

Estado da publicação: O preprint não foi publicado em outro meio.

Espacialização da estimativa do material particulado emitido pelo tráfego de veículos na cidade do Rio de Janeiro e do perfil populacional associado

Heitor Soares de Farias, Max Anjos

<https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.17928>

Submetido em: 2026-09-02

Postado em: 2026-09-02 (versão 1)

(AAAA-MM-DD)

Spatialization of the estimated particulate matter emitted by vehicular traffic in the city of Rio de Janeiro and the associated population profile

Espacialização da estimativa do material particulado emitido pelo tráfego de veículos na cidade do Rio de Janeiro e do perfil populacional associado

Heitor Soares de Farias

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica , RJ, Brasil.

<https://orcid.org/0000-0003-3585-5028>

heisofa@gmail.com

Max Anjos

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brasil.

<https://orcid.org/0000-0001-6394-1324>

maxanjos@campus.ul.pt

URL: https://revistas.usp.br/geousp/pt_BR/article/view/234767

Recebido: 10-09-2025

Aprovado: 27-06-2026

Editor do artigo: Fernando Shinji Kawakubo

Resumo: Na última década, a prefeitura do Rio de Janeiro investiu em mobilidade, principalmente no BRT, transporte público rodoviário movido a diesel, fonte de emissões de material particulado (MP). Objetivando identificar as Regiões de Planejamento da cidade que mais emitem MP, como também as características socioeconômicas dessas áreas, foram utilizados dados das 963 estações de contagem de veículos da CET-Rio para janeiro de 2021 e, com *Machine Learning*, estimou-se o fluxo de veículos em 42.411 trechos de vias, discriminando-o por categoria, ano e combustível. Posteriormente foram aplicados teste estatísticos entre a poluição emitida e os indicadores sociais renda e cor da pele. Os

resultados mostram que na Barra da Tijuca se replica um modelo espacialmente elitista existente na Zona Sul, com maior emissão de MP coincidindo com população mais abastada de maioria branca, o oposto do descrito em trabalhos internacionais, embora não haja correlação estatística significativa para toda a cidade.

Palavras-chave: Modelagem, Machine Learning, Inteligência artificial, Distribuição completa, Poluição do ar.

Abstract: Over the last decade, the Rio de Janeiro city government has invested in mobility, mainly in the BRT (Bus Rapid Transit), a diesel-powered public road transport system that is a source of particulate matter (PM) emissions. Aiming to identify the city's Planning Regions that emit the most PM, as well as the socioeconomic characteristics of these areas, data from 963 vehicle counting stations of CET-Rio (Rio de Janeiro's traffic management company) for January 2021 were used. Using Machine Learning, vehicle flow was estimated in 42,411 road sections, discriminating it by category, year, and fuel type. Subsequently, statistical tests were applied between the pollution emitted and the social indicators of income and skin color. The results show that Barra da Tijuca replicates a spatially elitist model existing in the South Zone, with higher PM emissions coinciding with a wealthier, predominantly white population, the opposite of what is described in international studies, although there is no statistically significant correlation for the entire city.

Keywords: Modeling, Machine Learning, Artificial Intelligence, Full Distribution, Air pollution.

Resumen: Durante la última década, el gobierno de la ciudad de Río de Janeiro ha invertido en movilidad, principalmente en el BRT (Bus Rapid Transit), un sistema de transporte público por carretera impulsado por diésel que es una fuente de emisiones de material particulado (PM). Con el objetivo de identificar las Regiones de Planificación de la ciudad que emiten más PM, así como las características socioeconómicas de estas áreas, se utilizaron datos de 963 estaciones de conteo vehicular de CET-Rio (empresa de gestión del tráfico de Río de Janeiro) correspondientes a enero de 2021. Mediante aprendizaje automático, se estimó el flujo vehicular en 42.411 tramos de carretera, discriminándolo por categoría, año y tipo de combustible. Posteriormente, se aplicaron pruebas estadísticas entre la contaminación emitida y los indicadores sociales de ingresos y color de piel. Los resultados muestran que Barra da Tijuca reproduce un modelo espacialmente elitista existente en la Zona Sur, donde las mayores emisiones de PM coinciden con una población más rica y predominantemente blanca, lo contrario de lo descrito en estudios internacionales, aunque no existe una correlación estadísticamente significativa para toda la ciudad.

Palabras clave: Modelado, Machine Learning, Inteligencia artificial, Distribución completa, Contaminación del aire.

Introdução

A infraestrutura de transportes e melhoria da mobilidade foram o principal legado dos Jogos Olímpicos de 2016 para o Rio de Janeiro, entretanto, investimentos em transportes limpos ficaram restritos à área central e Zona Sul da cidade. Em uma grande oportunidade de modernização do transporte, observou-se a reincidência do modelo rodoviarista como solução para a mobilidade na maior parte da cidade (Mascarenhas, 2016), onde foi implementado o modelo BRT (*Bus Rapid Transit*) que são ônibus articulados circulando por corredores viários expressos.

Em veículos pesados, como ônibus e caminhões, o combustível utilizado é o diesel por ser mais eficiente em termos de consumo. Entretanto, entre os combustíveis, o diesel é a principal fonte de emissões de material particulado (MP) e óxidos de nitrogênio (NOx) para a atmosfera (Inea, 2022), fazendo do setor de transportes um grande contribuinte para a piora na qualidade do ar nas cidades (Borges et al., 2021).

A poluição atmosférica é um problema ambiental presente em diferentes cidades do mundo e cada vez mais estudos apresentam a relação entre a má qualidade do ar e riscos para a saúde (Bowe et al., 2018; Burnett et al., 2014; Figliozzi, 2017; Lurie et al., 2019; West, 2014). A exposição a poluentes como o MP tem sido relatada como responsável por milhões de mortes no mundo (Anenberg, et al., 2010; Yue et al., 2020).

Nesse contexto, estudos internacionais têm associado a localização das fontes emissoras e má qualidade do ar a piores indicadores socioeconômicos, denotando injustiças ambientais (Porto, 2011). Exposições mais altas ocorrem para minorias raciais/étnicas e populações e grupos de baixa renda (Lane et al., 2022) que correm maior risco de morte por exposição a material particulado fino (PM_{2,5}) do que outras populações/grupos de renda (Di et al., 2017; Wang et al., 2017). Há evidências de que pessoas com menor escolaridade, renda ou emprego de baixo *status* têm maior risco de morte por exposição a MP (Bell et al., 2013).

Nos EUA, a concentração média de PM_{2,5} para a população negra, asiáticas e hispânicas ou latinas era 13,7% maior que para a população branca e 36,3% maior que a da população nativa americana (Jbaily et al., 2022). Outro estudo mostrou que as disparidades na exposição a PM_{2,5} variam entre os estados nos EUA. As populações negras não hispânicas, asiáticas hispânicas e não hispânicas têm exposições maiores do que a média em 63%, 33% e 26% dos estados, respectivamente. Por outro lado, as populações brancas não hispânicas não sofreram exposições mais altas em nenhum estado (Liu et al., 2022).

Fecht et al. (2015) estudando a poluição do ar na Inglaterra e Holanda, encontraram concentrações mais altas de MP e NO_x nos bairros mais carentes. As concentrações em ambos os países foram maiores em bairros com mais de 20% de população não-branca. As desigualdades na poluição do ar eram principalmente um problema urbano, sugerindo que medidas para reduzi-la deveriam incidir no setor de transportes.

Na Austrália, Cooper et al. (2019) investigaram as disparidades na exposição ao material particulado fino (PM_{2,5}) usando modelos de regressão para estimar as concentrações médias anuais e dados do censo sobre etnia, idade e status socioeconômico. Essas associações sugeriram que áreas com maior desvantagem socioeconômica, maior proporção de minorias étnicas e idosos estão expostas a concentrações mais altas de PM_{2,5} e NO₂.

No Brasil, Requia & Castelhana (2023), em um estudo para a escala nacional, encontraram como resultado a maior exposição da população branca à poluição do ar. Quando considerada apenas a renda, os resultados indicaram que o grupo populacional de alta renda foi o mais exposto em todas as análises, o que é surpreendente, já que estes resultados demonstram exatamente o oposto do que apontam estudos internacionais.

Na cidade do Rio de Janeiro permanece significativa a contribuição dos veículos para a poluição atmosférica, principalmente em áreas de elevada densidade populacional e intenso fluxo viário (Inea, 2025). Assim, o objetivo deste estudo é estimar a emissão de MP do tráfego de veículos ao nível das ruas, identificar as Regiões de Planejamento (RP) que mais emitem o poluente e correlacionar com a renda e a cor da pele da população dessas áreas.

Materiais e métodos

- Cálculo do tráfego de veículos

O modelo ML adotado neste estudo seguiu a abordagem desenvolvida por Anjos e Meier (2025), que estima dados de tráfego veicular em alta resolução temporal (frequência horária) na escala de segmentos viários. Informações complementares sobre a construção, treinamento e validação do modelo no contexto da cidade do Rio de Janeiro podem ser consultadas em Farias e Anjos (2024).

O modelo proposto possui capacidade de extrapolar estimativas de segmentos viários com dados disponíveis para aqueles não monitorados, empregando características espaço-temporais e de tráfego para prever os valores médios horários de fluxo de veículos e velocidade média. Para tal, o modelo utiliza três categorias de variáveis preditoras: tráfego de veículos, variáveis temporais e variáveis espaciais.

Os dados de tráfego foram fornecidos pela Companhia de Engenharia de Tráfego do Rio de Janeiro (CET-Rio) para o período de 7 a 31 de janeiro de 2021, contendo volume horário de veículos, velocidade média e composição da frota (categorias), medidos em 963 estações de contagem de fluxo. A partir desses dados também foram geradas as variáveis temporais como hora do dia, dia da semana, indicadores de fim de semana e feriados, utilizando funções do pacote *recipes* do R (Kuhn et al., 2024). Já as variáveis espaciais foram extraídas do Geofabrik (projeto Open Street Map — contribuições OpenStreetMap, 2017), incluindo características da rede viária (classes de vias, comprimento e limite de velocidade), além de informações sobre áreas de lazer, uso e cobertura do solo, edificações, comércio, amenidades e áreas naturais.

Antes do treinamento e teste do algoritmo Random Forest (Breiman, 2001), os dados de tráfego, espaciais e temporais passaram por etapas de limpeza, imputação de valores ausentes e padronização (escalonamento) das variáveis numéricas. Para garantir a consistência e a generalização do modelo, inicialmente os dados foram particionados em treinamento e teste. O período de treinamento compreendeu os dias 7 a 24 de janeiro de 2021 (70% dos dados temporais), enquanto o período de teste cobriu os dias 25 a 31 de janeiro de 2021 (30% restantes), preservando a ordem cronológica preditiva. Paralelamente, 70% das estações de contagem foram destinadas ao treinamento e 30% ao teste, assegurando que o modelo fosse avaliado em vias não utilizadas durante o aprendizado.

Para otimizar os hiperparâmetros do modelo e reduzir o risco de *overfitting*, foi incorporada uma validação cruzada estratificada do tipo *k-fold* com $k=10$ durante a fase de treinamento. Primeiro, os dados de treinamento foram particionados aleatoriamente em 10 subconjuntos (*folds*) de tamanhos aproximadamente iguais, mantendo a distribuição temporal e espacial sempre que possível. Em cada interação 9 *folds* foram utilizados para o treinamento do modelo e 1 *fold* para validação, repetindo-se o processo 10 vezes, de modo que cada *fold* atuou como conjunto de validação uma única vez.

Em seguida, o desempenho médio dos 10 *folds* foi monitorado para ajuste dos hiperparâmetros - por exemplo número de árvores, profundidade, taxa de aprendizado -, utilizando métricas como o erro quadrático médio (*Root Mean Square Error* - RMSE). Após a definição dos melhores hiperparâmetros, o modelo final foi reajustado com todo o conjunto de treinamento e avaliado no conjunto de teste independente. Os resultados demonstraram desempenho satisfatório, com RMSE de 119 veículos/h para a predição do volume horário e RMSE de 4,1 km/h para a velocidade média,

valores compatíveis com a literatura (Anjos e Meier, 2025) e adequados para a subsequente estimativa de emissões.

- Cálculo da emissão de material particulado

Na segunda etapa, para estimar as emissões de MP, os dados de fluxo de veículos foram divididos nas categorias: automóveis, comerciais leves, motocicletas, caminhões e ônibus, considerando características como capacidade de carga e tipo de combustível (Brasil, 2011). No Brasil, automóveis são veículos leves de passageiros e podem utilizar como combustível a gasolina, o etanol e o gás natural veicular (GNV), ou ainda combinando-os como são os veículos flex. Há também os veículos elétricos, que ainda eram muito poucos em 2021, ano dos dados utilizados. As motocicletas podem utilizar gasolina e também há modelos do tipo flex. Já os comerciais leves podem utilizar gasolina, etanol, GNV e o diesel, e do tipo flex. Os caminhões e ônibus são veículos pesados e utilizam somente o diesel (Cetesb, 2022).

Faz-se necessário destacar que veículos movidos a etanol não emitem partículas a partir da queima do combustível. Veículos movidos a GNV também não, no entanto, estes normalmente utilizam um segundo combustível (gasolina ou etanol). Veículos que utilizam GNV e etanol só foram contabilizados no cálculo da emissão de MP no desgaste dos pneus. Para os veículos do tipo flex a utilização de gasolina ou etanol depende, principalmente, da relação entre os preços dos combustíveis que varia de acordo com a localidade. Veículos movidos a etanol têm maior potência e consomem mais combustível. Para que sua utilização seja vantajosa é necessário que seu preço seja inferior a 70% do valor da gasolina (EPE, 2013).

Goldemberg et al. (2008) propuseram uma função, utilizada pela Cetesb (2022), que indica qual fração da frota de veículos flex opera com etanol em cada unidade da federação, em função da relação do preço dos combustíveis nos postos. Considerando o preço médio em janeiro de 2021 no Rio de Janeiro, a função estimou que 18% dos veículos flex utilizariam o etanol e 82% a gasolina como combustível. Esse percentual foi utilizado nos cálculos de fator de emissão, apresentados a seguir.

Segundo Cancelli e Dias (2014) a quantidade de determinado poluente emitido em uma rodovia por uma frota de veículos pode ser calculada pela equação: $E = Fr \times Fe \times L$, onde: Fr é o total de veículos da categoria que circularam na via; Fe é o fator de emissão do poluente (g/km) e L é o comprimento da via (km).

A emissão de poluentes é definida com base no fator de emissão que varia de acordo com a categoria do veículo, o combustível utilizado e o ano de fabricação. Veículos mais recentes emitem menos poluentes atmosféricos por possuírem tecnologias mais avançadas, menor consumo de combustível, mas também por estarem em melhor estado de conservação (Inea, 2024).

Para o cálculo do fator de emissão de MP foi realizada a distribuição completa, ou seja, as categorias descritas foram separadas por ano de fabricação e tipo de combustível (Cancelli e Dias, 2014). Assim, a frota de veículos circulantes no Rio de Janeiro, em 2021, era de 3.265.357 veículos (Data Rio, 2024). Essa frota categorizada por idade tem: 9,88% dos veículos fabricados na década de 2020, 34,88% na década de 2010, 20,80% na década de 2000, 15,64% na década de 1990, 11,12% na década de 1980, 6,67% na década de 1970, e percentuais ínfimos nas décadas anteriores.

- Cálculo do fator de emissão dos automóveis

De acordo com o total e percentual da frota de veículos por tipo de combustível no município do Rio de Janeiro (Data Rio, 2024), entre os automóveis 39% são movidos a gasolina (0,39), 32% são flex ($0,32 \times 0,82 = 0,2624$), 9% combinam gasolina com GNV (0,09) e 13% usam GNV e são flex ($0,13 \times 0,82 = 0,1066$). Então 84,9% dos veículos na cidade do Rio de Janeiro utilizam a gasolina como combustível ($0,39 + 0,2624 + 0,09 + 0,1066 = 0,849$).

Os automóveis fabricados até 1997 emitem 0,0024 g/km de MP, enquanto os fabricados após este ano emitem 0,0011 g/km (Cetesb, 2022). Considerando que foram fabricados 34,44% até a década de 1990, inclusive, e 65,56% após a década de 1990, o fator de emissão foi calculado pelas equações:

- até 1997: $Fe = 0,0024 \times 0,3444 = 0,000827$;
- após 1997: $Fe = 0,0011 \times 0,6556 = 0,000721$;
- então $Fea = 0,000827 + 0,000721 = 0,001548$.

Assim, o cálculo da emissão pelos automóveis foi feito pela equação:

$$Ea = Fa \times Pa \times Fea \times L$$

onde:

- Fa é o número de automóveis que circularam na via;
- Pa é o percentual dos automóveis que emitem MP = 0,849;
- Fea é o fator de emissão dos automóveis (g/km) = 0,001548, e;
- L é o comprimento da via (km).

- Cálculo do fator de emissão dos comerciais leves

Segundo o Inea (2024), entre os comerciais leves 16% são movidos a gasolina (0,16), 34% são flex e utilizam gasolina (0,34) e, 24% usam GNV ($0,24 \times 0,82 = 0,1968$). Então 69,68% dos comerciais leves na cidade do Rio de Janeiro são movidos a gasolina ($0,16 + 0,34 + 0,1968 = 0,6968$) e seguem o mesmo fator de emissão dos automóveis (Cetesb, 2022).

Os comerciais leves movidos a diesel são 22% da frota. Aqueles fabricados até 1999 emitem 0,076 g/km de MP, os fabricados na década de 2000 emitem 0,063 g/km e após este ano emitem 0,032 g/km (Cetesb, 2022). Foram fabricados 34,44% até a década de 1990, inclusive; 20,80% na década de 2000 e 44,76% nas décadas posteriores, o fator de emissão foi calculado pelas equações:

- até 1999: $Fe = 0,076 \times 0,3444 = 0,026174$;
- 2000 a 2009: $Fe = 0,063 \times 0,2080 = 0,013104$;
- após 2010: $Fe = 0,032 \times 0,4476 = 0,014323$;
- então $Fed = 0,026174 + 0,013104 + 0,014323 = 0,053601$.

Assim, o cálculo da emissão pelos comerciais leves foi feito pela equação:

$$Ecl = Fcl \times [(Pclg \times Fea) + (Pcld \times Fed)] \times L$$

onde:

- Fcl é o número de comerciais leves que circularam na via;
- Pclg: percentual dos comerciais leves movidos a gasolina = 0,6968;
- Fea é o fator de emissão dos automóveis (g/km) = 0,001548;
- Pcld é o percentual dos comerciais leves movidos a diesel = 0,22;
- Fed é o fator de emissão dos comerciais leves movidos a diesel (g/km) = 0,053601, e;
- L é o comprimento da via (km).

- Cálculo do fator de emissão das motocicletas

Entre as motocicletas, 64% são movidas a gasolina (0,64) e 36% são flex ($0,36 \times 0,82 = 0,2952$) (Data Rio, 2024). Então 93,5% das motos circulantes na cidade do Rio de Janeiro são movidas a gasolina ($0,64 + 0,2952 = 0,9352$). As motocicletas fabricadas até 2002 emitem 0,0287 g/km de MP, 2003 a 2004 emitem 0,0140 g/km e de 2005 em diante emitem 0,0035 g/km (Cetesb, 2022). Foram fabricados 34,44% até a década de 1990, inclusive, 20,80% na década de 2000 e 44,76% nas décadas posteriores, então o fator de emissão foi calculado pelas equações:

- até 2002: $Fe = 0,0287 \times 0,3444 = 0,009884$;
- 2003 a 2004: $Fe = 0,0140 \times 0,2080 = 0,002912$;
- após 2004: $Fe = 0,0035 \times 0,4476 = 0,001567$;
- então $Fem = 0,009884 + 0,002912 + 0,001567 = 0,014363$.

Assim, o cálculo da emissão pelas motocicletas foi feito pela equação:

$$Em = Fm \times Pm \times Fem \times L$$

onde:

- Fm é o número de motocicletas que circularam na via;
- Pm é o percentual das motocicletas que emitem MP = 0,9352;
- Fem é o fator de emissão das motocicletas (g/km) = 0,014363, e;
- L é o comprimento da via (km).

- Cálculo do fator de emissão dos caminhões e ônibus

A categoria Caminhão se subdivide segundo seu peso e capacidade de carga; enquanto Ônibus são subdivididos segundo seu peso e capacidade de transportar passageiros, podendo ser urbanos ou rodoviários, ou ainda micro-ônibus, cada uma com um fator de emissão próprio (Cetesb, 2022; Inea, 2024). A partir das médias dos fatores de emissão das subcategorias foi definido um fator de emissão para caminhões e outro para ônibus, por período. Depois multiplicou-se o fator de emissão pelo percentual de veículos do período (34,44% até 1999, 20,80% de 2000 a 2009, 34,88% de 2010 a 2019 e 9,88% de 2020 em diante), e por fim, os valores foram somados resultando no fator de emissão da categoria.

Os caminhões fabricados até 1999 emitem 0,66 g/km de MP, 2000 a 2009 emitem 0,126 g/km, 2010 a 2019 emitem 0,01195, e 2020 em diante emitem 0,0114 g/km. Já os ônibus fabricados até 1999 emitem 0,66 g/km de material particulado, 2000 a 2009 emitem 0,1189 g/km, 2010 a 2019 emitem 0,0117 e 2020 em diante emitem 0,0113 g/km (Cetesb, 2022).

Então, o fator de emissão dos Caminhões foi calculado pelas equações:

- até 1999: $Fe = 0,66 \times 0,3444 = 0,227304$;
- 2000 a 2009: $Fe = 0,126 \times 0,2080 = 0,026208$;
- 2010 a 2019: $Fe = 0,01195 \times 0,3488 = 0,004168$;
- 2020 em diante: $Fe = 0,0114 \times 0,0988 = 0,0011263$;
- então $Fec = 0,227304 + 0,026208 + 0,004168 + 0,0011263 = 0,2588063$.

Assim, o cálculo da emissão pelos caminhões foi feito pela equação:

$$Ec = Fc \times Fec \times L$$

onde:

- Fc é o número de caminhões que circularam na via;
- Fec é o fator de emissão dos caminhões (g/km) = 0,2588063, e;
- L é o comprimento da via (km).

O fator de emissão dos Ônibus foi calculado pelas equações:

- até 1999: $Fe = 0,66 \times 0,3444 = 0,227304$;

- 2000 a 2009: $Fe = 0,1189 \times 0,2080 = 0,024731$;
- 2010 a 2019: $Fe = 0,0117 \times 0,3488 = 0,004081$;
- 2020 em diante: $Fe = 0,0113 \times 0,0988 = 0,0011164$;
- então $Feo = 0,227304 + 0,024731 + 0,004081 + 0,0011164 = 0,2572324$.

Assim, o cálculo da emissão pelos ônibus foi feito pela equação:

$$Eo = Fo \times Feo \times L$$

onde:

- Fo é o número de ônibus que circularam na via;
- Feo é o fator de emissão dos ônibus (g/km) = 0,2572324, e;
- L é o comprimento da via (km).

- Cálculo do fator de emissão do desgaste dos pneus

Para o MP emitido por desgaste de pneus, freios e pista (Iema, 2020) os fatores de emissão foram estimados em função da velocidade (V) de percurso dos automóveis (em km/h), segundo as equações:

$$\text{se } V < 40 \text{ então } Fe \text{ MPdesg} = 0,0286983$$

$$\text{se } 40 \leq V \leq 90 \text{ então } Fe \text{ MPdesg} = 0,0391401 - 0,000260981 \times V$$

$$\text{se } V \geq 90 \text{ então } Fe \text{ MPdesg} = 0,01465059$$

Por fim, a emissão da via foi calculada pela soma das emissões das categorias de veículos e do desgaste do pneu de toda a frota circulante:

$$E = Ea + Ecl + Em + Ec + Eo + MPdesg.$$

Posteriormente as emissões das vias foram somadas (MP total), calculando-se as densidades de MP por vias e por habitantes (MP hab), por bairros e Regiões de Planejamento (RP), que são grupos de bairros da cidade do Rio de Janeiro, descritas na Área de Estudo. A escolha por essa escala justifica-se pelo maior equilíbrio quando comparadas as áreas territoriais, número de habitantes e extensão das vias entre as 16 RPs da cidade, pois o recorte territorial dos bairros explicita forte desproporção porque são muito mais extensos na Zona Oeste quando comparados aos demais.

Para análise de dados sociais foram utilizados como indicadores a cor da pele e o valor do rendimento nominal médio mensal dos responsáveis com rendimentos por domicílios particulares permanentes ocupados, divididos por bairros, do último Censo Demográfico (IBGE, 2022). Foram agrupados pelas RPs e especializados para comparação com os resultados da emissão de MP.

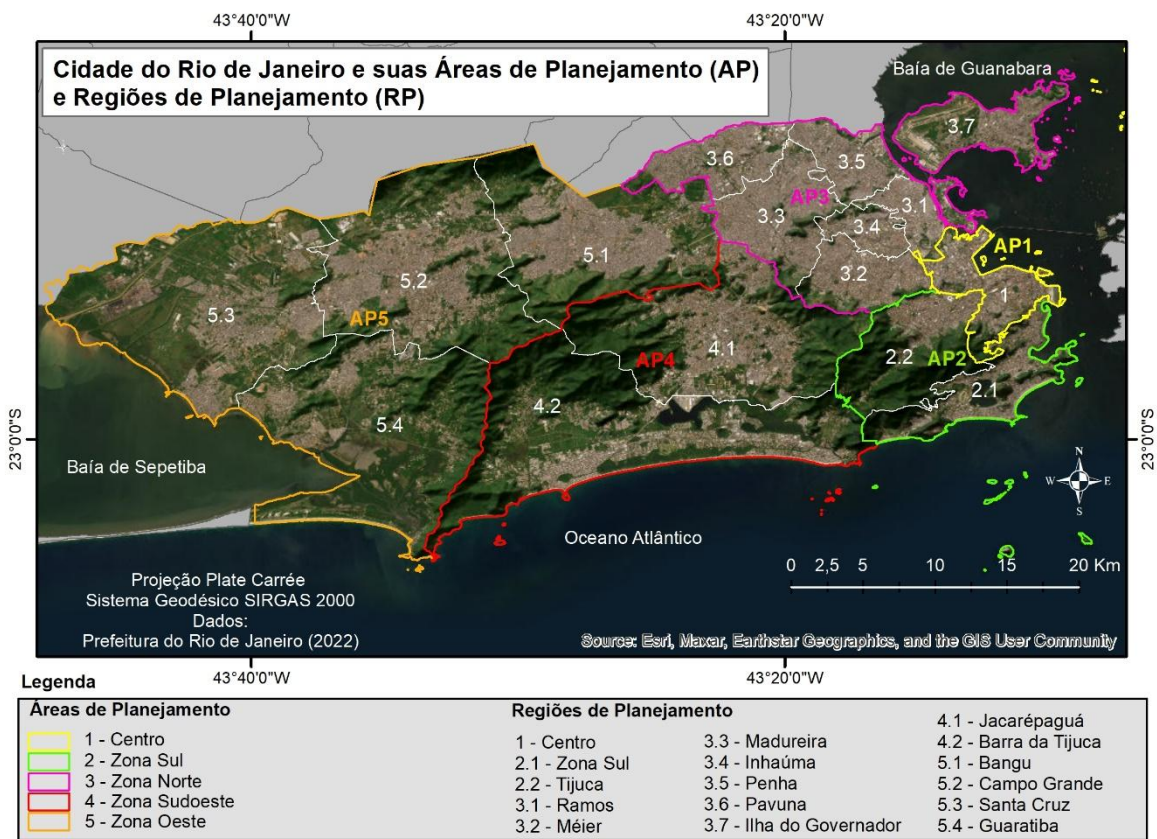
Posteriormente foram realizados testes estatísticos de Pearson (r) e de Spearman (ρ) entre as variáveis de poluição do ar (MP total e MP hab) e os indicadores sociais cor da pele e renda, por bairro e RP.

Os testes de correlação citados são técnicas de regressão que avaliam a força e a direção entre duas variáveis lineares e não lineares, respectivamente. Importante destacar que correlação não implica causalidade, sendo usadas para identificar como as variáveis se movem conjuntamente (Guimarães, 2017). Os coeficientes de correlação variam entre -1 e 1, e quanto mais distante de zero mais forte é a relação. No entanto Pearson (r) e de Spearman (ρ) devem ser interpretados em uma relação com valor -p (p). O resultado de um teste é estatisticamente significativo quando $p < 0,05$, o que indica que há um efeito real na relação entre as variáveis, pois quando $p > 0,05$ tal efeito pode ser interpretado como acaso.

- Área de Estudo

O sítio onde se desenvolveu a cidade do Rio de Janeiro facilitou o desenvolvimento de um conjunto urbano compartimentado, onde se concretizam as estratificações sociais projetadas no território (Abreu, 1987). Os maciços rochosos dividem a cidade em cinco áreas de planejamento com características sociais muito distintas com fortes desigualdades socioespaciais, consequência do histórico desenvolvimento urbano desigual marcado pela segregação espacial (Figura 1).

Figura 1 – Localização da cidade do Rio de Janeiro com suas APs e RPs.



Fonte:

Elaborado pelos autores

A Área de Planejamento 1 (AP1), ou Centro, área histórica que hoje tem baixa densidade de residências, recebendo um grande público flutuante devido às grandes concentrações de atividades comerciais e de serviços. Para norte, as periferias históricas que contam com a zona portuária e as primeiras áreas de favela do país. A partir do Centro, para o sul, pelo litoral ocorreu a ocupação por famílias que tinham condições de se locomover para fora do núcleo urbano, o que era privilégio para poucos (Abreu, 1987).

Assim foi formada a Área de Planejamento 2 (AP2), subdividida em 2.1 Zona Sul e 2.2 Tijuca, que apresenta os melhores padrões de infraestrutura urbana e equipamentos sociais, sendo densamente ocupada. É a mais nobre da cidade, com prédios de luxo e representantes das classes média e alta, mas também com população de baixa renda, devido à ocupação irregular nas encostas, desvalorizadas pelos riscos ambientais associados.

Saindo do Centro, contornando o maciço para a Zona Norte, está a Área de Planejamento 3 (AP3). Subdividida em 3.1 Ramos, 3.2 Méier, 3.3 Madureira, 3.4 Inhaúma, 3.5 Penha, 3.6 Pavuna e 3.7 Ilha do Governador, se desenvolveu a partir da instalação das ferrovias, indutora de ocupação das periferias devido ao baixo custo. Essas áreas foram sendo ocupadas por pessoas de baixa renda e

atividades menos nobres, como indústrias, atraindo cada vez mais moradores (Abreu, 1987). Hoje é a área mais densamente ocupada, conurbando-se aos municípios da periferia imediata da Baixada Fluminense (Souza, 2003).

A Área de Planejamento 4 (AP4), Zona Sudoeste, subdividida em 4.1 Jacarepaguá e 4.2 Barra da Tijuca, manteve-se conservada por muito tempo sem ocupação devido às dificuldades de acesso por sua geografia. Foi ocupada a partir da expansão da Zona Sul, com condomínios residenciais de alto padrão para uma população economicamente emergente.

A Área de Planejamento 5 (AP5), Zona Oeste, subdividida em 5.1 Bangu, 5.2 Campo Grande, 5.3 Santa Cruz e 5.4 Guaratiba, foi a última área a ser urbanizada devido à distância do Centro. Manteve-se agrícola até 1950 quando ocorreu a expansão das atividades industriais junto a constituição de novas favelas em terras invadidas por populações de baixa renda. Hoje é mais uma periferia urbana da capital com baixa densidade populacional que se conecta com a periferia distante da metrópole (Souza, 2003).

Na tabela 1 encontra-se o valor médio do rendimento mensal dos responsáveis pelos domicílios nas RPs da cidade do Rio de Janeiro, o que complementa a descrição do conteúdo social das APs.

Tabela 1 - Valor do rendimento nominal médio mensal dos responsáveis com rendimentos por domicílios particulares permanentes ocupados, na cidade do Rio de Janeiro - 2022.

RP	Regiões de Planejamento	Renda média
1	Centro	R\$ 3.063,25
2.1	Zona Sul	R\$ 10.561,95
2.2	Tijuca	R\$ 6.488,16
3.1	Ramos	R\$ 2.568,82
3.2	Méier	R\$ 3.608,09
3.3	Madureira	R\$ 2.990,59
3.4	Inhaúma	R\$ 2.749,32
3.5	Penha	R\$ 2.595,78
3.6	Pavuna	R\$ 2.015,93
3.7	Ilha do Governador	R\$ 4.183,03
4.1	Jacarepaguá	R\$ 4.031,20
4.2	Barra da Tijuca	R\$ 6.815,63
5.1	Bangu	R\$ 3.218,22
5.2	Campo Grande	R\$ 2.400,66

5.3	Santa Cruz	R\$ 2.017,24
5.4	Guaratiba	R\$ 2.636,91

Fonte: Adaptado de IBGE (2022)

Resultados

A predição das emissões de MP alcançou 42.441 vias ou segmentos de vias. Quase a metade delas (48,1%) emitiu até 100 gramas, enquanto menos de 1% das vias emitiu mais de 1.000 gramas. As maiores emissões foram identificadas em vias expressas como Linha Amarela (6.517 g/km), na RP 3.2 Meier; Linha Vermelha (6.285 g/km), na RP 3.7 Ilha do Governador; em dois segmentos da Avenida das Américas (6.110 e 6.085 g/km), RP 4.2 Barra da Tijuca; Ponte Presidente Costa e Silva, ou Ponte Rio-Niterói (5.764 g/km), RP 1.1 Centro; e nas galerias dos túneis Antônio Rebouças (5.194 g/km) e André Rebouças (5.122 g/km), RP 2.1 Zona Sul.

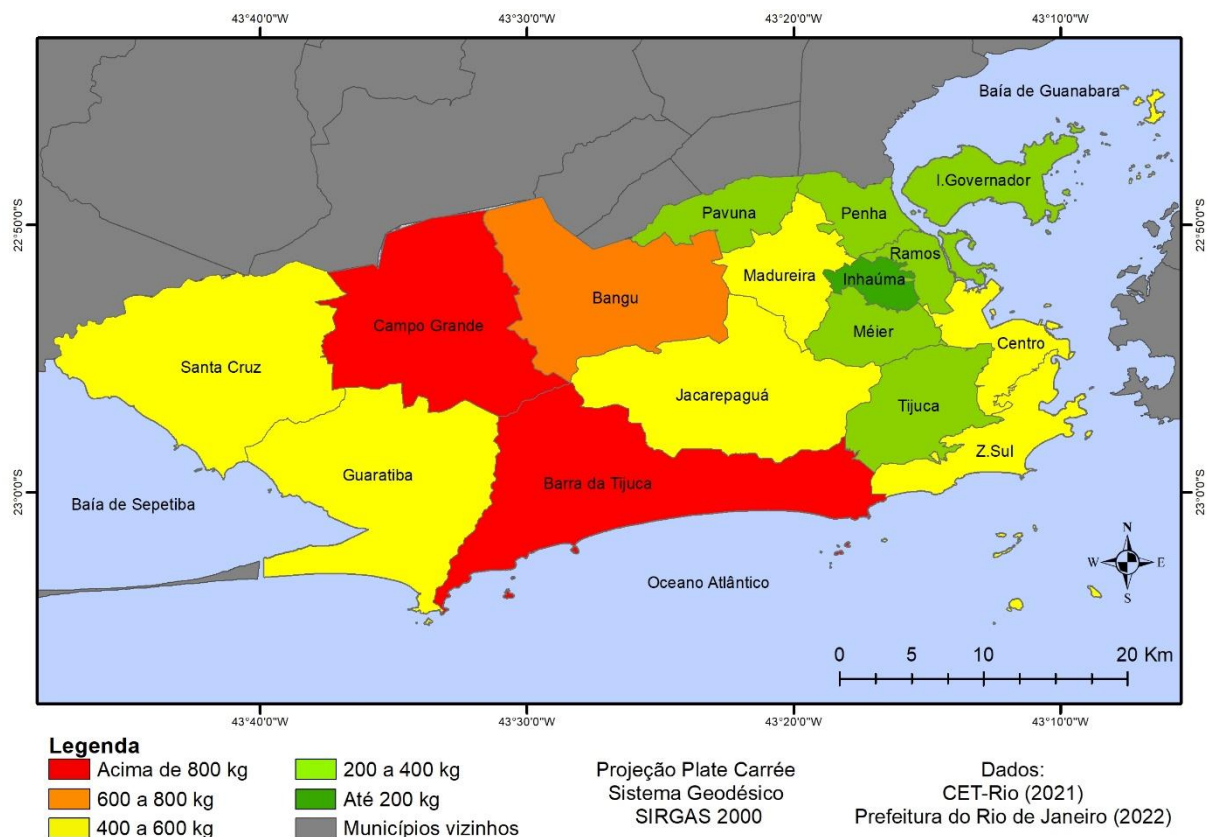
As vias expressas são importantes corredores de transporte rodoviário para deslocamentos na cidade, permitindo a livre circulação em maior velocidade. Além das citadas, também pode-se incluir entre as vias de maior emissão a Avenida Brasil, Autoestrada Lagoa-Barra que direcionam fluxos para o Centro e a Zona Sul, os grandes polos concentradores de emprego na cidade (Rodrigues, 2015). Mais recentemente, sendo legado dos Jogos Olímpicos, Transolímpica, Transoeste e TransCarioca que direcionam fluxos para a Barra da Tijuca.

Pereira (2019) destaca que a Barra da Tijuca ganhou bastante acessibilidade, mas a Zona Sul também com a Linha 4 do Metrô, que conecta essas duas RPs. Tratam-se da antiga e da nova centralidade da cidade do Rio de Janeiro, áreas que concentram atividades e têm maior acessibilidade, convergindo fluxos que sustentam as relações no território (Cosentino, 2016).

As vias que apresentaram menores emissões estão localizadas na RP 4.2 Barra da Tijuca, no bairro Recreio dos Bandeirantes, duas sem nome (4 g/km). A terceira foi a Estrada dos Bandeirantes (5 g/km), RP 4.2 Barra da Tijuca, no bairro Vargem Grande. Assim, a RP 4.2 Barra da Tijuca apresentou os extremos, vias entre as menores e maiores emissões de MP.

Quando somadas as emissões das vias modeladas por RP, Barra da Tijuca e Campo Grande se destacam como as maiores (809 e 802 kg, respectivamente) seguidos por Bangu (624 kg) e Jacarepaguá (584 kg), áreas de planejamento 4 e 5, Zonas Oeste e Sudoeste. Apresentaram menores emissões Inhaúma (167 kg), Tijuca (230 kg), Ramos (231 kg) e Penha (242 kg), áreas de planejamento 2 e 3, Zonas Norte e Sul (Figura 2).

Figura 2 – Material particulado (em quilos) emitido pelo tráfego de veículos nas Regiões de Planejamento da cidade do Rio de Janeiro.



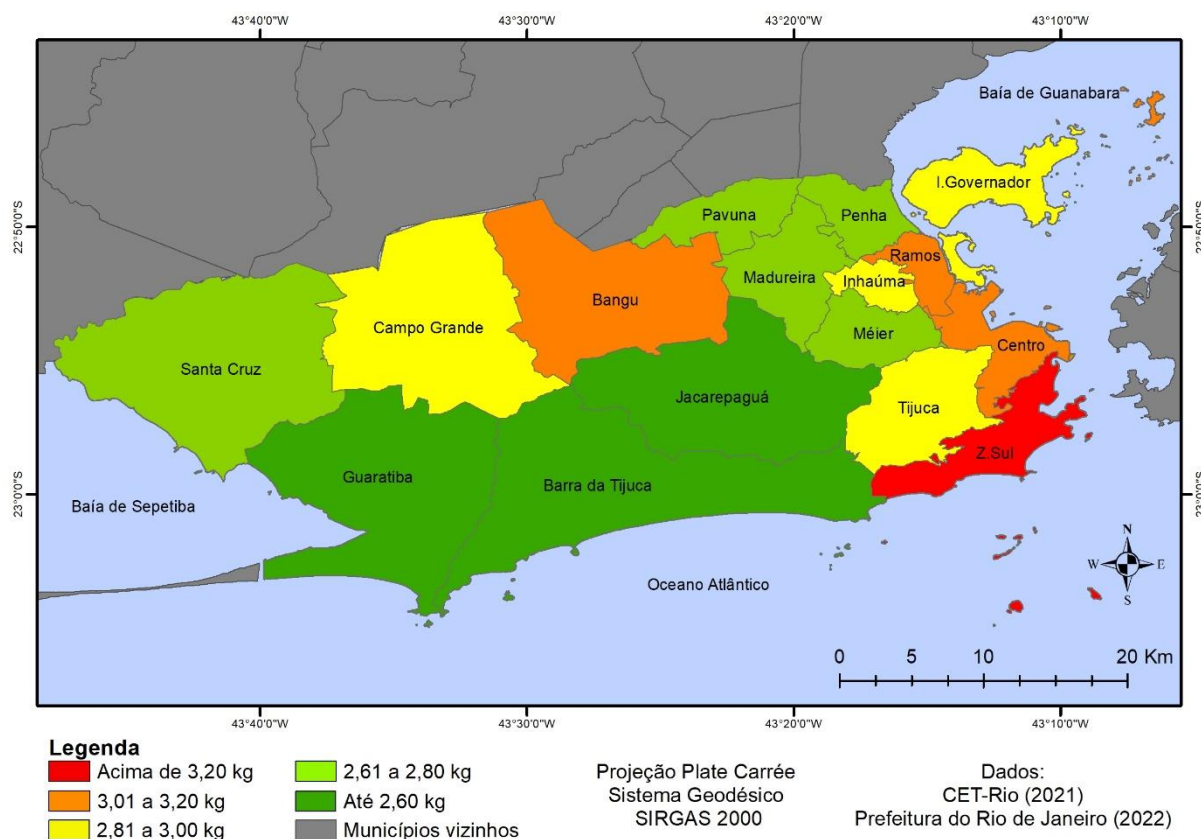
Fonte: Elaborado pelos autores

Na Figura 2 observa-se uma relação direta entre o MP emitido e a dimensão da RP, que refletem o número de vias em quilômetros e o total de veículos circulando por elas. Campo Grande e Barra da Tijuca têm maior emissão, maior área e mais veículos circulando pelas Zonas Oeste (Campo Grande: 244.452.352) e Sudoeste (Barra da Tijuca: 219.215.504). Da mesma forma com menor emissão, menor área e menos veículos circulando pela Zona Norte estão Inhaúma (53.894.675), Ilha do Governador (64.271.061) e Penha (64.456.267). No entanto, busca-se entender outras relações, como a quantidade de MP emitido segundo o número de vias e habitantes para identificar as características dos fluxos e possíveis centralidades.

Para minimizar o efeito da dimensão calculou-se a emissão média das vias em cada RP (em km), o que apresentou um resultado diferente. Zona Sul (3,28 kg/km), Centro (3,17 kg/km), Bangu (3,11 kg/km) e Ramos (3,02 kg/km) com maiores emissões; enquanto Jacarepaguá (2,40 kg/km), Barra da Tijuca (2,45 kg/km) e Guaratiba (2,56 kg/km) com menores (Figura 3). Essas emissões apresentam relação com o total de veículos circulantes por via, pois as maiores densidades de veículos estão na

Zona Sul (1078), Centro (911) e Tijuca (874) e as menores em Guaratiba (590), Ilha do Governador (637) e Barra da Tijuca (665).

Figura 3 – Material particulado (em quilos) emitido proporcionalmente por via (em quilômetro) nas Regiões de Planejamento da cidade do Rio de Janeiro.



Fonte: Elaborado pelos autores

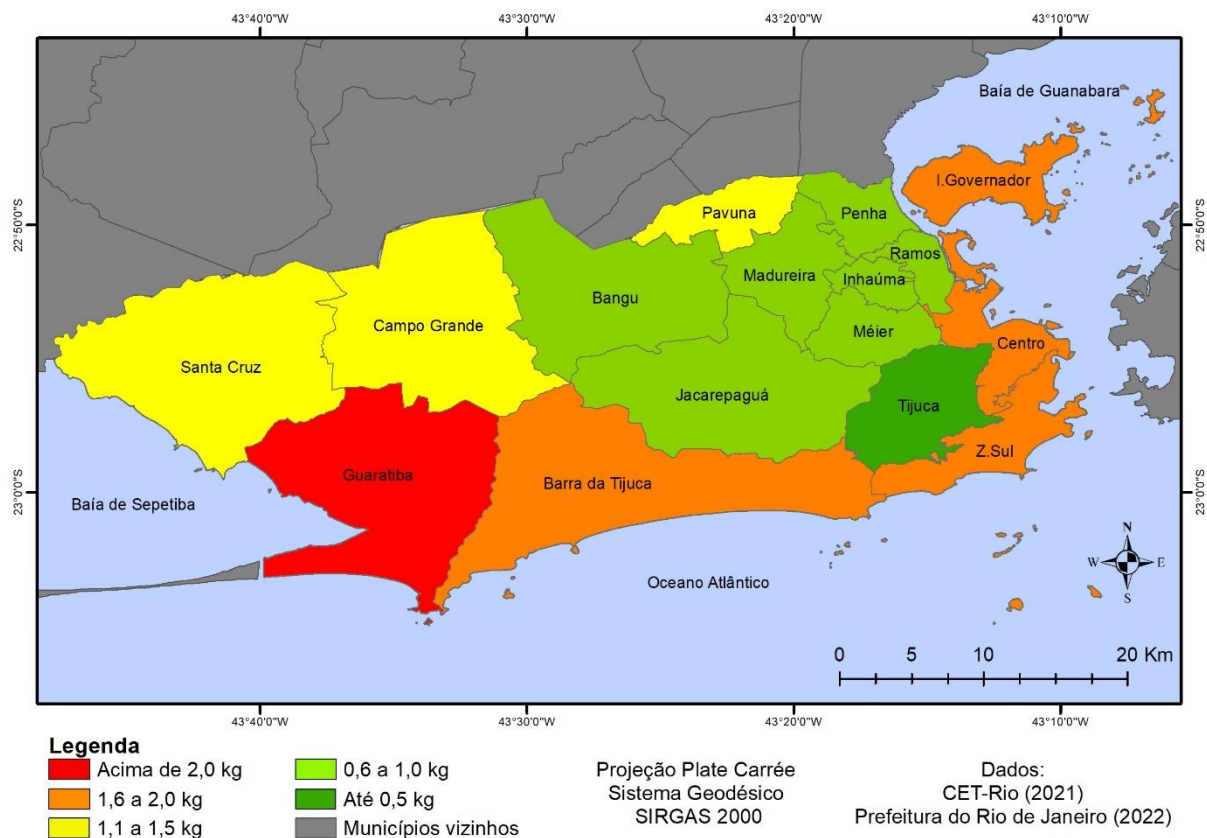
Tais resultados demonstram que as distintas estruturas urbanas presentes na cidade refletem a concentração do fluxo de veículos e emissão de MP à medida que se aproximam da Zona Sul e da área central. São características de um modelo de autoss segregação que se iniciou no final do século XIX, durante a expansão da cidade a partir do Centro, com as classes mais abastadas, e brancas, localizando-se próximas às amenidades naturais. Esse processo teve como consequência a intensa valorização e verticalização da Zona Sul, se estendendo até a Tijuca, enquanto promoveu uma periferação em direção à Zona Norte (Cardoso, 2010), constituindo os subúrbios pardos e negros.

Em um momento posterior houve a intensificação da ocupação da Zona Oeste, especificamente a Barra da Tijuca recebeu um zoneamento ainda mais tardio, a partir da elaboração do plano piloto de Lúcio Costa, em 1969, seguindo uma lógica distinta daquela observada na Zona Sul, embora tenha sido ocupada inicialmente por moradores que saíram de lá. Foram projetados núcleos residenciais

espaçados conectados por avenidas largas, sem sinalização, para que o automóvel pudesse trafegar livremente sem trânsito (Fernandes, 2013). Assim, apesar das vias expressas com grande fluxo de veículos, os núcleos residenciais tornaram-se condomínios horizontais, o que pode explicar essas vias com pouco fluxo de veículos, fazendo com que esta RP apresente menor emissão de MP por via.

Ao calcular o MP produzido em cada RP segundo o total de habitantes, observa-se outro resultado. Guaratiba (2,32 g/hab), Barra da Tijuca (1,92 g/hab), Centro (1,79 g/hab) e Zona Sul (1,75 g/hab) apresentaram as maiores concentrações de MP por morador, enquanto Tijuca (0,40 g/hab), Méier (0,76 g/hab), Jacarepaguá (0,85 g/hab) e Ramos (0,90 g/hab) apresentaram as menores concentrações. Tais resultados têm proximidade com a densidade de veículos circulantes por habitante que é maior na Zona Sul (460), Guaratiba (408) e Barra da Tijuca (400), e menor na Tijuca (123), Méier (203) e Penha (256) (Figura 4).

Figura 4 – Material particulado (em gramas) emitido proporcionalmente por morador nas Regiões de Planejamento da cidade do Rio de Janeiro.



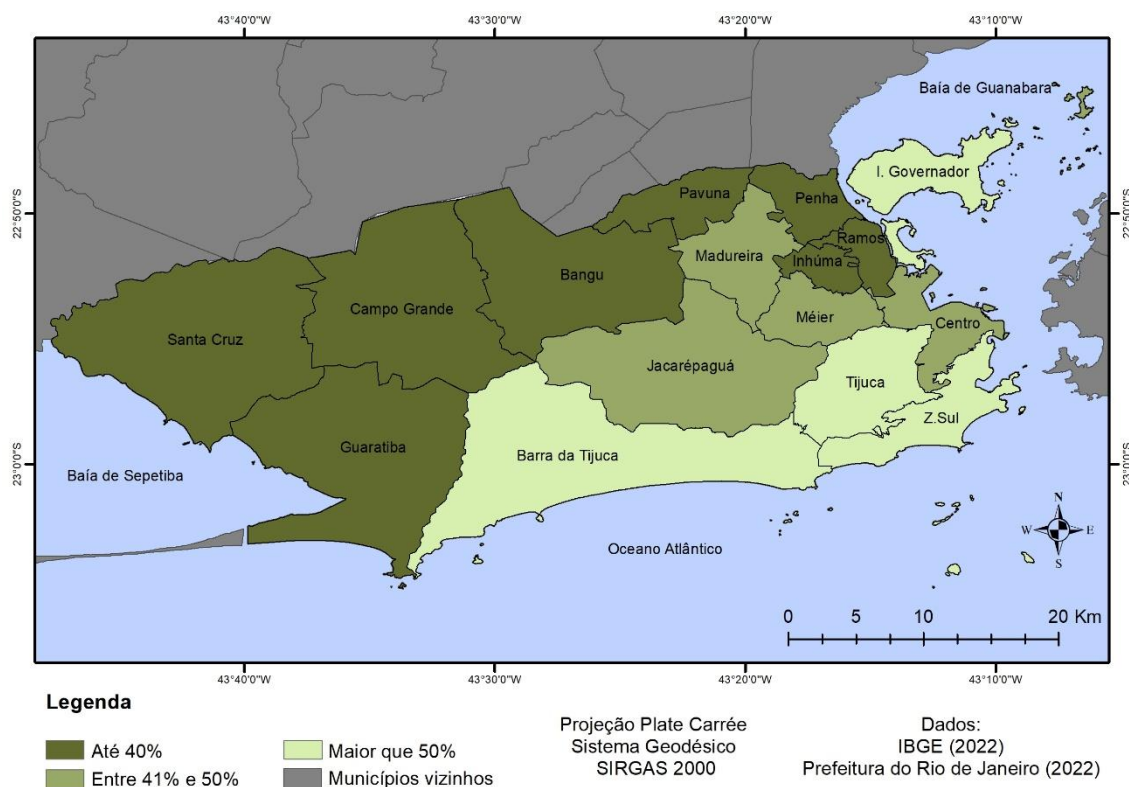
Fonte: Elaborado pelos autores

Guaratiba sofreu grande impacto das obras de mobilidade na cidade. A presença do maciço da Pedra Branca era um obstáculo à circulação que mantinha Guaratiba bastante isolada, guardando ainda

traços rurais. A partir da implantação da Transoeste e abertura do túnel da Grota Funda, inaugurou-se uma nova rota em direção à Barra da Tijuca. Assim, Guaratiba, que tem a menor densidade populacional da cidade, passou a receber um número de veículos que, não é dos mais elevados em termos absolutos, é grande considerando a população residente.

Na sequência apresentaram maiores emissões Barra da Tijuca, Centro, Zona Sul e Ilha do Governador, RPs na orla que coincidem com maioria de população branca na cidade - Zona Sul (70%), Barra da Tijuca (66%) e Ilha do Governador (51%) –, com exceção do Centro (41%), onde pretos e pardos são maioria. Outra exceção é a Tijuca que tem 69% de população branca, mas apresentou baixas emissões (Figura 5).

Figura 5 – População de cor branca nas Regiões de Planejamento da cidade do Rio de Janeiro.



Fonte: Elaborado pelos autores

Estatisticamente, não existe correlação significativa entre cor da pele e poluição pelas RPs, seja MP total ($r: 0,0818$ - $p: 0,7632$; $\rho: -0,0059$ - $p: 0,9828$) ou por habitante ($r: 0,0797$ - $p: 0,7693$; $\rho: -0,0441$ - $p: 0,8711$). Os resultados indicaram associação insignificante, ou seja, o percentual de moradores brancos não interfere no comportamento da poluição da região. Por exemplo, Barra da Tijuca e Tijuca possuem mais de 70% de população branca, entretanto, registraram níveis de poluição muito diferentes, seja total (809 kg x 230 kg) ou por habitante (1,92 g x 0,40 g).

Também não existe correlação significativa entre renda e poluição pelas RPs, seja MP total (r : 0,2080 - p : 0,4395; ρ : 0,1588 - p : 0,5569) ou por habitante (r : 0,1926 - p : 0,4747; ρ : 0,0088 - p : 0,9741). Assim como no teste anterior os resultados indicaram uma associação insignificante. Apesar de Zona Sul e Barra da Tijuca possuírem elevadas rendas (R\$ 10.561,95 e R\$ 8.441,75) e alta poluição total (551 e 809 kg) e por habitante (1,75 e 1,92 g), também foram observados cenários de baixa renda e alta poluição, como Guaratiba (R\$ 1.341,20 e 2,31 g/hab), ou alta renda e baixa poluição, como Tijuca (R\$ 6.223,73; 230 kg e 0,40 g/hab). Assim, ambos os testes realizados para RPs mostram que realidades completamente opostas em um universo de apenas 16 RPs impedem um padrão estatístico.

Ampliar a análise por bairros aumentou a amostra (160), mas a conclusão foi a mesma. Não existe correlação estatística significativa entre cor da pele e poluição por bairros, seja MP total (r : -0,0428 - p : 0,5949; ρ : -0,0984 - p : 0,2200) ou por habitante (r : -0,1542 - p : 0,0538; ρ : 0,0671 - p : 0,4039). Também não existe correlação estatística significativa entre renda e poluição por bairros, seja MP total (r : 0,0787 - p : 0,3273; ρ : 0,0079 - p : 0,9220) ou por habitante (r : -0,0376 - p : 0,6403; ρ : 0,1280 - p : 0,1100). Ambos os coeficientes são muito próximos de zero, o que indica que as variáveis não têm relação. Além disso, com - p muito alto qualquer hipótese de associação é descartada.

A análise por bairro confirma que os perfis étnicos ou renda não servem como fator preditivo para a quantidade de MP emitido. Este resultado era esperado, pois as maiores emissões foram encontradas em vias expressas que atravessam distintos bairros. Algumas dessas vias sequer garantem mobilidade aos moradores dos bairros que atravessam, como a Linha Vermelha que passa pelo bairro Maré, tangenciando o conjunto de favelas, onde foi construído um muro que impede a mobilidade dessa população mais necessitada (Haesbaert, 2023).

- Limitações do estudo

Os resultados refletiram a base de dados utilizada no modelo ML. As estações da CET-Rio estão distribuídas principalmente em vias expressas e cruzamentos de intenso tráfego, mas pouco presentes em vias internas de bairros, de menor hierarquia viária. A indisponibilidade desses dados pode resultar em estimativas imprecisas em bairros de baixa densidade populacional e viária.

Do ponto de vista temporal, o modelo ML foi construído com dados de janeiro de 2021, período de recesso escolar, impactado pela pandemia da Covid-19, o que pode não refletir os padrões típicos e sazonais de tráfego da cidade do Rio de Janeiro. Embora o desempenho do modelo tenha sido satisfatório para o volume horário e velocidade média, a aplicação do modelo em outros períodos pode introduzir incertezas adicionais. A generalização do modelo em cenários temporais distintos daqueles utilizados no treinamento permanece, portanto, como uma questão em aberto.

Em relação às categorias de veículos e emissões, o estudo considerou aquelas predominantes em 2021. Contudo, a crescente inserção de veículos elétricos no mercado brasileiro não foi contemplada. Outra limitação considerável diz respeito à validação das estimativas de MP, pois foram realizadas medições *in situ* para comparações, o que representaria uma etapa importante para verificar a acurácia das estimativas produzidas em nível de segmento viário

Por fim, a escala de análise adotada, RPs e bairros, embora adequada para identificar padrões gerais de distribuição das emissões e para correlação com indicadores socioeconômicos, pode ofuscar variações intraurbanas de menor escala. A incorporação de variáveis adicionais ao modelo ML, como a estrutura da rede viária, a proximidade ao centro de negócios e a acessibilidade ao transporte público coletivo, poderia aprimorar o poder preditivo e oferecer uma compreensão mais refinada dos determinantes espaciais das emissões de MP nas ruas do Rio de Janeiro.

Considerações Finais

Na preparação para os Jogos Olímpicos, o Rio de Janeiro preparou uma infraestrutura de transporte que reincidiu no modal rodoviário, deixando como legado corredores de fluxo rápido conectando a cidade à Barra da Tijuca. Assim, sobre as emissões de MP, a Barra da Tijuca se destacou entre as maiores emissões quando analisadas as vias - a Avenida das Américas -, e a RP com emissão total e proporcional por habitante. Tais resultados refletem a convergência dos fluxos de veículos, consequência do desenvolvimento de uma nova centralidade na cidade do Rio de Janeiro, eixo de expansão imobiliária contínuo à Zona Sul.

Escolhida como espaço preferencial para acolher os Jogos Olímpicos, a partir da articulação com grandes interesses privados que intensificaram projetos imobiliários de médio e alto padrão, na Barra da Tijuca se replica um modelo espacialmente elitista de concentração comercial e de serviços, já presente na Zona Sul da cidade. Estas áreas, com maior acessibilidade aos empregos, ocupadas majoritariamente por pessoas brancas, convergem os fluxos de veículos, e, consequentemente, mais poluição. Não se trata, então, de um caso de promoção de justiça ambiental, mas a reprodução de um modelo de injustiça social em que pretos e pardos ocupam as periferias e compõem os fluxos de trabalhadores que se deslocam para as centralidades.

Apesar de caracterizar a constituição da centralidade na Barra da Tijuca não há correlação estatística significativa entre cor da pele e poluição do ar nem entre renda e poluição do ar, seja por RP ou por bairros, que demonstre que o Rio de Janeiro segue o padrão brasileiro encontrado por Requia & Castelhana (2023). Assim, este estudo sugere que as disparidades na exposição a poluição do ar podem ser mais complexas do que se pensava, sendo necessário continuar pesquisando como as

características socioeconômicas se associam à emissão de poluentes atmosféricos na escala das cidades.

Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pelo apoio financeiro prestado. Processo nº E-26/010.002222/2019, edital 14/2019 - Apoio a grupos Emergentes de Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro.

À CET-Rio pela cessão dos dados.

Referências

ABREU, M.A. Evolução urbana do Rio de Janeiro. Iplanrio, Rio de Janeiro, 1987.

ANENBERG, S. C.; HOROWITZ, L. W.; TONG, D. Q. et al. An estimate of the global burden of anthropogenic ozone and fine particulate matter on premature human mortality using atmospheric modeling. *Environ Health Perspect.*, Durham, 118, 9, p. 1189–1195, 2010. Disponível em: <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/full/10.1289/ehp.0901220>. Acessado em: 24/05/2024.

ANJOS, M.; MEIER, F. Zooming into Berlin: tracking street-scale CO₂ emissions based on high-resolution traffic modeling using machine learning. *Frontiers in Environmental Science*, London, 12, p. 1-15, 2025. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/environmental-science/articles/10.3389/fenvs.2024.1461656/full>. Acessado em: 05/03/2025.

BELL, M. et al. Evidence on vulnerability and susceptibility to health risks associated with short-term exposure to particulate matter: a systematic review and meta-analysis. *American journal of epidemiology*, Oxford, 178, 6, p. 865-876, 2013. Disponível em: <https://academic.oup.com/aje/article-abstract/178/6/865/109718>. Acesso em: 04/06/2024.

BORGES, R. R. et al. Modelagem da dispersão atmosférica de material particulado (MP₁₀) e os impactos da utilização de veículos de carga movidos a GNL em São Paulo. *Revista do*

Departamento de Geografia, São Paulo, 41, p. 1-13, 2021. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/185828>. Acesso em: 04/06/2024.

BOWE, B. et al. The 2016 global and national burden of diabetes mellitus attributable to PM_{2.5} air pollution. *Lancet Planet. Health*, London, 2, p. 301–312, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542519618301402>. Acessado em: 08/09/2024.

BRASIL, MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Primeiro inventário nacional de emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários: relatório final. 2011. Disponível em: https://energiaambiente.org.br/wp-content/uploads/2011/01/projeto_iema.pdf. Acessado em: 08/09/2024.

BREIMAN, L. Random Forests. *Mach Learn*. Springer, London, vol. 45, p.5–32, 2001. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1023/a:1010933404324>. Acessado em: 10/06/2024.

BURNETT, R. et al. An Integrated Risk Function for Estimating the Global Burden of Disease Attributable to Ambient Fine Particulate Matter Exposure. *Environ. Health Perspect.*, Durham, 122, p. 397–403, 2014. Disponível em: <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/full/10.1289/ehp.1307049>. Acessado em: 08/09/2024.

CANCELLI, D. M.; DIAS, N. L. BRevê: uma metodologia objetiva de cálculo de emissões para a frota brasileira de veículos. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, Edição Especial, São Paulo, p. 13-20, 2014. Doi: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522014019010000284>. Acessado em: 05/05/2024.

CARDOSO, E. D. Estrutura urbana e representações: a invenção da Zona Sul e a construção de um novo processo de segregação espacial no Rio de Janeiro nas primeiras décadas do século XX. *GeoTextos*, Salvador, vol.6, p.73-88, 2010.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (SP). Emissões veiculares no estado de São Paulo 2021. São Paulo: CETESB, 2022. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/relatorios-e-publicacoes/>. Acessado em 21/05/2024

COOPER, N.; GREEN, D.; KNIBBS, L.D. Inequalities in exposure to the air pollutants PM_{2.5} and NO₂ in Australia. *Environmental Research Letters*, Bristol, v. 14, n. 11, p. 1-16, 2019.

Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ab486a/meta>. Acessado em 21/06/2024.

COSENTINO, R. Olimpíadas da Barra da Tijuca 2016: A construção de uma nova centralidade no Rio de Janeiro. In: VAINER, Carlos; BROUDEHOUX, A.; SÁNCHEZ, F.; OLIVEIRA, F. L. (orgs.). Os megaeventos e a cidade: perspectivas críticas. Rio de Janeiro: Letra Capital, 2016.

DATA RIO. Portal de dados abertos da Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.data.rio/>. Acessado em 21/06/2024.

DI, Q. et al. Air pollution and mortality in the Medicare population. N. Engl. J. Med., Massachusetts, 376, p. 2513–2522, 2017. Disponível em: <https://www.nejm.org/doi/full/10.1056/nejmoa1702747>. Acessado em 21/06/2024.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Avaliação do comportamento dos usuários de veículos flex fuel no consumo de combustíveis no Brasil. 2013. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-250/topico-296/EPE-DPG-SDB-001-2013-r0%5B1%5D.pdf>. Acesso em: 08/09/2024.

FECHT, D. et al. Associations between air pollution and socio-economic characteristics, ethnicity and age profile of neighbourhoods in England and the Netherlands. Environ. Pollut. Amsterdã, 198, p. 201–210, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.12.014>. Acesso em: 08/09/2024.

FERNANDES, T. Barra da Tijuca (RJ), Plano Piloto, Legislação e Realidade: o processo de urbanização, ocupação e suas consequências ambientais. Revista VITAS, Niterói, vol 6, p. 1-13, 2013.

FIGLIOZZI, M. A. Lifecycle modeling and assessment of unmanned aerial vehicles (Drones) CO₂ e emissions. Transportation Research Part D: Transport and Environment, Amsterdã, v. 57, p. 251–261, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.09.011>. Acessado em: 08/04/2024.

GOLDEMBERG, J.; NIGRO, F. e COELHO, S. Bioenergia no estado de São Paulo: situação atual, perspectivas, barreiras e propostas. São Paulo: IMESP, 2008. Disponível em: https://cmsdespoluir.cnt.org.br/Documents/PDFs/livro_bioenergia.pdf. Acessado em: 08/04/2024.

GUIMARÃES, P.R.B. Análise de Correlação e medidas de associação. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, p. 1-26, 2017.

HAESBAERT, R. I-mobilidades globais e dispositivos de contenção territorial na metrópole. Rio de Janeiro: Consequência, 2023. 216 p.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censos Demográficos. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/downloads-estatisticas.html>. Acessado em: 19/11/2024.

IEMA Inventário de emissões atmosféricas. transporte rodoviário de passageiros no município de São Paulo; IEMA: Sao Paulo, Brasil, 2020.

INEA - Instituto Estadual do Ambiente (RJ). Inventário de emissões veiculares: ano-base 2022 / Instituto Estadual do Ambiente. Rio de Janeiro, 2024. 124 p. Disponível em: https://www.inea.rj.gov.br/wp-content/uploads/2024/06/Invent%C3%A1rio-de-Emiss%C3%B5es-Veiculares-Ano-Base-2022-final_ok.pdf. Acesso em: 15/09/2024.

INEA - Instituto Estadual do Ambiente (RJ). Panorama da qualidade do ar no Rio de Janeiro: avanços e desafios. Instituto Estadual do Ambiente. Rio de Janeiro, 2025. 81 p. Disponível em: <https://www.inea.rj.gov.br/wp-content/uploads/2025/09/PANORAMA-DA-QUALIDADE-DO-AR-NO-RIO-DE-JANEIRO-AVANCOS-E-DESAFIOS-1.pdf>. Acesso em: 15/06/2026.

JBAILY, A. et al. Air pollution exposure disparities across US population and income groups. Nature, London, v. 601, n. 7892, p. 228-233, 2022. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41586-021-04190-y>. Acesso em: 10/06/2024.

KUHN, M., WICKHAM, H., & HVITFELDT, E. Recipes: Preprocessing and Feature Engineering Steps for Modeling. 2024. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=recipes>. Acesso em: 10/06/2024

LANE, H. M. et al. Historical redlining is associated with present-day air pollution disparities in US cities. Environmental science & technology letters, Washington, v. 9, n. 4, p. 345-350, 2022. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acs.estlett.1c01012>. Acesso em: 10/06/2024.

- LIU, J. et al. Disparities in air pollution exposure in the United States by race/ethnicity and income, 1990–2010. *Environ. Health Perspect.*, Durham, v. 129, n. 12, p. 127005, 2021. Disponível em: <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/full/10.1289/EHP8584>. Acesso em: 10/06/2024.
- LURIE, K. et al. PM 2.5 in a megacity of Asia (Karachi): Source apportionment and health effects. *Atmospheric Environment, Amsterdã*, [S. l.], v. 202, p. 223–233, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.01.008>. Acessado em: 15/06/2024.
- MASCARENHAS, G. Rio de Janeiro 2016: a cidade em movimento. *Revista USP*, São Paulo, n. 108, p. 49-56, 2016. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9036.v0i108p49-56>. Acessado em: 19/06/2024.
- OPENSTREETMAP.http://wiki.openstreetmap.org/wiki/About_OpenStreetMap. 2022.
- PEREIRA, R.H. et al. Distributional effects of transport policies on inequalities in access to opportunities in Rio de Janeiro. *J. Transp. Land Use, Minnesota*, 12, 1, p. 741–764, 2019. <https://doi.org/10.5198/jtlu.2019.1523>. Acesso em: 01 dez 2022.
- PORTO, M.F.S. Complexidade, processos de vulnerabilização e justiça ambiental: um ensaio de epistemologia política. *Revista crítica de ciências sociais, Coimbra*, n. 93, p. 31-58, 2011. Disponível em: <https://journals.openedition.org/rccs/133>. Acessado em: 15/06/2026.
- REQUIA, W. J.; CASTELHANO, F. J. Economic and racial disparities of the weather impact on air quality in Brazil. *Scientific Reports, London*, v. 13, n. 1, p. 63-74, 2023. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-023-33478-4>. Acessado em: 15/06/2024.
- RODRIGUES, J. M. Condições de mobilidade urbana e organização social do território. In: RIBEIRO, L.C.Q. Rio de Janeiro: transformações na ordem urbana. *Letra Capital/Observatório das Metrópoles: Rio de Janeiro*, 2015.
- SOUZA M. L. ABC do Desenvolvimento Urbano. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 222 p., 2003.
- WANG, Y. et al. Long-term exposure to PM2.5 and mortality among older adults in the southeastern US. *Epidemiology, California*, 28, p. 207-214, 2017. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5285321/>. Acessado em: 15/06/2024.
- WEST, J. et al. “What We Breathe Impacts Our Health: improving Understanding of the Link between Air Pollution and Health”. *Environ. Sci. Technol.*, Washinton, 50, p. 4895–4904, 2016.

Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acs.est.5b03827>. Acessado em: 15/06/2024.

YUE, H., HE, C., HUANG, Q. et al. Stronger policy required to substantially reduce deaths from PM2.5 pollution in China. Nat Commun, Berlim, 11, 1462, p. 1-10, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15319-4>. Acessado em: 15/06/2024.

Declaração de contribuição dos autores

Heitor Soares de Farias: Responsável pelo desenvolvimento do texto, da segunda parte da metodologia (Cálculo da emissão do material particulado), geração dos resultados e da versão final.

Max Anjos: Responsável pelo desenvolvimento da primeira parte da metodologia (Cálculo do tráfego de veículos) e tratamento dos dados, discussão dos resultados e da versão final.

Declaração de conflito de interesse

Os autores declaram que não há conflito de interesse.

Declaração de disponibilidade de dados da pesquisa

Todo o conjunto de dados de apoio aos resultados deste estudo foi publicado no próprio artigo.

Declaração de uso de IA

Não houve utilização de ferramentas de Inteligência Artificial.

Este preprint foi submetido sob as seguintes condições:

- Os autores declaram que os necessários Termos de Consentimento Livre e Esclarecido de participantes ou pacientes na pesquisa foram obtidos e estão descritos no manuscrito, quando aplicável.
- Os autores declaram que a elaboração do manuscrito seguiu as normas éticas de comunicação científica.
- Os autores declaram que estão cientes que são os únicos responsáveis pelo conteúdo do preprint e que o depósito no SciELO Preprints não significa nenhum compromisso de parte do SciELO, exceto sua preservação e disseminação.
- Os autores declaram que os dados, aplicativos e outros conteúdos subjacentes ao manuscrito estão referenciados.
- O manuscrito depositado está no formato PDF.
- Os autores declaram que a pesquisa que deu origem ao manuscrito seguiu as boas práticas éticas e que as necessárias aprovações de comitês de ética de pesquisa, quando aplicável, estão descritas no manuscrito.
- Os autores declaram que uma vez que um manuscrito é postado no servidor SciELO Preprints, o mesmo só poderá ser retirado mediante pedido à Secretaria Editorial do SciELO Preprints, que afixará um aviso de retratação no seu lugar.
- Os autores concordam que o manuscrito aprovado será disponibilizado sob licença [Creative Commons CC-BY](#).
- O autor submissor declara que as contribuições de todos os autores e declaração de conflito de interesses estão incluídas de maneira explícita e em seções específicas do manuscrito.
- Os autores declaram que o manuscrito não foi depositado e/ou disponibilizado previamente em outro servidor de preprints ou publicado em um periódico.
- Caso o manuscrito esteja em processo de avaliação ou sendo preparado para publicação mas ainda não publicado por um periódico, os autores declaram que receberam autorização do periódico para realizar este depósito.
- O autor submissor declara que todos os autores do manuscrito concordam com a submissão ao SciELO Preprints.