



Avaliação da Infraestrutura Cicloviária e Interpolação Espacial de seus Indicadores de Qualidade: uma Abordagem Baseada em Análise Hierárquica e Geoestatística

Evaluating the Cycling Infrastructure and Spatial Interpolation of Quality Indicators: an Approach Based on the Analytic Hierarchy Process and Geostatistics

Wellington de Aquino Traldi¹, Samuel de França Marques², Cira Souza Pitombo³, Pablo Brilhante de Sousa⁴ e Ricardo Almeida de Melo⁵

1 Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes, São Carlos, Brasil. E-mail. tralদিwellington@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2471-5732>

2 Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes, São Carlos, Brasil. E-mail. samuelfranca@usp.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5602-3277>

3 Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes, São Carlos, Brasil. E-mail. cirapitombo@usp.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9864-3175>

4 Universidade Federal da Paraíba, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, João Pessoa, Brasil. E-mail. pablo@ct.ufpb.br
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2526-3312>

5 Universidade Federal da Paraíba, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, João Pessoa, Brasil. E-mail. ricardo@ct.ufpb.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8993-5264>

Recebido: 06.2022 | Aceito: 08.2022

Resumo: O presente artigo tem dois objetivos associados: (1) avaliar a qualidade da infraestrutura cicloviária no município de João Pessoa (PB) através de Processo de Análise Hierárquica e (2) realizar uma extensão da avaliação proposta, através de indicadores de qualidade, para toda a rede cicloviária do município, por meio de interpoladores espaciais geoestatísticos. Assim, é proposta uma abordagem de duas etapas. Inicialmente, foram identificados fatores físicos e operacionais que afetam a qualidade da infraestrutura cicloviária para a elaboração da hierarquia. Posteriormente, foi aplicado um formulário a cinco especialistas em infraestrutura cicloviária e usuários de ciclovias/ciclofaixas, com o objetivo de ponderar os critérios. Após a ponderação dos critérios, que compõem a estrutura hierárquica proposta, foram utilizados dados de 27 trechos cicloviários, coletados em campo. Após a pontuação associada a cada trecho, estes foram classificados e mapas temáticos foram construídos para a localização dos trechos críticos. Observando-se a existência de dependência espacial, em relação ao indicador de qualidade cicloviária, foi possível realizar uma modelagem geoestatística e estimar o indicador de qualidade para 32 trechos não inspecionados previamente em campo. Dessa forma, o mapa da rede cicloviária completa, devidamente avaliada, pode ser utilizado como ferramenta de baixo custo de apoio à tomada de decisão e implementações de políticas de transporte.

Palavras-chave: Mobilidade urbana. Análise Multicritério. Modos ativos. Krigagem Ordinária. Infraestrutura urbana e cicloviária.

Abstract: The main aims of this article are: (1) to evaluate the quality of cycling infrastructures in the city of João Pessoa (PB) using the Analytic Hierarchy Process (AHP) and (2) to extend the proposed assessment (using quality indicators) to the entire cycling network of the municipality applying geostatistical spatial interpolators. Therefore, a two-step approach was proposed. Initially, the physical and operational factors that affect the quality of cycling infrastructures were identified to formulate the hierarchy. Afterwards, five specialists in cycling infrastructures and cycle path users were asked to fill in a form, aiming to weight the criteria. Next, we used a database collected in the field from 27 sections of cycle paths. After obtaining the scores for each section, they were classified, and maps were created to locate the critical sections. Having verified if there was spatial dependence, related to the cycling quality indicator, geostatistical modeling was carried out and the quality indicator was estimated for 32 cycle path sections, not previously collected in field. Therefore, the complete cycle network map, which was properly evaluated, can be used as a low-cost tool to support decision-making and implementation of transport policies.

Keywords: Urban mobility. Multi Criteria Analysis. Active travel modes. Ordinary Kriging. Urban and Cycling infrastructure.

1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos últimos anos, houve um aumento importante do interesse e relevância de temas associados ao uso de modos ativos, infraestrutura cicloviária e mobilidade sustentável (DIXON, 1996; MONTEIRO; CAMPOS, 2011; SILVEIRA; MAIA, 2015; CAMPOS; CARDOSO, 2016). A Lei da Mobilidade Urbana, Lei 12.587 de 2012 (BRASIL, 2012), instituiu as diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana objetivando a integração entre os diferentes modos de transporte e a melhoria da acessibilidade e mobilidade das pessoas e cargas no território do município. Ainda, o artigo 5º desta Lei estabelece a equidade no uso do espaço público de circulação, vias e logradouros; e eficiência, eficácia e efetividade na circulação urbana. Dessa forma, mais recentemente, é possível observar o aumento de investimentos em modos de transportes não motorizados nas cidades brasileiras, acarretando incremento no número de ciclovias e ciclofaixas.

Recentemente, um fator pontual de extrema relevância tem afetado a forma de se deslocar das pessoas: a pandemia de COVID-19, maior crise sanitária ocorrida nas últimas décadas (COSTA; PITOMBO; SOUZA, 2022; RODRIGUES DA SILVA et al., 2022). Em um levantamento feito com 2,2 mil respondentes em todas as regiões do país pela *NZN Intelligence*, em parceria com o *Estadão Summit Mobilidade Urbana*, 45,3% das pessoas alteraram sua forma de deslocar, sendo que 10,6% passaram a utilizar bicicletas em seus deslocamentos. Os dados ainda mostram que 83,5% das pessoas afirmam não se sentir seguras no transporte público durante a pandemia. A mudança de hábito é refletida na produção de bicicletas, já que a Associação Brasileira dos Fabricantes de Motocicletas, Ciclomotores, Motonetas, Bicicletas e Similares (Abraciclo) projetou alta de 12,8% na produção de 2021. E o setor também contou com redução do imposto de importação (ANTP, 2021).

Associado ao crescimento da infraestrutura cicloviária, o uso de bicicletas tem crescido nas cidades brasileiras. A utilização de modos de transporte ativos tem aumentado no país, aumentando a demanda do setor e trazendo reflexões sobre o planejamento urbano (ANTP, 2021). Em 2020, segundo a Associação Nacional de Transporte Públicos, a venda de bicicletas teve alta de 50% nas vendas de maio para junho (ANTP, 2020). Desta forma, a bicicleta tem sido vista como um modo de transporte alternativo para deslocamentos, principalmente em grandes centros urbanos onde o tráfego de veículos automotores é maior, economizando tempo e propiciando hábitos de vida mais saudáveis.

Todos esses fatores têm contribuído para o aumento da demanda por infraestruturas cicloviárias no Brasil. Porém, é importante identificar os diferentes aspectos que podem influenciar a qualidade da infraestrutura cicloviária para planejar seu uso com eficácia e melhoria da mobilidade global (BATISTA; LIMA, 2020). Portanto, o aumento na demanda descrito deve ser acompanhado de ferramentas que avaliem as infraestruturas implementadas quanto à sua qualidade física e operacional, com o objetivo de promover melhorias às infraestruturas pelo poder público.

Implementação de ciclovias e ciclofaixas existentes, ou mesmo expansão de rede cicloviária, requer coleta de dados para diversos fins, tais como: (1) analisar a demanda potencial de usuários, considerando uma série de fatores, o que inclui a presença de infraestrutura (PROVIDELO; SANCHES, 2010; MALDONADO-HINAREJOS; SIVAKUMAR; POLAK, 2014; DE SOUSA; KAWAMOTO, 2015); (2) identificar indicadores relativos ao sistema cicloviário urbano que caracterizem a qualidade das vias urbanas (MEDEIROS et al., 2019; FONSECA et al., 2018); e (3) mensurar tais indicadores em campo, com o objetivo de detectar trechos críticos e localizações com potencial para melhorias.

No entanto, mensurar em campo determinados indicadores, com a finalidade de avaliar a qualidade da infraestrutura cicloviária, e detectar trechos críticos segundo diversos critérios, pode ser uma tarefa onerosa a depender da extensão da rede cicloviária avaliada. Neste sentido, técnicas de interpolação espacial podem ser auxiliares no processo de avaliação cicloviária, uma vez que é possível se estender a análise para a rede completa, considerando um conjunto significativo de trechos amostrados e a dependência espacial existente.

A Geoestatística consiste em um conjunto de interpoladores espaciais que utiliza a informação coletada em pontos amostrados no espaço para a estimativa de variáveis de interesse em pontos não amostrados. Inspirado pelo trabalho pioneiro de Krige (1951), o formalismo estatístico desse ferramental foi introduzido por Matheron (1963, 1971) a partir da Teoria das Variáveis Regionalizadas (VRs). As VRs se referem a dados

que podem ser obtidos em qualquer coordenada geográfica do campo espacial em que elas atuam e que apresentam dependência espacial, ou seja, pontos próximos entre si estão mais relacionados do que pontos distantes (TOBLER, 1970).

Ao contrário de interpoladores clássicos, como ponderação pelo inverso da distância e vizinho mais próximo (que se caracterizam como determinísticos), a Geoestatística assume que a variável de interesse é resultado de um processo aleatório. Dessa forma, os interpoladores geoestatísticos são capazes de gerar medidas de incerteza para as estimativas calculadas em um ponto não amostrado (por exemplo, variância e intervalos de confiança). Além disso, eles garantem que as estimativas obtidas sejam enviesadas e possuam variância mínima. Outra diferença importante entre a Geoestatística e interpoladores clássicos se refere à adoção, pela Geoestatística, de modelos espaciais bem definidos para representar a correlação espacial entre os pontos do banco de dados. Entre outras vantagens, esses modelos permitem a identificação da distância máxima dentro da qual há correlação espacial e apenas os pontos situados ao longo dessa região são usados para a estimativa espacial em um ponto não amostrado (WEBSTER; OLIVER, 2007). Nesse âmbito, o cálculo do indicador de qualidade em trechos ciclovários não amostrados será fortemente influenciado pelos valores dos trechos vizinhos, normalmente pertencentes à mesma ciclovia/ciclofaixa, ao passo que segmentos distantes terão pouca ou nenhuma influência.

Entretanto, mesmo que a Geoestatística tenha sido criada inicialmente para modelar variáveis espacialmente contínuas, o problema de escassez de dados referentes a variáveis que não podem assumir um valor em qualquer ponto no espaço fez com que aplicações dos interpoladores geoestatísticos a variáveis espacialmente discretas, mas que possuíssem dependência espacial, começassem a ser popularizadas. Exemplos dessas aplicações podem ser encontrados em diversas áreas de estudo com variáveis espacialmente discretas: epidemiologia, aquicultura, agricultura, ciências florestais (CARVALHO et al., 2015; GOOVAERTS, 2009; KERRY et al., 2016; STELZENMÜLLER; EHRICH; ZAUKE, 2005) e, consistentemente, na engenharia de transportes. Nesse âmbito, estudos vêm sendo desenvolvidos tanto na área de segurança viária (GOMES et al., 2018; MAJUMDAR; NOLAND; OCHIENG, 2004) quanto de modelagem de variáveis de demanda por transportes (CHICA-OLMO; RODRÍGUEZ-LÓPEZ; CHILLÓN, 2018; LINDNER et al., 2016; LINDNER; PITOMBO, 2019; MARQUES; PITOMBO, 2021a, 2021b; PITOMBO et al., 2015; SELBY; KOCKELMAN, 2013; YANG et al., 2018; ZHANG; WANG, 2014). Ao longo desses trabalhos, os autores evidenciaram, por meio do gráfico da função semivariograma, a existência de uma consistente estrutura espacial nas variáveis sob análise, corroborada pelos resultados por eles obtidos.

Desta forma, o presente artigo tem dois objetivos e contribuições associadas. O primeiro objetivo deste trabalho é avaliar a qualidade da infraestrutura ciclovária no município de João Pessoa (PB) através da técnica de Análise Multicritério. A partir da avaliação obtida em um conjunto de trechos amostrados, propõe-se a expansão do indicador de qualidade de infraestrutura ciclovária para toda a rede ciclovária do município através do uso de modelagem geoestatística. Assim, este trabalho apresenta um método de duas etapas, abordando Análise Hierárquica e Geoestatística.

Como contribuições principais, podem ser citadas: (1) Proposta de hierarquia e ponderações para avaliação da infraestrutura ciclovária em qualquer outra cidade de interesse; (2) Uso da Geoestatística a fim de expandir avaliações urbanas, como qualidade de calçadas, trechos viários, etc. para toda a rede considerada.

A qualidade da infraestrutura ciclovária (variável de interesse do presente trabalho) não é um fenômeno contínuo, mas ainda apresenta o importante problema da coleta de dados que motivou o desenvolvimento da Geoestatística. Uma importante diferença, nesse caso, é que os autores não buscam uma superfície contínua de valores estimados, que se refere ao objetivo final da abordagem tradicional com variáveis espacialmente contínuas. No âmbito de variáveis espacialmente discretas, os algoritmos dos interpoladores são utilizados para calcular estimativas apenas ao longo dos objetos onde a variável é passível de ocorrer, que, no caso do presente estudo, se trata da rede ciclovária de João Pessoa (PB).

Este artigo é formado por 3 seções, além desta introdução. A Seção 2 descreve os materiais utilizados (dados, ferramentas como AHP e Geoestatística, e pacotes computacionais) bem como a sequência metodológica seguida. A Seção 3 traz os resultados relativos à Análise Multicritério e da interpolação espacial. Finalmente, a Seção 4 aborda as principais conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 MATERIAIS E MÉTODO

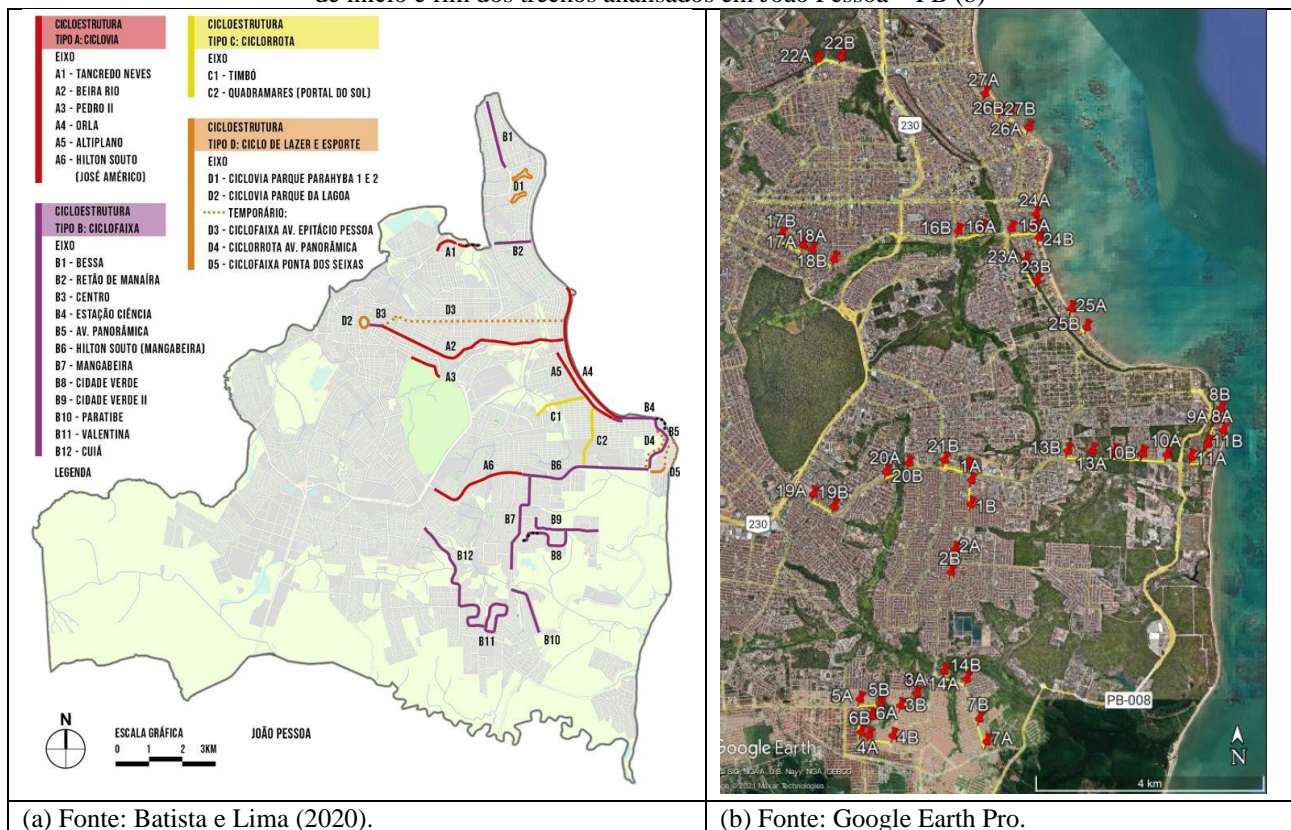
2.1 Dados e aplicativos utilizados

A pesquisa foi realizada na cidade de João Pessoa, entre os meses de agosto e dezembro de 2019. João Pessoa é um município nordestino localizado no estado da Paraíba. Sua região metropolitana é formada por 12 municípios. Ocupando uma área territorial de aproximadamente 2.800 km², a população estimada da região metropolitana para o ano de 2020 é de 1.290.223 habitantes, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Segundo o Plano Diretor de Mobilidade Urbana da Microrregião de João Pessoa de 2020, atualmente o sistema cicloviário da cidade de João Pessoa possui aproximadamente 71,5 km de extensão, cerca de 75% a mais do que os 40,7 km que possuía no ano de 2017. A Figura 1a apresenta um mapa com a localização e classificação da infraestrutura cicloviária existente em João Pessoa.

Na coleta de dados, foram selecionados 27 trechos de infraestruturas cicloviárias (ciclovias e ciclofaixas) englobando todas as regiões, e possibilitando a avaliação de aspectos geométricos, de manutenção, acessibilidade, segurança de tráfego e ambientais (Figura 1b). A extensão de cada um dos trechos foi de 420,00 m, totalizando 11,34 km avaliados de uma rede cicloviária existente de 71,5 km. Os trechos foram divididos em 14 seções de 30,00 metros, em que eram sorteadas 05 (cinco) seções para que 03 (três) Pesquisadores, previamente treinados, pudessem fornecer notas para os critérios detalhados a seguir: declividade, segurança de tráfego, largura efetiva, pavimento, sinalização, drenagem, conforto, segurança pública, acessibilidade, sinuosidade, iluminação, arborização e limpeza.

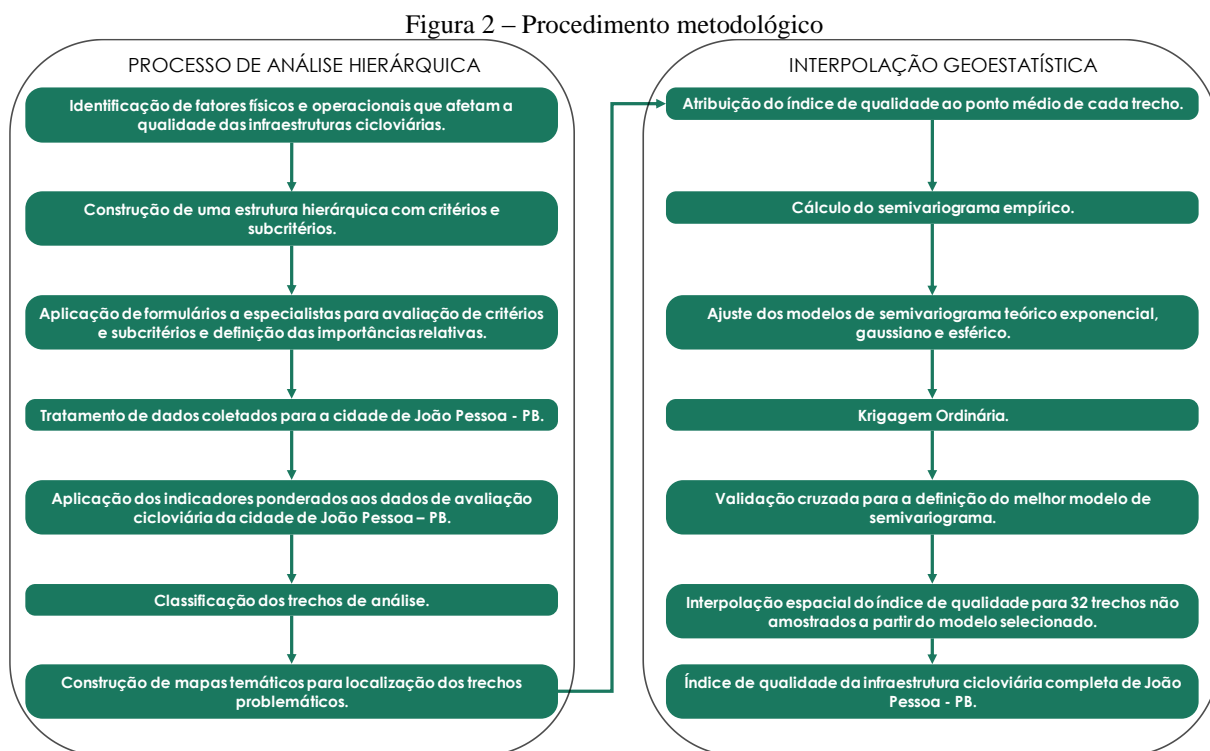
Além das planilhas eletrônicas do *software Microsoft Excel* para o cálculo dos valores associados a cada trecho amostrado, os autores utilizaram ainda o *Google Earth Pro* para geolocalização dos trechos amostrados. Também foram utilizados os pacotes computacionais ArcGIS10.1 e QGIS 3.16.12 (*open source*) para modelagem geoestatística e composição de mapas temáticos, respectivamente.

Figura 1 - Mapa de localização e classificação da infraestrutura cicloviária de João Pessoa (a). Localização dos pontos de início e fim dos trechos analisados em João Pessoa – PB (b)



2.2 Método

O método global da presente pesquisa segue uma abordagem de duas etapas, baseado no Processo de Análise Hierárquica e modelagem geoestatística. A Figura 2 ilustra o procedimento metodológico, detalhadamente descrito nas seções subsequentes.



Elaboração: Os Autores (2022).

2.2.1 O PROCESSO DE ANÁLISE HIERÁRQUICA (AHP)

Para a construção da hierarquia, foram utilizados 13 critérios, agrupados em quatro grupos: **fatores geométricos** (declividade, largura efetiva e sinuosidade), **fatores de conservação** (pavimento, drenagem, sinalização e limpeza), **fatores de utilização** (acessibilidade, segurança de tráfego e conforto) e **fatores ambientais** (iluminação, segurança pública e arborização). A definição da hierarquia baseou-se na literatura associada (ANTUNES, 2015; AYACHI; DOREY; GUASTAVINO, 2015; BATISTA; LIMA, 2020; CALVEY et al., 2015; SFDPH, 2009; PROVIDELO; SANCHES, 2011).

A definição das ponderações dos critérios foi feita utilizando-se o método de Auxílio Multicritério à Decisão (AMD) proposto pelo matemático estado-unidense Thomas Saaty no início dos anos 70 - o Processo de Análise Hierárquica (*Analytic Hierarchic Process*, AHP). O método AHP baseia-se em três princípios do pensamento analítico: construção de hierarquias, definição de prioridades e consistência lógica (COSTA, 2002; SAATY, 1991; SAATY; VARGAS, 2001; VARGAS, 1990)

As prioridades relativas foram definidas a partir de entrevistas com especialistas na área de Transportes, que fizeram comparações pareadas entre os critérios de um nível da hierarquia à luz do nível superior, utilizando para tal a Escala de Saaty, com nove níveis de importância (SAATY, 1991). A amostra de avaliadores foi composta por 4 homens e 1 mulher e a média de idade foi de 43 anos, caracterizados como: (Avaliador 1) pesquisador especialista na área de Transportes e usuário constante de infraestrutura cicloviária; (Avaliador 2) pesquisador especialista na área de Transportes, também, usuário constante de infraestrutura cicloviária; (Avaliador 3) pesquisador especialista na área de Saneamento e usuário constante de infraestrutura cicloviária; (Avaliador 4) engenheiro urbanista. Este avaliador é também usuário constante de infraestrutura cicloviária; (Avaliadora 5) engenheira civil e doutoranda na área de Transportes.

Por fim, a consistência lógica dos julgamentos foi avaliada pela Razão de Consistência (RC) proposta por Saaty para determinar a inconsistência como função da ordem da matriz de julgamentos.

De posse dos julgamentos dos avaliadores e suas respectivas ponderações globais dos critérios, é

possível obter uma ponderação média representativa de tais critérios, os quais denotam as prioridades de cada um deles frente ao objetivo geral: a avaliação da qualidade da infraestrutura cicloviária.

Após a definição das prioridades relativas dos critérios apresentados na hierarquia, foi feito o cálculo de um indicador de qualidade de infraestrutura cicloviária a partir do produto das ponderações atribuídas a cada critério pelo valor mensurado do critério, considerando os 27 trechos amostrados para a cidade João Pessoa. Assim, foi obtida uma nota final para cada trecho. A nota final do trecho é a soma de todas as parcelas analisadas. Em seguida, tais valores foram normalizados.

Posteriormente, foram definidas as medidas descritivas do conjunto de valores e foram adotados quatro níveis para classificação dos trechos, considerando para tais os valores de 1º quartil, 2º quartil (mediana) e 3º quartil. Por fim, de acordo com os níveis, os trechos foram classificados como “muito ruim”, “ruim”, “bom” e “muito bom”. Finalmente, foram elaborados mapas temáticos dos trechos amostrados, a fim de detectar a localização de trechos críticos.

O mapa foi elaborado com a utilização de um Sistema de Informação Geográfica (SIG), o *software* livre com código aberto QGIS 3.16.12 a partir da Base de Faces de Logradouros 2019 do IBGE. Essa base de dados é uma representação digital do arruamento urbano dos municípios do país, com detalhamentos de quarteirões, ruas e praças. A partir do arruamento da cidade de João Pessoa e conhecendo-se a geolocalização dos trechos analisados obtida através do SIG *Google Earth Pro*, prosseguiu-se com a inserção dos trechos no *software* QGIS.

2.2.2 MODELAGEM GEOESTATÍSTICA

A modelagem geoestatística, utilizada no presente trabalho, para extensão da avaliação da qualidade cicloviária para trechos não amostrados a partir dos trechos amostrados (11,34 km) é composta das seguintes etapas, descritas sucintamente em seguida: (1) cálculo e ajuste de variograma experimental, (2) Krigagem Ordinária e (3) Validação cruzada.

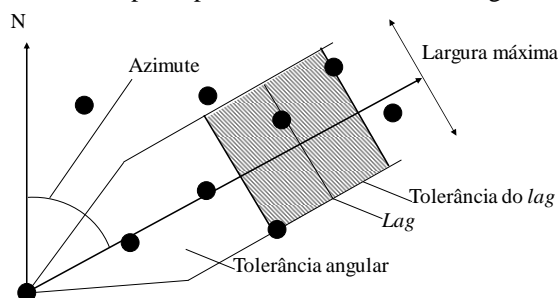
O semivariograma $\gamma(h)$ é a principal ferramenta utilizada para a modelagem geoestatística. Além de permitir visualizar a estrutura espacial da variável de interesse, ela exerce papel fundamental na estimativa em locais não amostrados. A função semivariograma empírico é dada pela Equação 1 (CRESSIE, 1993)

$$\gamma(h) = 1/2N(h) \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

onde $Z(x_i)$ é o valor da variável de interesse no ponto x_i , h expressa a distância entre pontos do banco de dados, e N é o número de pares de pontos identificados à uma distância h , conhecida como *lag*.

O processo de cálculo do semivariograma empírico envolve a busca por pares de pontos conforme os parâmetros mostrados na Figura 3. Os pontos no interior da área hachurada são aqueles utilizados para a aplicação da Equação 1 juntamente com o ponto de referência situado na origem. Para o presente estudo de caso, utilizou-se, por sua simplicidade, o semivariograma omnidirecional, que seleciona todos os pares de pontos situados a uma distância h , independentemente do azimute entre esses pontos. Dessa forma, a tolerância angular é igual a 90°. Posteriormente, a Equação 1 é aplicada aos pares identificados às distâncias $2h$, $3h$ e assim sucessivamente, até que o gráfico comece a exibir certa constância no valor da semivariância média.

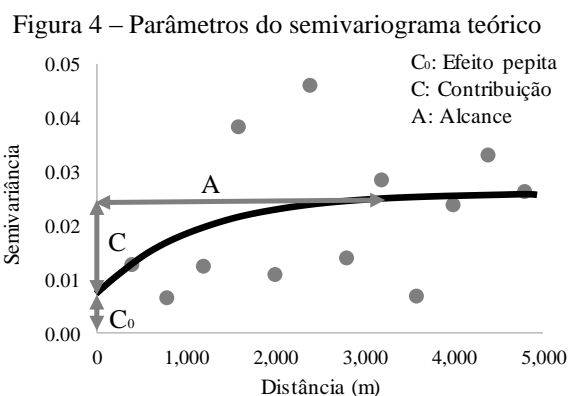
Figura 3 – Busca de pares para o cálculo do semivariograma empírico



Fonte: Yamamoto e Landim (2015)

Uma vez que a Geoestatística trabalha com dados na forma de pontos, o índice de qualidade ciclovária nos 27 trechos de 420 metros (variável de interesse) foi representado pelo ponto médio de cada segmento. Os trechos não amostrados também foram divididos em segmentos de aproximadamente 420 metros e a interpolação geoestatística foi conduzida considerando-se as coordenadas geográficas de seus respectivos pontos médios.

Após calculado o semivariograma empírico, calibra-se uma curva teórica aos pontos obtidos pela Equação 1. Essa curva é conhecida como semivariograma teórico, cuja equação é efetivamente utilizada no cálculo dos pesos ótimos para a interpolação espacial. O semivariograma teórico (Figura 4) é caracterizado por três parâmetros principais: efeito pepita (C_0), que corresponde ao valor da semivariância a distâncias que tendem a zero, ou seja, reflete a aleatoriedade espacial do fenômeno regionalizado e pode, também, ocorrer em função de erros de amostragem; patamar parcial, ou contribuição (C), porção de semivariância explicada pela estrutura espacial da variável de interesse; e alcance (a), distância a partir da qual supõe-se que não há mais dependência espacial entre os pares de pontos. O alcance corresponde à abscissa da semivariância máxima (efeito pepita mais patamar parcial), conhecida como patamar.



Fonte: Adaptada de Matheron (1963)

A literatura traz vários modelos teóricos de semivariograma. Para o presente trabalho, foi testado o ajuste dos três modelos mais comumente utilizados: exponencial (Equação 2), gaussiano (Equação 3) e esférico (Equação 4) (CRESSIE, 1993).

$$\gamma(h) = C_0 + C[1 - \exp(-h/a)] \tag{2}$$

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C[1.5(h/a) - 0.5(-h/a)^2] & \text{se } h < a \\ C_0 + C & \text{se } h \geq a \end{cases} \tag{3}$$

$$\gamma(h) = C_0 + C[1 - \exp((-h/a)^2)] \tag{4}$$

em que C_0 é o efeito pepita, C é o patamar parcial (contribuição) e a é o parâmetro de alcance. A Krigagem Ordinária consiste, basicamente, no cálculo da variável de interesse em pontos não amostrados a partir de dados amostrados vizinhos a esses pontos. Dessa forma, a KO é uma combinação linear de valores amostrados e pesos ótimos (Equação 5) (CRESSIE, 1993).

$$Z_{x_0}^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \tag{5}$$

onde $Z_{x_0}^*$ é o valor estimado da Variável Regionalizada Z na posição geográfica x_0 ; λ_i é o peso ótimo da krigagem atribuído ao vizinho x_i ; e n é o número de vizinhos. Se a variável de interesse exibe dependência espacial, vizinhos próximos de um ponto não amostrado receberão peso maior que vizinhos distantes, pois, de acordo com a função semivariograma, a semivariância (diferença) entre o valor da variável em pontos

próximos é menor do que em pontos distantes. Os pesos ótimos da KO são, dessa forma, calculados a partir de um sistema de equações não lineares que dependem, explicitamente, da semivariância teórica entre os pares de pontos amostrados (matriz K) e entre os pontos amostrados e o ponto onde a variável será estimada (matriz M). A operação matricial mostrada na Equação 6 (CRESSIE, 1993) simplifica o sistema de equações supracitado.

$$\begin{bmatrix} \gamma(x_1 - x_1) & \gamma(x_1 - x_2) & \dots & \gamma(x_1 - x_n) & 1 \\ \gamma(x_2 - x_1) & \gamma(x_2 - x_2) & \dots & \gamma(x_2 - x_n) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \gamma(x_n - x_1) & \gamma(x_n - x_2) & \dots & \gamma(x_n - x_n) & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma(x_0 - x_1) \\ \gamma(x_0 - x_2) \\ \vdots \\ \gamma(x_0 - x_n) \\ 1 \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$[K] \cdot [\lambda] = [M] \tag{7}$$

Por conseguinte, o vetor de pesos ótimos é obtido por meio da Equação 8, que é aplicada para cada ponto não amostrado onde deseja-se estimar a variável de interesse.

$$[\lambda] = [K]^{-1} \cdot [M] \tag{8}$$

A fim de comparar o ajuste dos modelos teóricos de semivariograma ao fenômeno estudado, realiza-se o procedimento de validação cruzada, que, no que se refere a estimativas geoestatísticas, se baseia no teste do ponto fictício (CRESSIE, 1993). O método consiste em remover os pontos amostrados, um por vez, do banco de dados e estimar o seu valor com base nos pontos amostrados remanescentes e Equação 8. Dessa forma, para tais pontos, tem-se tanto o valor real quanto o estimado pela krigagem, o que permite o cálculo de métricas de aderência. No presente trabalho, o modelo teórico escolhido foi aquele que apresentou a menor média do erro absoluto em porcentagem, conforme Equação 9. Vale ressaltar que, a partir da validação cruzada, é possível avaliar as estimativas dos pontos de valores conhecidos, constituindo-se, assim, numa validação metodológica.

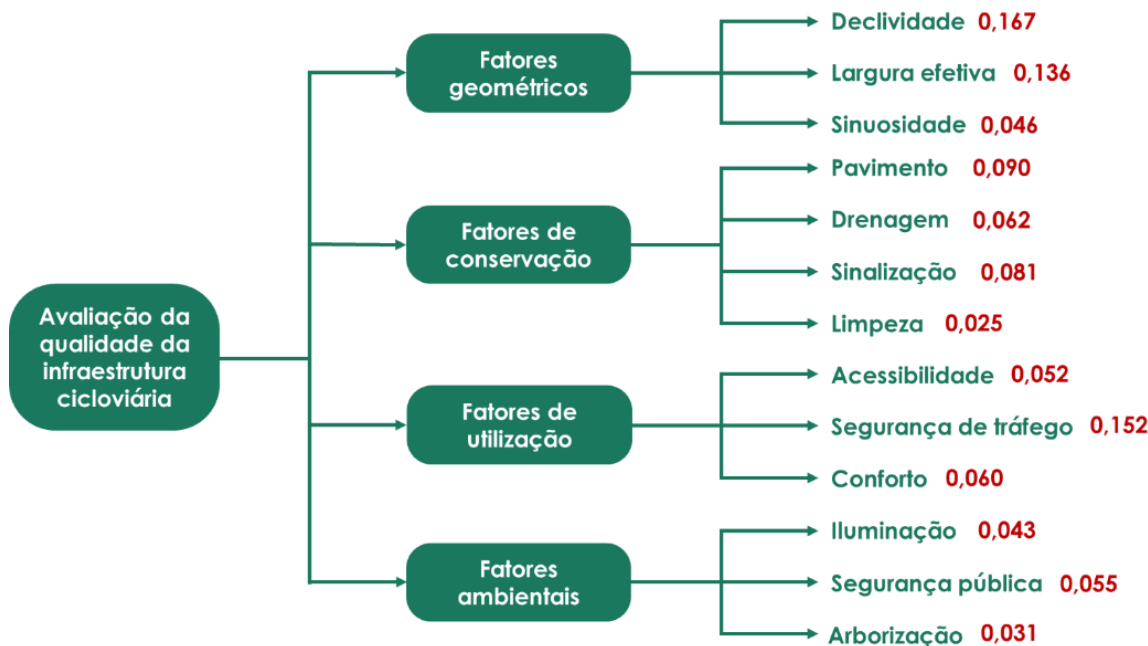
$$Erro = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n [(|Z_{x_i}^* - Z_{x_i}| / Z_{x_i}) * 100] \tag{9}$$

3 RESULTADOS

3.1 Resultados associados à análise hierárquica

A ponderação média dos critérios, obtida a partir da entrevista com os especialistas, é apresentada na Figura 5.

Figura 5 – Ponderação média dos critérios, agrupados em quatro grupos principais.



Elaboração: Os Autores (2022).

De posse do conjunto de notas finais normalizadas dos trechos, foram determinadas as medidas descritivas do indicador de qualidade cicloviária (Tabela 1). Finalmente, o indicador foi discretizado considerando uma classificação de quatro níveis, com base nos quartis. Assim, os valores que limitam cada uma das classificações são apresentados na Tabela 2, em seguida.

Tabela 1 - Medidas descritivas das notas finais normalizadas dos trechos.

Medidas descritivas	Notas finais normalizadas
Mínimo	0,2392
Máximo	0,9154
Média	0,5811
Desvio padrão	0,1692
1º Quartil	0,4361
Mediana	0,5844
3º Quartil	0,7305

Elaboração: Os Autores (2022).

Tabela 2 - Intervalos de classificação dos trechos.

Limitante inferior	Limitante superior	Intervalo	Classificação
Mínimo	1º Quartil	0,2392 - 0,4361	Muito ruim
1º Quartil	Mediana	0,4361 - 0,5844	Ruim
Mediana	3º Quartil	0,5844 - 0,7305	Bom
3º Quartil	Máximo	0,7305 - 0,9154	Muito bom

Elaboração: Os Autores (2022).

Finalmente, a Tabela 3 apresenta a classificação global de cada trecho quanto aos critérios discutidos anteriormente. Assim, 6 trechos foram classificados como “muito ruim”, 7 trechos foram classificados como “ruim”, 7 trechos foram classificados como “bom” e 7 trechos foram classificados como “muito bom”.

Tabela 3 - Nota final e classificação dos trechos.

Trecho	Nota final	Classificação	Trecho	Nota final	Classificação	Trecho	Nota final	Classificação
1	0,5008	Ruim	10	0,7266	Bom	19	0,7305	Muito bom
2	0,4361	Ruim	11	0,5593	Ruim	20	0,3495	Muito ruim
3	0,3729	Muito ruim	12	0,6756	Bom	21	0,8086	Muito bom
4	0,4130	Muito ruim	13	0,4510	Ruim	22	0,4905	Ruim
5	0,3928	Muito ruim	14	0,2392	Muito ruim	23	0,6048	Bom
6	0,4686	Ruim	15	0,6892	Bom	24	0,7375	Muito bom
7	0,3841	Muito ruim	16	0,7563	Muito bom	25	0,9154	Muito bom
8	0,5486	Ruim	17	0,7679	Muito bom	26	0,6764	Bom
9	0,5844	Bom	18	0,7453	Muito bom	27	0,6652	Bom

Elaboração: Os Autores (2022).

De posse da classificação de cada trecho, prosseguiu-se com a construção de um mapa para identificação espacial da qualidade de tais segmentos na cidade de João Pessoa. O resultado é apresentado na Figura 6.

A classificação dos trechos e o mapa temático construído são ferramentas de apoio à tomada de decisão pelo poder público no que diz respeito à manutenção da qualidade da infraestrutura cicloviária na cidade de João Pessoa. Assim, é possível observar que os trechos críticos foram os trechos 14, 20, 3, 7, 5 e 4, concentrados na região sul da cidade. Predominantemente, tratam-se de ciclofaixas e são os trechos que mais precisam de medidas de melhoria da qualidade, para promoção de conforto e segurança ao usuário da infraestrutura.

A título de exemplificação, é apresentada a Figura 7 (a, b), que representam segmentos dos trechos críticos 7 e 5, respectivamente, cujos problemas visíveis pelas fotos foram apontados. Observa-se a falta de limpeza no trecho 7 e, para ambos os segmentos, falta de sinalização horizontal e a presença dos tachões é irregular. Além disso, para o trecho 5, observam-se carros estacionados no espaço da ciclofaixa, devido à presença de lojas. Se tal fato for rotineiro, então pode afetar diretamente a segurança e sensação de conforto dos ciclistas. Vale ressaltar que as análises feitas para tais segmentos partem das figuras e são apenas iniciais. Elas não substituem uma avaliação de campo minuciosa para apoiar a tomada de decisão do poder público para as ações a serem feitas em cada um dos trechos de infraestrutura cicloviária.

Figura 6 - Avaliação da qualidade dos trechos de infraestrutura cicloviária em João Pessoa - PB.

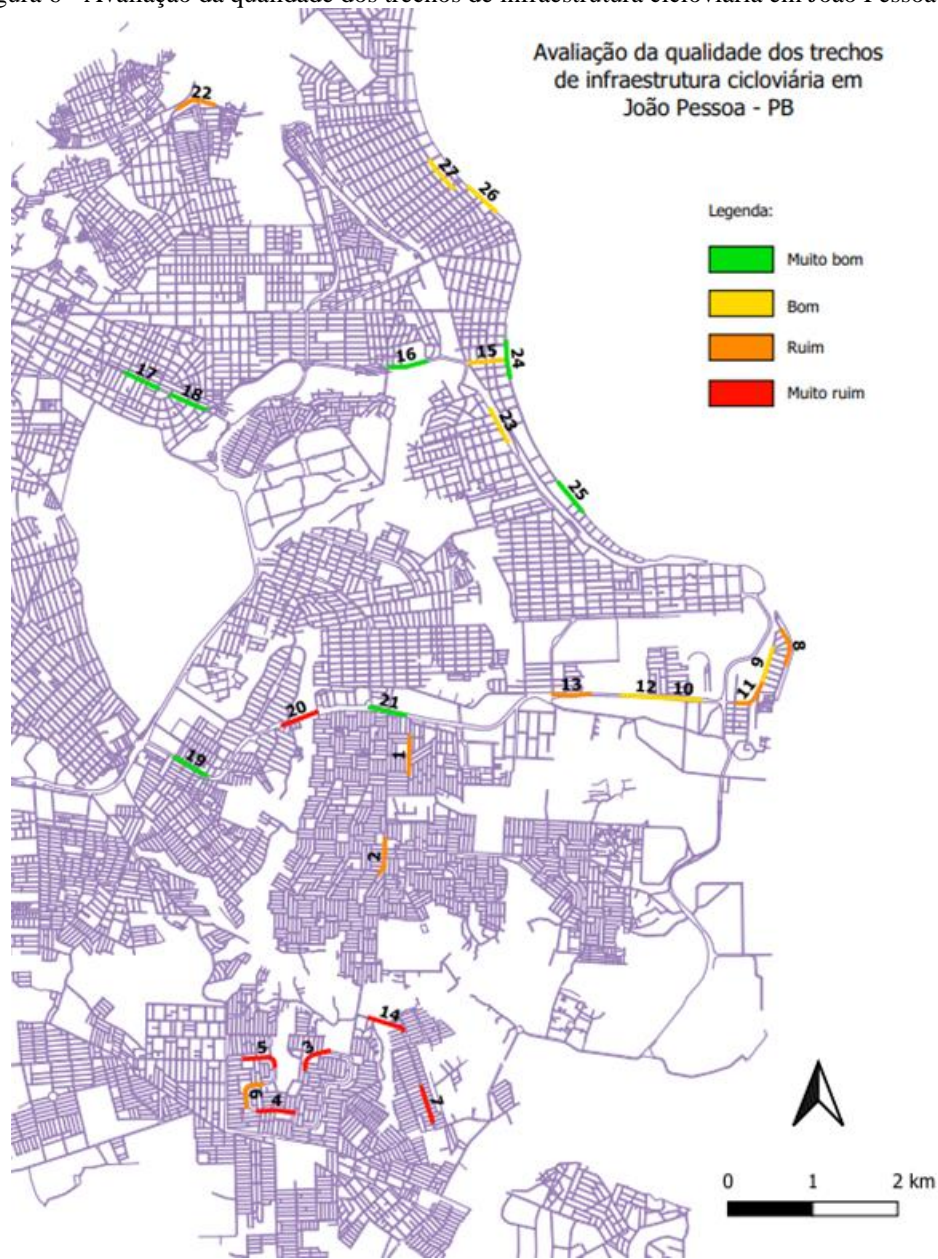


Figura 7 – Segmento de ciclofaixa do trecho 7 (a). Segmento de ciclofaixa do trecho 5 (b)



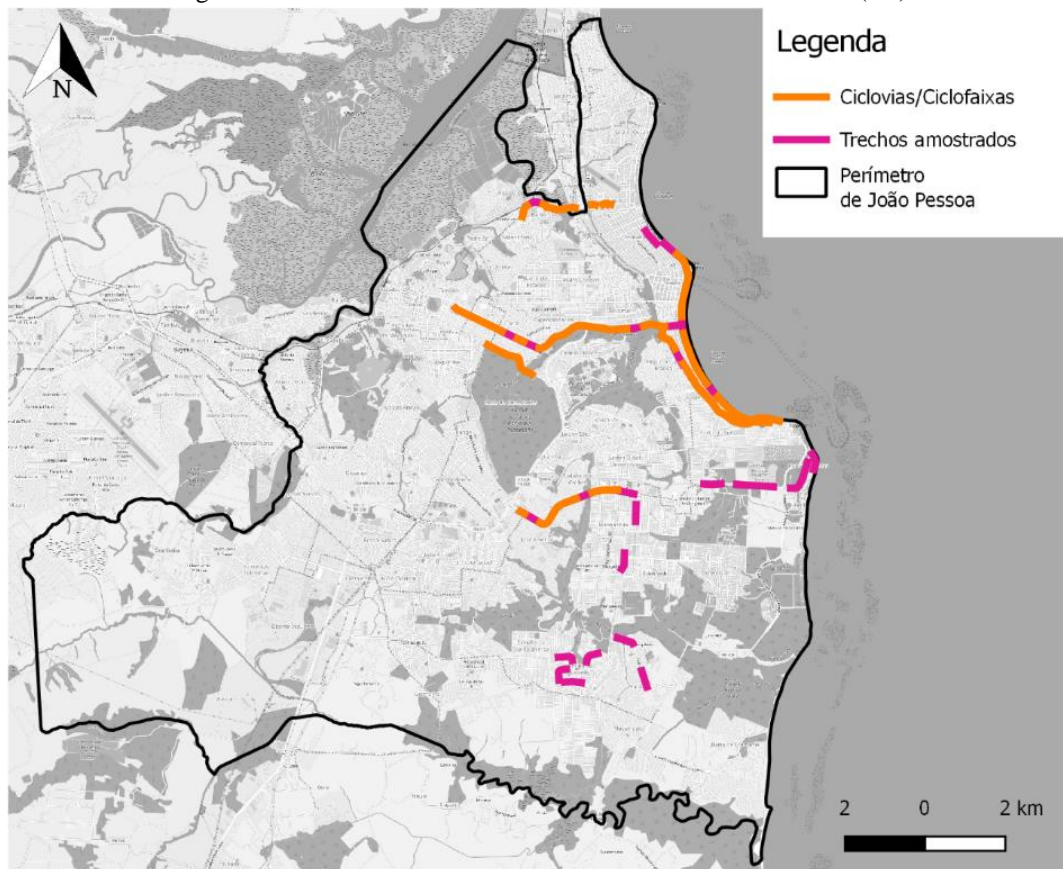
3.2 Resultados associados à modelagem geostatística

Além dos 27 trechos amostrados, a infraestrutura cicloviária remanescente resultou em 32 novos

trechos de semelhante comprimento. A Figura 8 mostra todos os trechos recuperados, destacando os não amostrados na cor laranja.

Nota-se uma maior densidade de segmentos amostrados na região sudeste da cidade, e a predominância de trechos não amostrados no canto nordeste. O semivariograma, dessa forma, busca reproduzir a mesma estrutura espacial dos pontos amostrados nos pontos remanescentes.

Figura 8 – Trechos de infraestrutura cicloviária em João Pessoa (PB)



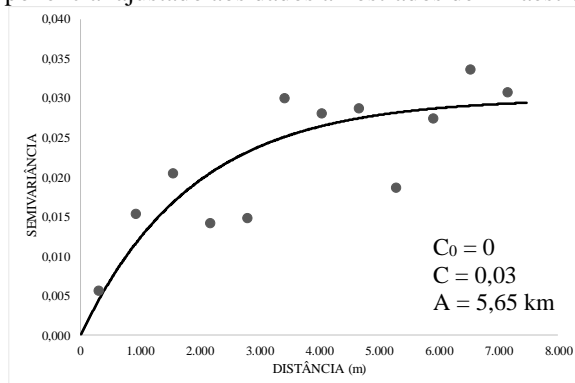
Elaboração: Os Autores (2022).

A Figura 9 mostra o semivariograma empírico ajustado à curva do modelo exponencial, que, dentre os três modelos teóricos testados, foi o que resultou no menor erro absoluto médio em porcentagem. Apesar de os resultados terem sido semelhantes, o erro obtido ao utilizar-se o modelo exponencial foi ligeiramente menor que os demais (20,99% contra 21,10% para o modelo gaussiano e 21,40% para o modelo esférico). Conseqüentemente, a interpolação espacial foi realizada com base nesse modelo.

O semivariograma revela que há, de fato, dependência espacial para o indicador de qualidade da infraestrutura cicloviária do município de João Pessoa, uma vez que a diferença entre o valor do indicador proposto é menor a pequenas distâncias e cresce conforme a distância entre pares de pontos aumenta até atingir um patamar. A partir do modelo exponencial, tem-se que ciclovias/ciclofaixas cujo ponto médio situa-se até aproximadamente 5,6 km estão relacionadas entre si. Logo, apenas dados amostrados contidos em um raio de 5,6 km centrado em uma ciclovia/ciclofaixa não amostrada participarão da estimativa do indicador de qualidade para este trecho cicloviário.

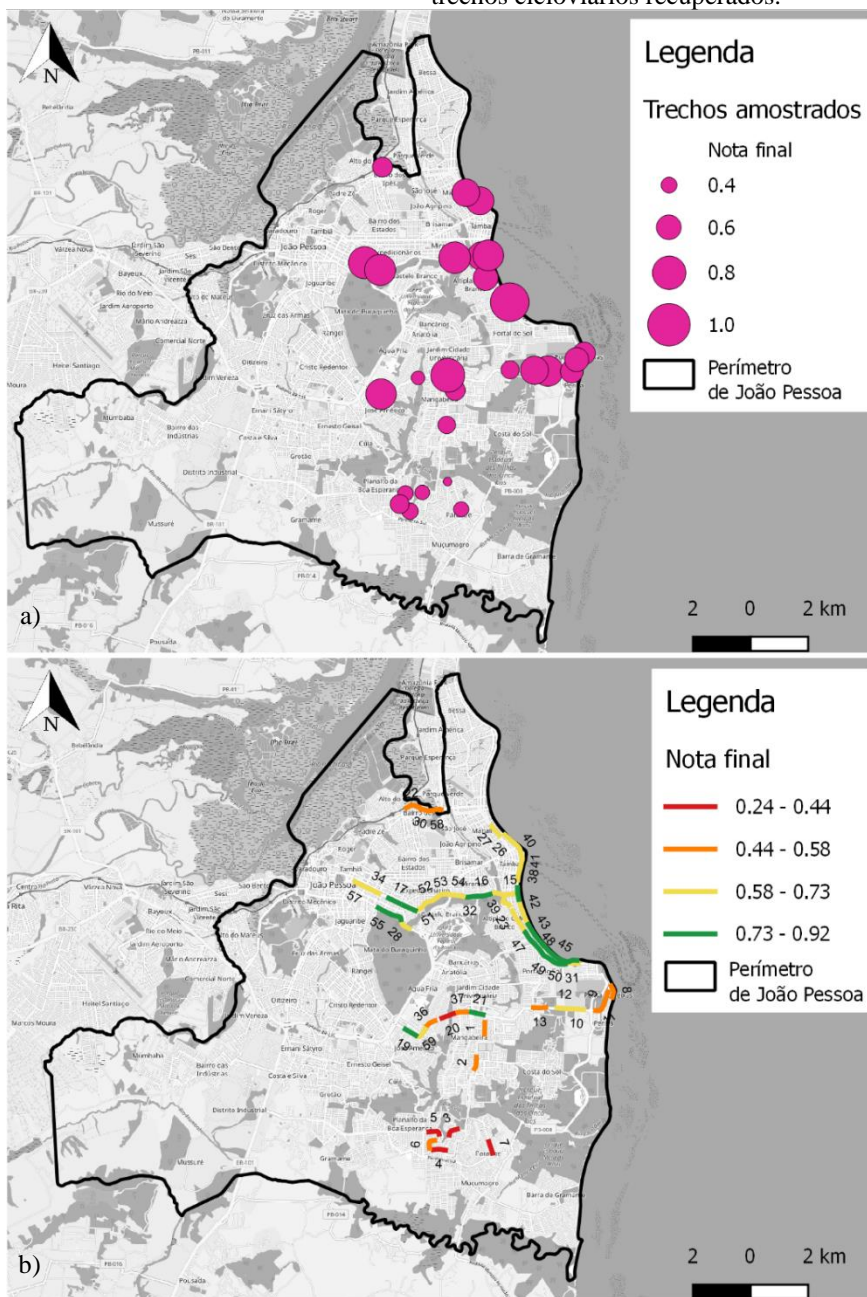
A equação de krigagem origina uma superfície contínua de valores interpolados a partir dos valores disponíveis no banco de dados. No caso da qualidade da infraestrutura cicloviária em João Pessoa, a variável de interesse é passível de ocorrer somente onde há uma ciclovia ou ciclofaixa. A Figura 10 exemplifica a aplicação da krigagem na estimativa espacial do indicador de qualidade de infraestrutura cicloviária em trechos de ciclovia ou ciclofaixas que não dispõem desse dado. São mostrados os valores reais para os trechos amostrados, e valores estimados para os demais trechos.

Figura 9 – Semivariograma exponencial ajustado aos dados amostrados de infraestrutura cicloviária de João Pessoa



Elaboração: Os Autores (2022).

Figura 10 – (a) 27 pontos médios de trechos de ciclovia/ciclofaixa amostrados; e (b) Nota final atribuída a todos os trechos cicloviários recuperados.



ID	Nota	ID	Nota
1	0,501	31	0,724
2	0,436	32	0,731
3	0,373	33	0,714
4	0,413	34	0,718
5	0,393	35	0,732
6	0,469	36	0,528
7	0,384	37	0,527
8	0,549	38	0,715
9	0,584	39	0,678
10	0,727	40	0,694
11	0,559	41	0,701
12	0,676	42	0,679
13	0,451	43	0,800
14	0,239	44	0,834
15	0,689	45	0,770
16	0,756	46	0,722
17	0,768	47	0,819
18	0,745	48	0,858
19	0,731	49	0,803
20	0,350	50	0,749
21	0,809	51	0,729
22	0,491	52	0,720
23	0,605	53	0,712
24	0,737	54	0,720
25	0,915	55	0,737
26	0,676	56	0,740
27	0,665	57	0,683
28	0,723	58	0,569
29	0,703	59	0,626
30	0,536		

Elaboração: Os Autores (2022).

4 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando o crescente uso de modos ativos, sobretudo o cicloviário, este trabalho apresentou um método de duas etapas, com a finalidade de avaliar a qualidade de uma rede cicloviária, considerando um custo relativamente baixo, em termos de coleta de dados. O método foi baseado nas seguintes abordagens: (1) Análise Hierárquica e (2) Modelagem geoestatística.

Uma contribuição importante está associada à hierarquia proposta, composta por 13 critérios, agrupados nos temas fatores geométricos, fatores de conservação, fatores de utilização e fatores ambientais. As ponderações encontradas através de uma amostra de cinco especialistas ou usuários de ciclovias podem ser utilizadas para avaliação de rede cicloviária de outros municípios. Os trechos amostrados (no presente trabalho 27) são as alternativas consideradas na hierarquia proposta. Desta forma, sugere-se a aplicação da hierarquia aqui utilizada para outras cidades similares e comparações posteriores com os resultados obtidos neste trabalho.

Aplicando-se as ponderações aos trechos amostrados para a cidade de João Pessoa, observa-se que 86% dos casos classificados como “muito ruim” são ciclofaixas. Além disso, observa-se uma dependência espacial aparente, uma vez que a maior parte dos trechos críticos se concentra no sul do município, enquanto que os trechos mais bem avaliados estão localizados na região norte (nordeste), que abrange áreas com maior renda média e concentração de polos de atração turística.

Os problemas relacionados à má manutenção e conservação, bem como a expansão e integração entre o sistema cicloviário e de transporte público, presentes em alguns trechos da infraestrutura cicloviária, foram citados em relatório diagnóstico da reformulação do Plano Diretor da cidade de João Pessoa (JOÃO PESSOA, 2021). Diante disso, o estudo aqui proposto poderá servir de insumo para planos e programas setoriais de melhoria do sistema cicloviário e a respectiva integração com outros modos de transportes, visando a melhoria da mobilidade urbana na cidade de João Pessoa.

A existência de dependência espacial permite o uso da geoestatística na abordagem com o objetivo de estender a avaliação para trechos não amostrados da rede cicloviária de João Pessoa. Desta forma, a modelagem geoestatística constitui a segunda contribuição deste trabalho, uma vez que inspeções e pesquisas de campo requerem recursos humanos capacitados, tempo e recursos financeiros. O uso da Geoestatística para interpolação espacial de indicadores pode ser estendido a outras avaliações de infraestrutura urbana, como qualidade de calçadas, instalações diversas, qualidade das vias urbanas, etc., uma vez que melhores infraestruturas urbanas se concentram em localizações de maior renda, provocando, dessa forma, uma possível dependência espacial de tais variáveis. Desta forma, os autores recomendam para trabalhos futuros o uso do procedimento para avaliação da qualidade de calçadas, especialmente para uso de população de mobilidade reduzida, por exemplo. Recomenda-se, ainda, estimativas dos indicadores sem a utilização de todos os pontos com valores conhecidos para cálculo de métricas de erros nos pontos remanescentes. Assim, espera-se realizar a comparação entre a validação cruzada e esta nova validação proposta, trazendo maior riqueza metodológica. Sugere-se também um aprimoramento metodológico a partir da utilização de distâncias ao longo da malha viária nas etapas de modelagem geoestatística, em contraposição às distâncias euclidianas adotadas no presente trabalho. Nesse âmbito, vizinhos contíguos terão muito mais influência na estimativa do indicador em um trecho não amostrado do que segmentos oriundos de outras ciclovias/ciclofaixas, permitindo uma representação mais realista da variação espacial da qualidade cicloviária.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP, Brasil - Processo 2019/12054-4) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, Brasil - Processo 304345/2019-9 e Processo 422115/2016-9).

Contribuição dos Autores

W. A. T.: Conceptualização, Curadoria dos dados, Análise formal, Investigação, Metodologia, Visualização e Redação – minuta inicial; S. F. M.: Curadoria dos dados, Análise formal, Investigação, Metodologia, Visualização, Redação – minuta inicial e Redação – revisão e edição; C. S. P.: Conceptualização, Metodologia, Supervisão, Redação – minuta inicial e Redação – revisão e edição; P. B. S.: Curadoria dos dados e Redação – revisão e edição; R. A. M.: Curadoria dos dados e Redação – revisão e edição.

Conflitos de Interesse

Os autores declaram que não há conflitos de interesse.

Referências

- ANTUNES, L. L. **Avaliação das infraestruturas cicloviárias implantadas no Corredor Universitário em Goiânia**. Goiânia, 2015. 315 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil e Ambiental (EECA), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Geotecnia, Estruturas e Construção Civil.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE PÚBLICOS (ANTP). **Ciclovias mais largas e sem ziguezagues podem ser legado da pandemia**. 2020. Disponível em: <http://www.antp.org.br/noticias/clippings/ciclovias-mais-largas-e-sem-zigue-zagues-podem-ser-legado-da-pandemia.html>. Acesso em: 10 jul. 2021.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE PÚBLICOS (ANTP). **Pandemia reforça necessidade de ações para mobilidade ativa**. 2021. Disponível em: <http://www.antp.org.br/noticias/clippings/pandemia-reforca-necessidade-de-acoes-para-mobilidade-ativa-.html>. Acesso em: 10 jul. 2021.
- AYACHI, F. S.; DOREY, J.; GUASTAVINO, C. Identifying factors of bicycle comfort: An online survey with enthusiast cyclists. **Applied Ergonomics**, v. 46, p. 124-136, 2015. DOI. 10.1016/j.apergo.2014.07.010.
- BATISTA, D. G. P.; LIMA, E. R. V. Índice de avaliação da qualidade de infraestruturas cicloviárias: um estudo em João Pessoa-PB. **Urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 12. 2020. DOI: 10.1590/2175-3369.012.e20190086.
- BRASIL. Lei Federal nº 12.587, de 03 de janeiro de 2012. **Política Nacional de Mobilidade Urbana**. Disponível em: <<https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2012/lei-12587-3-janeiro-2012-612248-publicacaooriginal-134894-pl.html>>. Acesso em: 10 jul. 2021.
- DE SOUSA, P. B.; KAWAMOTO, E. Análise de fatores que influem no uso da bicicleta para fins de planejamento cicloviário. **Transportes**, v. 23, n. 4, p. 79–87. 2015. DOI. 10.14295/transportes.v23i4.928.
- CALVEY, J. C.; SHACKLETON, J. P.; TAYLOR, M. D.; LLEWELLYN, R. Engineering condition assessment of cycling infrastructure: cyclists' perceptions of satisfaction and comfort. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**. 78, p. 134-143, 2015. DOI. 10.1016/j.tra.2015.04.031
- CAMPOS, V. B. G.; CARDOSO, P. D. B. Metodologia para planejamento de um de sistema cicloviário. **Transportes**, v. 24, n. 4, p. 39–48, 2016. DOI. 10.14295/transportes.v24i4.1158.
- CARVALHO, S. D. P. C. E.; RODRIGUEZ, L. C. E.; SILVA, L. D.; CARVALHO, L. M. T. D.; CALEGARIO, N.; LIMA, M. P. D.; SILVA, C. A.; MENDONÇA, A. R. D.; NICOLETTI, M. F. Predição do volume de árvores integrando Lidar e Geoestatística. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, v. 43, n. 107, p. 627–637, 2015.
- CHICA-OLMO, J.; RODRÍGUEZ-LÓPEZ, C.; CHILLÓN, P. Effect of distance from home to school and spatial dependence between homes on mode of commuting to school. **Journal of Transport Geography**, v. 72, p. 1–12, 2018. DOI. 10.1016/j.jtrangeo.2018.07.013.

- COSTA, H. G. **Introdução ao método de análise hierárquica: análise multicritério no auxílio à decisão**. Niterói, RJ. 2002.
- COSTA, C.S.; PITOMBO, C.S.; SOUZA, F. L. U. Travel Behavior before and during the COVID-19 Pandemic in Brazil: Mobility Changes and Transport Policies for a Sustainable Transportation System in the Post-Pandemic Period. **Sustainability**, v. 14, p. 4573, 2022. DOI. 10.3390/su14084573
- CRESSIE, N. A. C. **Statistics for spatial data**. John Wiley & Sons, Inc., 1993.
- DIXON, L. B. Bicycle and Pedestrian Level-of-Service Performance Measures and Standards for Congestion Management Systems. **Transportation Research Record**, v. 1538, n. 1, p. 1–9, 1996. DOI. 10.1177/0361198196153800101.
- FONSECA, N. F. D. S.; MANZATO, G. G.; TEIXEIRA I. P.; RODRIGUES DA SILVA, A.N. Um índice para a caracterização da oferta de infraestrutura cicloviária. **Anais do 32º Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino e Pesquisa em Transporte**, ANPET, Gramado, v. 1, p. 2630 – 2641, 2018.
- GOMES, M. M.; PITOMBO, C. S.; PIRDAVANI, A.; BRIJS, T. Geostatistical approach to estimate car occupant fatalities in traffic accidents. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 70, n. 4, p. 1231–1256, 2018. DOI. 10.14393/rbcv70n4-46140.
- GOOVAERTS, P. Medical geography: A promising field of application for geostatistics. **Mathematical Geosciences**, v. 41, p. 243–264, 2009. DOI. 10.1007/s11004-008-9211-3.
- JOÃO PESSOA. **P2b - Relatório do Diagnóstico Técnico: Fase II - Outubro/2021**. Prefeitura Municipal de João Pessoa, PMJP. Disponível em: http://pdjp.com.br/wp-content/uploads/2021/10/115_2021.10.08_P2b_DIAGNOSTICO-TECNICO.pdf. Acesso em 08/08/2022.
- KERRY, R.; GOOVAERTS, P.; GIMÉNEZ, D.; OUDEMANS, P.; MUÑIZ, E. Investigating geostatistical methods to model within-field yield variability of cranberries for potential management zones. **Precision Agriculture**, v. 17, p. 247–273, 2016. DOI. 10.1007/s11119-015-9408-7.
- KRIGE, D. G. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. **Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, v. 52, n. 6, p. 119–139, 1951. Southern African Institute of Mining and Metallurgy.
- LINDNER, A.; PITOMBO, C. S.; ROCHA, S. S.; QUINTANILHA, J. A. Estimation of transit trip production using Factorial Kriging with External Drift: an aggregated data case study. **Geo-spatial Information Science**, v. 19, n. 4, p. 245–254, 2016. DOI. 10.1080/10095020.2016.1260811.
- LINDNER, A.; PITOMBO, C. S. Sequential Gaussian Simulation as a promising tool in travel demand modeling. **Journal of Geovisualization and Spatial Analysis**, v. 3, 2019. DOI. 10.1007/s41651-019-0038-x.
- MAJUMDAR, A.; NOLAND, R. B.; OCHIENG, W. Y. A spatial and temporal analysis of safety-belt usage and safety-belt laws. **Accident Analysis & Prevention**, v. 36, n. 4, p. 551–560, 2004. DOI. 10.1016/S0001-4575(03)00061-7.
- MALDONADO-HINAREJOS, R.; SIVAKUMAR A.; POLAK, J. W. Exploring the role of individual attitudes and perceptions in predicting the demand for cycling: a hybrid choice modelling approach. **Transportation**, v.41, n. 6, p. 1287-1304, 2014. DOI. 10.1007/s11116-014-9551-4.
- MARQUES, S. D. F.; PITOMBO, C. S. Ridership Estimation Along Bus Transit Lines Based on Kriging: Comparative Analysis Between Network and Euclidean Distances. **Journal of Geovisualization and Spatial Analysis**, v. 5, n. 1, p. 7, 2021a. DOI.10.1007/s41651-021-00075-w.
- MARQUES, S. D. F.; PITOMBO, C. S. Applying Multivariate Geostatistics for Transit Ridership Modeling at the Bus Stop Level. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 27, n. 2, 2021b. DOI. 10.1590/1982-2170-2020-0069.
- MATHERON, G. Principles of geostatistics. **Economic Geology**, v. 58, n. 8, p. 1246–1266, 1963. DOI. 10.2113/gsecongeo.58.8.1246.
- MATHERON, G. The Theory of Regionalized Variables and Its Applications, 1971. Paris: Les Cahiers du

Centre de Morphologie Mathématique in Fontainebleau.

- MEDEIROS, R. S.; MELO, R. A.; SOUSA, P. B. Uso de Indicadores para Avaliação do Sistema Viário Urbano. In: 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2019, Balneário Camboriú-SC. **Anais...Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes**, 2019. p. 178-188.
- MONTEIRO, F. B.; CAMPOS, V. B. G. Métodos de avaliação da qualidade dos espaços para ciclistas. In: XXV Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET, 2011, Belo Horizonte-MG. **Anais...Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes**, 2011. p. 1242-1253.
- PITOMBO, C. S.; SALGUEIRO, A. R.; DA COSTA, A. S. G.; ISLER, C. A. A two-step method for mode choice estimation with socioeconomic and spatial information. **Spatial Statistics**, v. 11, p. 45–64, 2015. DOI. 10.1016/j.spasta.2014.12.002.
- PROVIDELO, J. K.; SANCHES, S. D. P. Percepções de indivíduos acerca do uso da bicicleta como modo de transporte. **Transportes**, v. 18, n. 2, 2010. DOI. 10.14295/transportes.v18i2.424.
- PROVIDELO, J. K.; SANCHES, S. D. P. Roadway and traffic characteristics for bicycling. **Transportation**, v. 38, n. 5, p. 765-777, 2011. DOI. 10.1007/s11116-011-9353-x.
- RODRIGUES DA SILVA, A. N.; PITOMBO, C. S.; PEDREIRA JÚNIOR, J. U.; CIRÍACO, T. G. M.; COSTA, C. S. Changes in Mobility and Challenges to the Transport Sector in Brazil due to COVID-19. Em: **TRANSPORTATION AMID PANDEMICS: PRACTICES AND POLICIES**; Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2022, v. 1, p. 105-118. DOI. 10.1016/B978-0-323-99770-6.00010-7.
- SAATY, T. L. **Método de análise hierárquica**. São Paulo: McGraw-Hill, Makron, 1991.
- SAATY, T. L.; VARGAS, L. G. **Models, methods, concepts applications of the analytic hierarchy process** – 2001. Norwell: Kluwer Academic Publishers.
- SELBY, B.; KOCKELMAN, K. M. Spatial prediction of traffic levels in unmeasured locations: Applications of universal kriging and geographically weighted regression. **Journal of Transport Geography**, v. 29, p. 24–32, 2013. DOI. 10.1016/j.jtrangeo.2012.12.009.
- SFDPH. **Bicycle Environmental Quality Index (BEQI)**. Draft Report. San Francisco Department of Public Health, Environmental Health Section/Program on Health, Equity and Sustainability, San Francisco, CA United States Draft Report, 2009.
- SILVEIRA, M. O.; MAIA, M. L. A. Variáveis que influenciam no uso da bicicleta e as crenças da teoria do comportamento planejado. **Transportes**, v. 23, n. 1, p. 24-36, 2015. DOI. 10.14295/transportes.v23i1.848.
- STELZENMÜLLER, V.; EHRICH, S.; ZAUKE, G. P. Impact of additional small-scale survey data on the geostatistical analyses of demersal fish species in the North Sea. **Scientia Marina**, v. 69, n. 4, p. 587–602, 2005. DOI. 10.3989/scimar.2005.69n4587.
- TOBLER, W. R. A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region. **Economic Geography**, v. 46, p. 234–240, 1970. DOI. 10.2307/143141.
- VARGAS, L. G. An overview of the Analytic Hierarchy Process and its applications. **European Journal of Operations Research**, v.28, p. 2-8, 1990. DOI. 10.1016/0377-2217(90)90056-H.
- WEBSTER, R.; OLIVER, M. A. **Geostatistics for environmental scientists**. 2nd. ed. John Wiley & Sons, 2007.
- YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. Oficina de textos, 2015.
- YANG, H.; YANG, J.; HAN, L. D.; LIU, X.; PU, L.; CHIN, S.; HWANG, H. A Kriging based spatiotemporal approach for traffic volume data imputation. **PloS one**, v. 13, n. 4, p. e0195957, 2018. DOI. 10.1371/journal.pone.0195957.
- ZHANG, D.; WANG, X. C. Transit ridership estimation with network Kriging: A case study of Second Avenue Subway, NYC. **Journal of Transport Geography**, v. 41, p. 107–115, 2014. DOI. 10.1016/j.jtrangeo.2014.08.021.

Biografia do autor principal



Wellington de Aquino Traldi nasceu em Rio Claro – SP, Brasil, em 1999. Possui graduação em Engenharia Civil pela Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC/USP), com estudos especiais em Engenharia de Transportes. Atualmente atua na área de análise de dados em Logística e Transportes.



Esta obra está licenciada com uma Licença [Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.