterogeneous Area in Brazil*. ISPRS International Journal of Geo-Information, v. 4, n. 3, p. 1366–1388, 2015.
- Chapola, R. (2018). *O que é o plano nacional de logística. E do que precisa para funcionar*. Nexo Jornal, julho. <https://www.nexojornal.com.br/expresso/2018/07/07/O-que-é-o-plano-nacional-de-logística.-E-do-que-precisa-para-funcionar>.
- EPL, Empresa de Planejamento e Logística S.A (2018). *Rede Georreferenciada*. <https://www.epl.gov.br/rede-georeferenciada>.
- Goodchild, M.F. (2007). *Editorial: Citizens as Voluntary Sensors: Spatial Data Infrastructure in the World of Web 2.0*. International Journal of Spatial Data Infrastructures Research 2, 24–32.
- Hagberg, A.A., Schult, D.A. & Swart, P.J. (2008). *Exploring network structure, dynamics, and function using NetworkX*. Anais do Proceedings of the 7th Python in Science Conference. Pasadena, CA USA.
- Haklay, M. (2010). *How good is volunteered geographical information? A comparative study of OpenStreetMap and Ordnance Survey datasets*. Environment and Planning B: Planning and Design 37, 682–703.
- Lima, R. da S., Borher, L.A., Silveira, A.C. & Lima, J.P. (2010). *Mapeamento Colaborativo: uma alternativa para obtenção de mapas digitais para aplicações em transportes*. ENGEVISTA 12, 10–21.
- Lima, R. da S., Silva, A.N.R. da. & van der Waerden, P. (2003). *Espalhamento urbano: mito ou realidade no Brasil? O caso das cidades médias*. Revista dos Transportes Públicos 98, 31–46.
- Neis, P. & Zielstra, D. (2014). *Recent Developments and Future Trends in Volunteered Geographic Information Research: The Case of OpenStreetMap*. Future Internet 6, 76–106.
- Oort, P. van. (2006). *Spatial Data quality: from description to application*. Tese de Doutorado. Wageningen University Rotterdam: Optima.
- OpenStreetMap Wiki. (2018). *API OSM v0.6*. https://wiki.openstreetmap.org/wiki/API_v0.6.
- Szwoch, G. (2019). *Combining Road Network Data from OpenStreetMap with an Authoritative Database*. Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems 145,.