



Material Particulado Fino: a Legislação Brasileira à Luz das Recomendações da Organização Mundial da Saúde

Fine Particulate Matter: Brazilian Legislation in the Light of the World Health Organization Guidelines

Graciela Arbilla,^{a,*} João R. B. A. Rodrigues,^a Cleyton M. da Silva^{a,b}

^a Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Química, Departamento de Físico-Química, Ilha do Fundão, CEP 21941-909, Rio de Janeiro-RJ, Brasil

^b Universidade Veiga de Almeida, Campus Tijuca, CEP 20271-020, Rio de Janeiro-RJ, Brasil

*E-mail: gracielaiq@gmail.com

Recebido em: 20 de Dezembro de 2021

Aceito em: 16 de Março de 2022

Publicado online: 6 de Abril de 2022

As recently acknowledged by the World Health Organization (WHO), there is strong evidence that air pollution affects human health at even lower concentrations than previously understood. Exposure to fine particulate matter is related to ischemic heart disease and stroke, to chronic pulmonary disease and has impact on child health and survival. The most recent Brazilian legislation, published in 2018, determined that the environmental agencies of each State and the Federal District should elaborate a plan to control pollution emissions and assess air quality according to the National Air Quality Standards (NAQS). Three years later, fine particulate matter is only monitored by automatic monitoring stations in São Paulo State and in one station in Espírito Santo and Rio de Janeiro. Results obtained by the mobile station and fixed stations operated by the Municipal Department of the Environment in Rio de Janeiro are presented and discussed. Considering Brazilian NAQS, air quality indexes are in general “Good”, but the value of $15 \mu\text{g m}^{-3}$, recommended by WHO in 2021, is exceeded in approximately 50% of days in several areas. The main emissions sources in the city of Rio de Janeiro and the Metropolitan Area are also presented. More investments are required to ensure people’s right to healthy lives and promote well-being for all at all ages, to reduce the economic effects of air pollution and to make Brazilian cities safe and sustainable following the 2030 Agenda for Sustainable Development.

Keywords: Good health; fine particulate matter; air quality management; sustainable development goals.

1. Introdução

Os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) evidenciam que a saúde, a educação, o meio ambiente e a redução da pobreza são pilares fundamentais para o desenvolvimento da humanidade em harmonia com a natureza.¹ Cada vez fica mais claro que as grandes ameaças ao futuro da humanidade, especialmente as mudanças climáticas, a fome e as epidemias, só poderão ser superadas através da consolidação desses pilares do desenvolvimento sustentável.

Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS),² a poluição do ar ambiente e do ar interno, principalmente no ambiente doméstico, ocasionou a morte prematura de mais de 7 milhões de pessoas em 2016. O problema é especialmente grave nos países de baixa e média renda (PBMRS), levando recentemente à revisão das recomendações da OMS, *Global Air Quality Guidelines* (AQGs), publicadas em 2005.³ A necessidade de uma revisão dos valores recomendados, à luz das novas evidências dos danos causados pela poluição do ar à saúde da população, já tinha sido colocada em evidência num documento publicado pela OMS em 2015,⁴ e nas declarações da Dra. Maria Neira, Diretora do Departamento de Saúde Pública da OMS: “*poucos riscos têm, atualmente, um impacto tão alto para a saúde global quanto a poluição do ar e as evidências mostram a necessidade de uma ação consertada para limpar o ar que respiramos*”.⁵

Em setembro de 2021, após mais de 15 anos foram publicadas as novas recomendações nas quais a principal mudança é a redução nos níveis máximos de material particulado.⁶ Para o MP_{10} (material particulado com diâmetro até $10 \mu\text{m}$), os valores foram reduzidos de 20 e $50 \mu\text{g m}^{-3}$ para 15 e $45 \mu\text{g m}^{-3}$, para a média anual e de 24 horas, respectivamente. Já para o $\text{MP}_{2.5}$ (material particulado com diâmetro até $2,5 \mu\text{m}$), os valores foram reduzidos de 10 e $25 \mu\text{g m}^{-3}$ para 5 e $15 \mu\text{g m}^{-3}$, para a média anual e de 24 horas, respectivamente. Essa atualização das recomendações é uma clara resposta da OMS à real e contínua ameaça da poluição à saúde das pessoas em geral e das crianças em particular.⁶

Os primeiros Padrões Nacionais de Qualidade do Ar no Brasil foram estabelecidos pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), do Ministério do Meio Ambiente, em 1990.⁷ Na época esses padrões representaram um grande avanço, mas ficaram desatualizados, especialmente após a publicação das recomendações da OMS em 2005. Só em novembro de 2018, o CONAMA publicou a Resolução número 491, com novos valores.⁸ A nova legislação (Resolução 491) está baseada nas AQGs de 2005 e estabelece 3 valores intermediários e um valor final (coincidente com o valor proposto pela OMS em 2005).³ O primeiro valor intermediário (PI-1) entrou em vigor imediatamente, mas não foram estabelecidos prazos para os outros valores entrarem em vigor. Os valores recomendados pela OMS em 2005 e as Resoluções 03 (1990) e 491 (2018) do CONAMA foram discutidos detalhadamente por Siciliano *et al.*,⁹ para todos os poluentes contemplados na nova Resolução (MP₁₀, MP_{2,5}, O₃, NO₂, SO₂ e CO) e não serão abordados novamente neste estudo.

O foco deste trabalho é a legislação referente ao material particulado, MP₁₀ e MP_{2,5}. Conforme a Resolução 491/2018,⁸ os valores vigentes (PI-1) para as médias anuais de MP₁₀ e MP_{2,5} são 40 e 20 µg m⁻³, respectivamente. As médias vigentes (PI-1) de 24 horas para MP₁₀ e MP_{2,5} são 120 e 60 µg m⁻³, respectivamente. Obviamente, esses valores são muito altos em comparação com as AQGs de 2005 e ainda maiores em comparação com as recomendações da OMS em 2021 (Quadro 1).^{3,6}

Para o cálculo do Índice de Qualidade do Ar (IQA) são considerados os valores de 24 horas, sendo qualidade do ar boa para MP₁₀ e MP_{2,5} valores até 50 e 25 µg m⁻³, respectivamente.¹⁰ Mais uma vez, esses valores são maiores que os valores propostos recentemente pela OMS (45 e 15 µg m⁻³, respectivamente). Essa defasagem da legislação e as evidências, cada vez maiores, dos efeitos da poluição, especialmente das concentrações de MP_{2,5} na saúde, indicam a necessidade urgente de maior monitoramento nas cidades brasileiras e o estabelecimento de planos de gerenciamento e melhoria da qualidade do ar.¹¹

A Resolução 491/2018 estabeleceu que é responsabilidade dos governos estaduais e do Distrito Federal o monitoramento da qualidade do ar e a elaboração de um plano de controle das emissões atmosféricas em até três anos após a aprovação da mesma. O plano deverá indicar a abrangência e

localização das regiões a serem priorizadas, a identificação das principais fontes de poluição e as diretrizes e ações, com respectivos objetivos, metas e prazos de implementação.⁸ A elaboração de um plano de gerenciamento da qualidade do ar é imprescindível para garantir a saúde e bem-estar da população, mas requer um esforço de monitoramento e planejamento por parte de todos os estados.

Recentemente, o Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA) lançou a plataforma de qualidade do ar compilando dados disponibilizados pelas agências ambientais.¹² Apesar de ser uma instituição privada sem fins lucrativos, o IEMA vem cumprindo um papel importante para a melhoria ambiental por meio da geração e sistematização de conhecimento técnico e científico e divulgando dados que, na verdade, deveriam ser disponibilizados para a população pelo poder público. Segundo a plataforma, apenas dez estados (Ceará, Pernambuco, Bahia, Goiás, Minas Gerais, Espírito Santo, Rio de Janeiro, São Paulo, Paraná e Rio Grande do Sul) e o Distrito Federal têm alguma estação de monitoramento da qualidade do ar.¹³

Uma análise sobre os dados da plataforma, mostra que a situação é crítica no que se refere ao monitoramento automático do MP_{2,5} que é o poluente de maior importância, junto ao ozônio, no que se refere à saúde da população. No ano de 2020, no estado de São Paulo existiam 31 estações automáticas (12 delas na capital do estado) e os dados são disponibilizados através da página da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB).¹⁴ Já no Espírito Santo e no Rio de Janeiro, no mesmo ano, foram disponibilizados dados representativos apenas para uma estação de monitoramento automática em atividade em cada um dos estados: uma na cidade de Vitória, estação Enseada do Suá (Instituto Estadual do Meio Ambiente do Espírito Santo, IEMA-ES),¹⁵ e outra na cidade do Rio de Janeiro (Irajá), esta última operada pela Secretaria Municipal do Meio Ambiente (SMAC).^{16,17} Os dados de ambas estações são disponibilizados nas páginas do IEMA-ES e da SMAC.

Os objetivos principais deste artigo são: a) apresentar um panorama geral do monitoramento de MP_{2,5} na cidade do Rio de Janeiro assim como as principais características geográficas e fontes de emissão da cidade; b) apresentar e discutir os dados disponíveis sobre concentrações de material particulado MP_{2,5} na cidade do Rio de Janeiro.

Quadro 1. Concentrações máximas de MP_{2,5} e MP₁₀ (em µg m⁻³) recomendadas pela OMS em 2005 e 2021 e valores estabelecidos pelas Resoluções CONAMA de 1990 e 2019.^{3,6,7,8}

Poluente (µg m ⁻³)	AQGs OMS (2005) ³	AQGs OMS (2021) ⁶	CONAMA 03 (1990) ⁷	PI-1, CONAMA 491 (2021) ⁸
MP _{2,5} (média anual)	10	5	não estabelecido	20
MP _{2,5} (média 24 horas)	25	15	não estabelecido	60
MP ₁₀ (média anual)	20	15	50	40
MP ₁₀ (média 24 horas)	50	45	150	120

2. Experimental

2.1. A cidade do Rio de Janeiro

A Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) foi descrita detalhadamente por Silva *et al.*¹⁸ Com uma população de mais de 13 milhões de habitantes, que representa aproximadamente 75% da população de estado, e uma superfície de 7.535 km², está composta por 22 municípios, dos quais a cidade do Rio de Janeiro é o mais populoso.

Mais de 35% da RMRJ está coberta por vegetação da Mata Atlântica, tanto de floresta remanescente como de floresta secundária, sendo as principais áreas verdes a Floresta da Tijuca e as áreas dos maciços da Pedra Branca e Gericinó-Mendanha. O maciço da Tijuca (1.022 m) e a Floresta da Tijuca dividem a cidade do Rio de Janeiro nas zonas norte e sul. Já as áreas montanhosas da Pedra Branca (1.024 m) e Gericinó-Mendanha (964 m), são fatores limitantes da dispersão do ar, especialmente na região oeste. O oceano Atlântico e a Baía de Guanabara têm, por sua vez, um importante papel na regulação do regime de ventos.¹¹ Na Figura 1 são mostradas as principais áreas naturais e com forte ação antrópica na RMRJ e na cidade do Rio de Janeiro.

As regiões norte e oeste abrigam as principais atividades industriais da RMRJ. Na região norte as principais indústrias incluem atividades relacionadas à química, petroquímica, alimentos, produtos farmacêuticos e produção de energia.

Na região oeste se destacam os setores metalúrgicos e outras atividades como mineração, agricultura e pecuária. Essas atividades, detalhadas na Tabela 1, influenciam a qualidade do ar da cidade do Rio de Janeiro, que recebe o aporte de massas de ar de toda a RMRJ.

As principais vias de trânsito, de acordo com o levantamento realizado pela SMAC, estão ilustradas na Figura 2.²⁸ Segundo o inventário de fontes veiculares da RMRJ (ano base 2013) publicado pelo Instituto Estadual do Ambiente (INEA),²⁹ estimativas de *bottom-up*, ou seja o somatório das emissões em linha (vias inventariadas na RMRJ), mostram que as principais emissões de material particulado são devidas aos veículos movidos a diesel (97%), sendo os principais emissores os caminhões de médio e grande porte (60%) e os ônibus urbanos (aproximadamente 13%). O município de Rio de Janeiro contribui com aproximadamente a metade das emissões de escapamento (sendo 23 e 21% do total da RMRJ correspondentes às zonas norte e oeste da cidade do Rio de Janeiro). O material particulado devido à ressuspensão de poeira apresentou maior contribuição na zona norte da cidade do Rio de Janeiro (33%) e o centro da cidade contribui com apenas 3%. Já as estimativas *top-down* mostram que a ressuspensão de poeira causada pela movimentação de veículos corresponde a aproximadamente 72% das emissões de material particulado.²⁹

Note-se que as emissões inventariadas são emissões primárias de material particulado total. A formação de MP_{2,5} (secundário) depende dos outros poluentes liberados

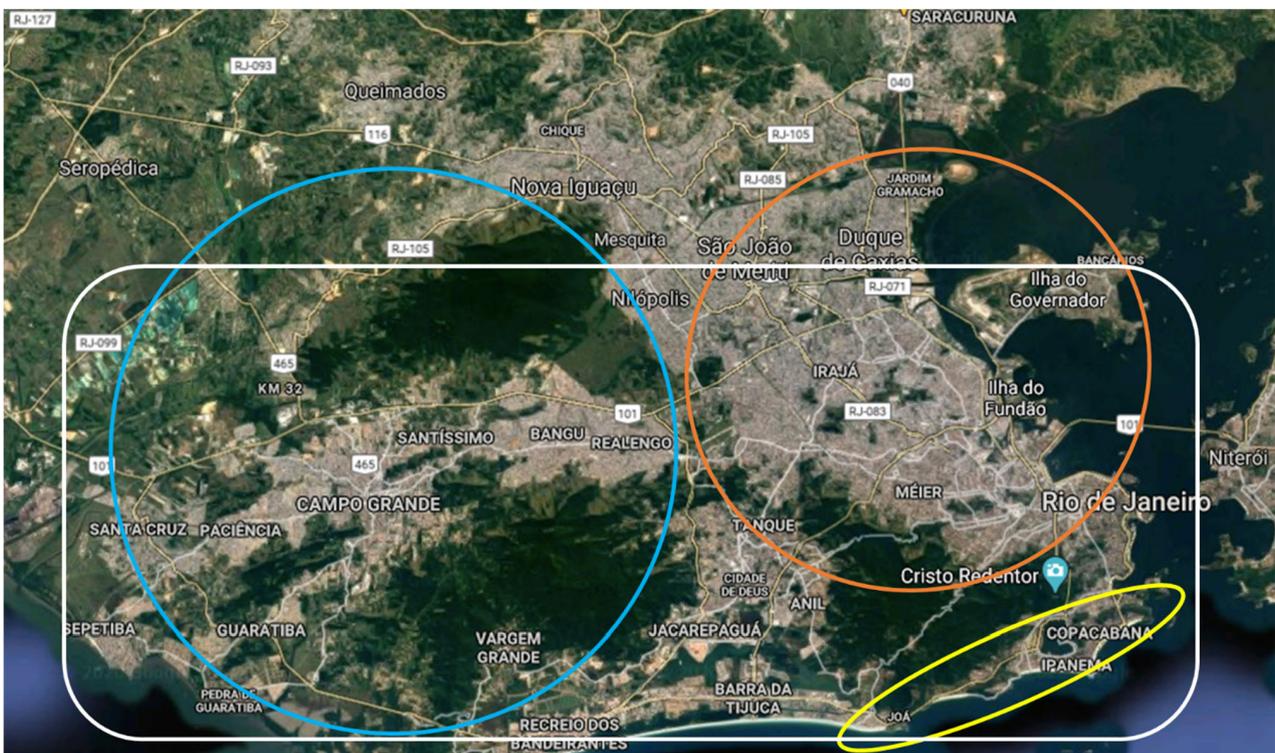


Figura 1. Mapa da Região Metropolitana do Rio de Janeiro indicando a área aproximada da cidade do Rio de Janeiro (retângulo branco), os maciços montanhosos e as zonas sul (amarelo), norte (laranja), oeste (azul). As cidades de Niterói e São Gonçalo estão situadas ao leste da Baía de Guanabara.

Fonte: Adaptado de Google Maps¹⁹

Tabela 1. Fontes de emissões estacionárias na Região Metropolitana do Rio de Janeiro.²⁰⁻²⁷

Região Norte
<ul style="list-style-type: none"> • Indústrias químicas e farmacêuticas (cidades de Duque de Caxias, Belford Roxo e São João de Meriti); • Mais de 150 indústrias químicas e petroquímicas no polo petroquímico da cidade de Duque de Caxias; • Refinaria de Duque de Caxias: responsável por 80% da produção de lubrificantes e pelo maior processamento de gás natural do Brasil. Iniciou as operações em 1961 impulsionando o nascimento de um forte polo industrial na região. Está ligada aos terminais de Ilha d'água, Ilha Redonda, Angra dos Reis, Cabiúnas, Campos Elíseos e Volta Redonda e as refinarias de Gabriel Passos (MG) e Henrique Lage (SP); • Porto do Rio de Janeiro (cidade do Rio de Janeiro), entre seus principais ativos se destacam: terminal de grãos com capacidade prevista para 918.000 t ano⁻¹; capacidade instalada para processar até 1,8 milhão de contêineres por ano (TEU) e operar até 326.000 veículos ano⁻¹ no terminal <i>roll-on roll-off</i>; principal base de apoio marítimo <i>offshore</i> do país; operações de ferro gusa; atendimento a outros granéis e cargas especializadas; • Planta termoelétrica com capacidade instalada de 1.058 MW.
Região Oeste
<ul style="list-style-type: none"> • Companhia Siderúrgica: maior siderúrgica de América Latina, produz 200 tipos de aços especiais. A planta de Santa Cruz (Rio de Janeiro) possui capacidade para produzir 5 milhões de toneladas de placas de aço por ano que atendem às indústrias automotivas, de óleo e gás, de maquinário, linha branca, naval e de energia. Possui porto próprio na Baía de Sepetiba para embarque das exportações; • Indústrias metalúrgicas (alumínio, aço); • Indústrias de alimentos (Campo Grande, Rio de Janeiro); • Indústrias químicas (região entre os maciços da Tijuca e Pedra Branca, Taquara e entorno); • Casa da Moeda do Brasil. Produção de moedas, cédulas de papel, medalhas, moedas comemorativas, distintivos, comendas, selos, certidões, selos de rastreamento e passaportes. Localizada em Santa Cruz (Rio de Janeiro); • Porto de Itaguaí (Baía de Sepetiba). É um dos principais polos de exportação de minérios do país. Pela sua capacidade de movimentação de contêineres, granéis sólidos e líquidos, área de apoio intermodal e <i>Truck Center</i>, tem condições de assumir o papel de principal porto escoador de cargas do Mercosul; • Agricultura e pecuária; • Atividades de mineração e pedreiras (principalmente para atividades de construção).
Região Leste e Nordeste (cidades de Niterói, Itaboraí e São Gonçalo)
<ul style="list-style-type: none"> • Indústrias químicas e farmacêuticas (cidade de São Gonçalo); • Porto de Niterói (Niterói, Baía de Guanabara): o complexo portuário possui um área de terminais de 27.060 m², suas principais atividades são movimentação de cargas, reparo naval e apoio logístico da atividade <i>offshore</i>. Possui dois terminais principais, com um total de três berços e 16 cabeças de amarração. Além do Porto de Niterói existem seis terminais privados localizados próximos ao porto que operam com carga <i>offshore</i> e oferecem concorrência ao porto público.

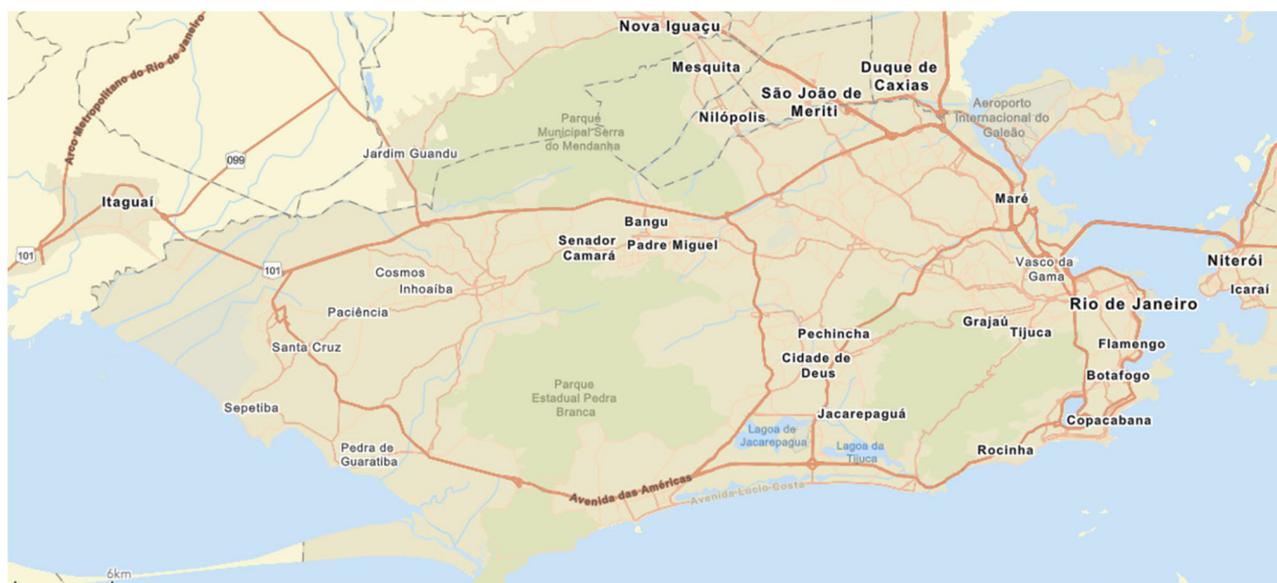


Figura 2. Principais vias de trânsito na RMRJ que contribuem para a emissão de poluentes e afetam a cidade do Rio de Janeiro. Fonte: Data Rio²⁸

(principalmente compostos orgânicos voláteis e óxidos de nitrogênio). Segundo estimativas *bottom-up*, do inventário de emissões, aproximadamente 80% dos hidrocarbonetos não-metânicos são provenientes de automóveis (78%) e veículos comerciais leves, enquanto aproximadamente 65% das emissões de óxidos de nitrogênio são devidas a veículos pesados (ônibus e caminhões).²⁹

2.2. Monitoramento da qualidade do ar

No estado de Rio de Janeiro, as primeiras medidas de concentração de poluentes foram realizadas em 1967 pelo INEA. De acordo com a mais recente informação publicada na *homepage* desse órgão estadual,³⁰ a rede estadual conta com 58 estações automáticas distribuídas na Região Metropolitana, do Médio Paraíba e do Norte Fluminense e a rede semiautomática dispõe de 116 estações que monitoram, de seis em seis dias, material particulado. O último relatório de qualidade do ar disponível é relativo ao ano de 2018 e o último inventário de emissões corresponde ao ano de 2013 e se restringe à região Metropolitana.^{29,31} Como atualmente o boletim de qualidade do ar não é publicado, a população não consegue saber (em tempo real) quais poluentes estão sendo medidos e quais os níveis e o índice de qualidade do ar. Os últimos dados, relativos a 2020, estão disponíveis através da plataforma do IEMA.¹²

Na cidade do Rio de Janeiro, a SMAC mantém um programa de monitoramento desde 2012, através de oito estações fixas e uma estação móvel.¹⁶ O boletim de qualidade do ar é publicado diariamente, porém atualmente apenas a estação localizada no bairro de Irajá mede MP_{2,5} e a estação móvel (cujos dados foram utilizados em parte deste trabalho) não está mais em funcionamento.¹⁷

2.3. Descrição dos locais de monitoramento

No período 2010-2018 a estação móvel da SMAC foi instalada em 15 locais da cidade do Rio de Janeiro (sendo que no Porto do Rio foi instalada em dois momentos e no Cajú em três momentos, em locais muito próximos, totalizando 18 estudos). Os locais e o tempo de permanência em cada um deles foram determinados pela SMAC atendendo à programação do órgão ambiental, conforme mostrado na Tabela 2 e na Figura 3.

Foram também coletados dados obtidos pela estação automática de monitoramento da SMAC, localizada na Praça Nossa Senhora da Apresentação no bairro de Irajá, na zona norte da cidade. Esse bairro já foi descrito detalhadamente em trabalhos anteriores.^{11,33} Com uma população de aproximadamente 461.000 habitantes é um bairro residencial, com muitos serviços e comércio, cortado pela Avenida Brasil e a Avenida Pastor Martin Luther King

Tabela 2. Locais percorridos pela estação móvel da SMAC no período 2010-2018^{16,18,26,32}

Local e Período	Características
<p>Centro (Rua Sete de Setembro, S/N) 11/05/2010 a 21/07/2010</p>	<p>O bairro faz parte da zona central da cidade do Rio de Janeiro e possui área territorial de 5,4247 km². Apesar de haver prédios residenciais, o bairro é, sobretudo, comercial e turístico, com destaque a bens culturais tombados e monumentos históricos. Sua paisagem é dominada por elevados edifícios de diferentes escritórios e empresas, com grande fluxo populacional ao longo dos dias úteis. Pela proximidade com a Baía de Guanabara e disposição das edificações, os ventos são predominantemente das direções leste e nordeste. O aeroporto Santos Dumont e o Porto do Rio de Janeiro estão a aproximadamente 3 km da estação de monitoramento. As ruas próximas ao local de monitoramento são: Avenida Rio Branco, Rua Gonçalves Dias, Rua do Ouvidor e Rua da Assembleia.</p>
<p>Vicente de Carvalho (Avenida Vicente de Carvalho, S/N, Supermercado Atacadão) 22/07/2010 a 17/12/2010</p>	<p>Situado na zona norte do município do Rio de Janeiro, possui área territorial de 1,8357 km² e tem ocupação predominantemente residencial, sem grandes empreendimentos comerciais (exceto por dois hipermercados). Pertence à Região Administrativa de Irajá, e faz limite com o bairro do mesmo nome. Ruas próximas ao local de monitoramento: Avenida Vicente de Carvalho, Avenida Pastor Martin Luther King Júnior, Rua Tambés e Rua Angai.</p>
<p>Campo Grande (Praça Maina, nº 01 - Escola Municipal Che Guevara) 27/12/2010 a 15/02/2011</p>	<p>Bairro da zona oeste do município do Rio de Janeiro com área territorial de 104,451 km². Possui um polo comercial importante para a região, podendo o acesso à região ser feito pela Avenida Brasil ou por trem. A movimentação de veículos no bairro é intensa, com destaque para a Estrada do Mendanha, próxima do ponto de monitoramento e considerada a via principal. A área de estudo situa-se entre as serras de Paciência e Inhoaíba. É constituída por terrenos de pequenas elevações em todos os quadrantes, que variam de altitudes entre 15 e 200 m. O ponto de monitoramento sofreu influência do estacionamento situado a 45 m a noroeste, além do tráfego da Estrada do Mendanha, distante cerca de 110 m. Um ponto final de ônibus localizado a menos de 30 m da estação afetava a qualidade do ar local. Ainda próximo ao local, estão localizados o principal shopping do bairro à época, o <i>West Shopping</i>, um ponto final de ônibus e uma estação de tratamento de esgoto.</p>
<p>Bangu (Creche da Rua Mongólia S/N) 13/04/2011 a 15/06/2011</p>	<p>Bairro da zona oeste da cidade. O local de monitoramento está situado em uma área residencial, próxima (aproximadamente 200 m) da Rua Rio da Prata, que se constitui na via de maior tráfego das redondezas, como movimento de ônibus, veículos de carga e de passeio. Apresenta várias lojas, supermercados, restaurantes, e outros estabelecimentos que tornam o fluxo de pessoas relativamente intenso em dias úteis. Outra via com volume de tráfego superior e onde há mais estabelecimentos comerciais, além do maior shopping do bairro (<i>Bangu Shopping</i>), a Rua da Feira, encontra-se a 500 m de distância do local estudado.</p>

Tabela 2. Locais percorridos pela estação móvel da SMAC no período 2010-2018^{16,18,26,32} (cont.)

Local e Período	Características
<p>Pedra de Guaratiba (Rua Senador Antônio de Paula, S/N - Escola Municipal Myrthes Wenzel) <i>13/04/2011 a 15/06/2011</i></p>	Bairro da zona oeste do município do Rio de Janeiro com área territorial de 3,6369 km ² . Faz limites com o bairro de Guaratiba (a norte, leste e oeste), sendo banhado pelo Oceano Atlântico ao sul. Pela proximidade à baía de Sepetiba, o comportamento das condições atmosféricas registradas na estação, principalmente os ventos, sofrem influência deste corpo d'água, sobretudo pelo efeito da brisa. Como não há construções próximas que possam exercer qualquer tipo de influência sobre a circulação dos ventos, as direções predominantes dos ventos na região são de nordeste/sudeste, com boa condição para a dispersão de poluentes.
<p>Gávea (Estacionamento ao lado da Pontifícia Universidade Católica (PUC) - Av. Padre Leonel França, S/N) <i>16/06/2011 a 31/10/2011</i></p>	Bairro da zona sul do município do Rio de Janeiro com área territorial de 2,5796 km ² . Localizado entre a encosta do morro Dois Irmãos e a Lagoa Rodrigo de Freitas, é uma área residencial com numerosos atrativos culturais, escolas e alguns centros comerciais. A estação móvel foi instalada no estacionamento da Pontifícia Universidade Católica, com grande fluxo de pessoas e veículos.
<p>Maracanã (Universidade do Estado do Rio de Janeiro – Rua São Francisco Xavier, 524) <i>21/11/2011 a 28/03/2012</i></p>	Bairro da zona norte do município do Rio de Janeiro com área territorial de 1,6673 km ² . É uma área residencial, com muito trânsito, diversos colégios e empresas. É cortado pela Avenida Maracanã, uma das principais vias da região que dá acesso à Tijuca. O local de monitoramento, no estacionamento da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, é próximo ao Instituto Federal do Rio de Janeiro e ao Complexo Esportivo Maracanã, com grande fluxo de pessoas e veículos particulares e linhas de ônibus e uma estação de metrô.
<p>Del Castilho (Estrada Ademar Bebiano, 339 - Policlínica Rodolpho Rocco) <i>20/06/2012 a 27/09/2012</i></p>	Bairro localizado na zona norte do município do Rio de Janeiro, possui área territorial de 3,4853 km ² . É um área residencial com alguns estabelecimentos comerciais e proximidade da Linha Amarela e da Avenida Brasil, importantes vias de trânsito. A maior parte da atividade comercial do bairro está concentrada no Shopping Nova América (a aproximadamente 600 m do local de estudo e do lado da estação de metrô).
<p>Porto do Rio (Gamboa) <i>27/09/2012 a 18/02/2013</i> <i>28/09/2013 a 13/01/2014</i></p>	A área do Cais de Gamboa se estende desde a Rodoviária Novo Rio até o Museu de Arte do rio, ao longo de 3,1 km. Possui 60.000 m ² de área coberta com 18 armazéns e pátios de área descoberta de aproximadamente 16.000 m ² . Nessa área funciona a Estação Marítima de Passageiros do Porto e o Terminal de Produtos Siderúrgicos de Gamboa.
<p>Caju <i>21/02/2013 a 28/08/2013</i> <i>18/09/2014 a 17/04/2015</i> <i>21/08/2015 a 13/01/2016</i></p>	O bairro está localizado na zona portuária do Rio de Janeiro. A estação de monitoramento foi instalada em três locais próximos: inicialmente no Posto de Saúde Centro Municipal de Saúde Fernando Braga Lopes, posteriormente no Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias (INPH) e finalmente na Vila Olímpica Mané Garrincha. Além do INPH, o bairro é sede de várias instalações portuárias, diversas indústrias e dois centros militares. Abriga também a estação de tratamento de esgotos Alegria e um estacionamento de ônibus próximos aos locais de estudo.
<p>Parque Madureira (Rua Soares Caldeira, 115) <i>14/01/2014 a 12/08/2014</i></p>	Bairro na zona norte do município do Rio de Janeiro com extensão territorial de 3,7876 km ² . O parque, construído em 2012, faz parte de um projeto de revitalização do bairro e outros adjacentes, com áreas de lazer e prática de esportes destinada à população local. O bairro possui numerosas linhas de ônibus, ramal de trem, centros comerciais e diversas opções de lazer, inclusive duas escolas de samba. É um importante polo comercial do município, atraindo pessoas de diferentes bairros em busca de variados produtos e serviços.
<p>Porto Maravilha (Rua Visconde de Itaboraí, S/N) <i>17/02/2016 a 20/05/2016</i></p>	O local de estudo situado no Porto do Rio (chamado também de Porto Maravilha, após as obras de revitalização) é próximo ao Boulevard Olímpico e ao Museu do Amanhã. É uma área com grande circulação de pessoas, atividades administrativas, comerciais e culturais.
<p>Cantagalo (Praça Eugênio Jardim, S/N) <i>02/08/2016 a 26/11/2016</i></p>	No bairro de Copacabana, zona sul da cidade, a Praça Eugênio Jardim abriga a estação de metrô Cantagalo e um ponto de ônibus. É uma região residencial e comercial com trânsito intenso e grande fluxo de pessoas. Localizada a aproximadamente 200 m da praia e do Morro dos Cabritos (375 m de altitude), a área concentra alta densidade populacional e edifícios de oito pavimentos em média, sem afastamento lateral, que constituem um <i>canyon</i> urbano com dificuldade para a dispersão de poluentes.
<p>Bangu (Guarda Municipal) <i>01/12/2016 a 10/09/2017</i></p>	O local de monitoramento na área central do bairro de Bangu (zona oeste) está localizado a aproximadamente 1 km da Avenida Brasil, via com intenso trânsito de veículos leves e pesados, e 1 km do Bangu Shopping. É uma área residencial.
<p>Recreio dos Bandeirantes (Rua Desembargador Paulo Alonso, 23 - CIEP Margaret Mee) <i>11/10/2017 a 12/03/2018</i></p>	Localizado na zona oeste, a oeste da Barra da Tijuca e a leste de Guaratiba, do município com área territorial de 30,6556 km ² . Ao sul está banhado pelo Oceano Atlântico e ao norte está rodeado pelos bairros de Vargem Grande, Vargem Pequena e Camorim, próximos ao Maciço da Pedra Branca. O trânsito de veículos leves é intenso, especialmente na Avenida das Américas.

Jr. A Praça Nossa Senhora da Apresentação é rodeada por duas ruas com intenso fluxo de veículos leves e de ônibus, próxima a dois hipermercados e do Cemitério de Irajá. Do lado da estação de monitoramento há um ponto de táxi

e entrada de caminhões para um dos hipermercados. Na Figura 4 é indicado o local de monitoramento, assim como outros locais, estudados por outros autores, que serão mencionados ao longo do texto.

3. Resultados e Discussão

3.1. Concentrações de $MP_{2,5}$ determinadas pela estação móvel

Os valores médios de 24 horas foram representados, na forma de *boxplots*, como mostrado na Figura 5. As faixas de índice de qualidade do ar (IQA) correspondem a: bom (0 a $25 \mu\text{g m}^{-3}$), moderado (> 25 a $50 \mu\text{g m}^{-3}$), ruim (> 50 a $75 \mu\text{g m}^{-3}$), muito ruim (> 75 a $125 \mu\text{g m}^{-3}$) e péssimo ($> 125 \mu\text{g m}^{-3}$). O valor de $15 \mu\text{g m}^{-3}$ estabelecido pela OMS em 2021 também é indicado.⁶

Observa-se que a maior mediana foi obtida no Centro, correspondendo a um IQA moderado. Del Castilho e Caju-Posto de Saúde também apresentam um número próximo a 50% de dados acima do limite de $25 \mu\text{g m}^{-3}$. Vicente de Carvalho, Del Castilho, Caju-Posto de Saúde, Parque Madureira, Caju-INPH, Caju-Vila Olímpica e Bangu-Guarda Municipal apresentaram valores *outliers* correspondentes a IQA ruim ou muito ruim, o que indica alguns dias com níveis de $MP_{2,5} > 50 \mu\text{g m}^{-3}$. Quando o valor recomendado pela OMS é considerado, mais da metade dos dias supera a média de 24 horas de $15 \mu\text{g m}^{-3}$. Considerando que, segundo as novas recomendações, esse valor não pode ser superado mais do que 3 a 4 vezes no ano,⁶ os resultados mostrados na Figura 5, indicam que nos locais considerados as condições do ar ambiente são inadequadas e incompatíveis com a saúde da população.

Segundo a classificação do IQA no Brasil, considera-se que na faixa de IQA moderado, os grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias) poderão apresentar sintomas como tosse seca, cansaço, ardor nos olhos, nariz e garganta e que só acima desses níveis os efeitos à saúde serão mais severos. Porém, novas evidências

acumuladas mostram que partículas finas e ultrafinas têm impactos em concentrações muito baixas e, que na verdade, não foi identificado um valor abaixo do qual não existem riscos para a saúde. Assim, a OMS recomenda que sejam realizados esforços no sentido de diminuir as emissões e atingir os menores valores possíveis.³⁸

3.2. Concentrações de $MP_{2,5}$ determinadas pela estação fixa de Irajá

A mediana de todos os valores determinados, pela estação automática fixa operada pela SMAC, no período estudado (janeiro de 2020 a outubro de 2021) foi $15 \mu\text{g m}^{-3}$, indicando que a metade dos dados se encontram acima do valor recomendado pela OMS em 2021.⁶ Na Figura 6 são mostrados, na forma de *boxplot*, os valores para o ano de 2020 (janeiro-dezembro) e para o ano de 2021 (janeiro-outubro), sendo observadas distribuições semelhantes com uma mediana ligeiramente superior em 2021.

Na Figura 7 são apresentados os valores para cada mês do período considerado. Os meses de maio e setembro de 2020 e setembro de 2021 foram excluídos por terem apenas 32, 43 e 57% dos dados, respectivamente. Em ambos os anos, os valores foram claramente superiores no período seco, principalmente nos meses de junho a agosto (com chuvas totais de 90 e 78 mm em 2020 e 2021, respectivamente). No ano de 2021, outubro foi muito chuvoso (108 mm em comparação com 52 mm em 2020), levando a menores concentrações de material particulado. De uma forma geral, observa-se que no período de maio a agosto (com menores chuvas), as medianas determinadas para cada mês foram superiores a $15 \mu\text{g m}^{-3}$. Pode ser observado, também, que o período de restrições na mobilidade nos primeiros meses da pandemia de COVID (março e abril de 2020) não apresentou uma diminuição apreciável nas concentrações

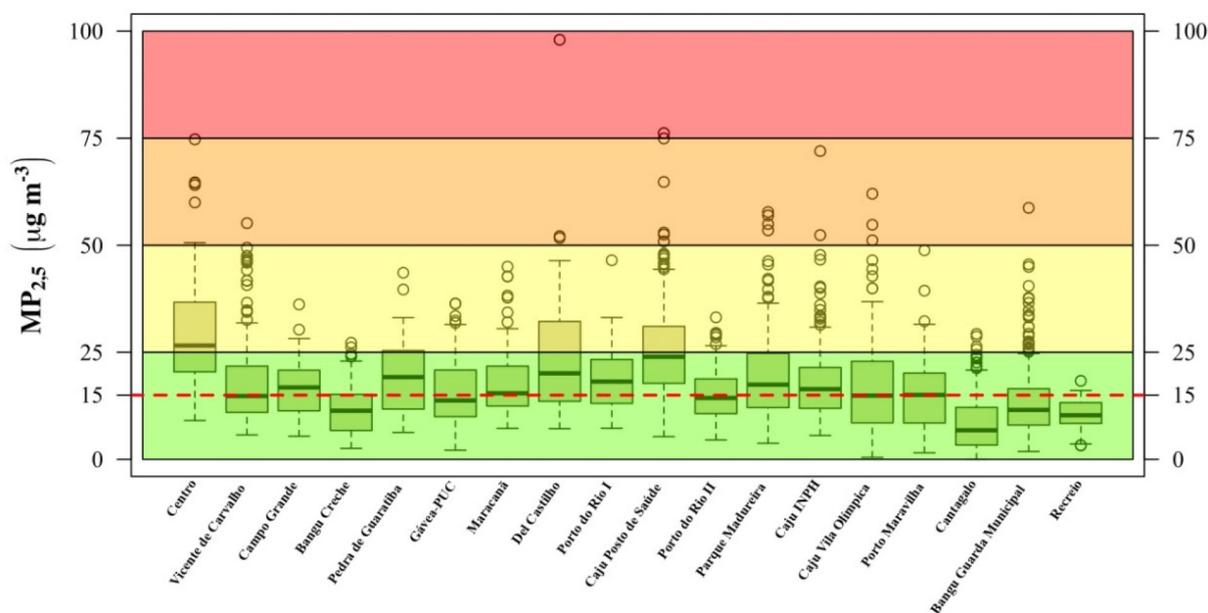


Figura 5. *Boxplot* das médias (24 horas) de material particulado fino ($MP_{2,5}$) determinadas nos diferentes locais da campanha móvel (2010-2018)

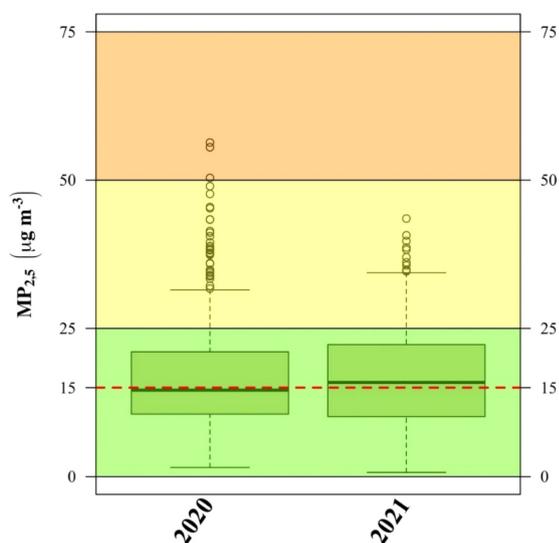


Figura 6. Boxplot das médias (24 horas) de material particulado fino ($MP_{2,5}$) determinadas pela estação de monitoramento automática de Irajá (dados cedidos pela SMAC) nos anos de 2020 (janeiro-dezembro) e 2021 (janeiro-outubro)

em comparação com o ano de 2021, o que mostra que medidas simples como a redução do trânsito veicular não levarão a uma diminuição significativa nas concentrações de material particulado e a uma melhoria da qualidade do ar.

3.3. Concentrações de $MP_{2,5}$ determinadas por outros autores

Alguns autores têm estudado as concentrações de $MP_{2,5}$ usando amostradores de grande volume e analisado a composição e possível origem do mesmo. Godoy *et al.* coletaram amostras (de três em três dias) em quatro locais (Barra da Tijuca, Taquara, Tijuca e Duque de Caxias) entre junho de 2012 e junho de 2013, totalizando 122 dias de

amostragens.³⁴ Os locais estão indicados na Figura 4. Os valores médios foram 8 ± 4 , 10 ± 3 , 10 ± 4 e $12 \pm 4 \mu\text{g m}^{-3}$ e os valores máximos 19, 21, 26 e $24 \mu\text{g m}^{-3}$ para Barra da Tijuca, Taquara, Tijuca e Duque de Caxias, respectivamente. Os autores observaram apenas uma ultrapassagem do valor $25 \mu\text{g m}^{-3}$ estabelecido pela Resolução 491/2018.⁸ Porém ao considerar os valores médios é evidente que um número considerável de valores de 24 horas são maiores que o valor recentemente recomendado pela OMS ($15 \mu\text{g m}^{-3}$). A análise da composição (metais, íons orgânicos e inorgânicos, carbono orgânico e elementar) e uma cuidadosa análise multivariada, permitiram identificar as fontes. Os autores concluíram que em Duque de Caxias e Taquara existem seis fontes principais: poeira de rua, tráfego veicular, aerossol marinho, queima de biomassa, indústrias e aerossol secundário relacionado à queima de combustíveis. No bairro da Tijuca não foram identificadas fontes industriais nem queima de biomassa enquanto na Barra da Tijuca não foram determinadas fontes industriais.³⁴ A contribuição veicular (tráfego e formação secundária) variou de 48% em Duque de Caxias a 70% na Tijuca, sendo a formação secundária entre 13,0 e 36,2% do total. Esses resultados estão em total acordo com a descrição das fontes de emissão (Tabela 1 e Figura 2) e o regime dos ventos que indicam uma contribuição industrial importante nas regiões norte e oeste e uma contribuição predominantemente veicular no bairro da Tijuca e na zona sul da cidade.¹¹

Ventura *et al.* analisaram os dados obtidos para $MP_{2,5}$ pelo INEA e a SMAC no ano de 2016 (inclusive durante os Jogos Olímpicos Rio 2016, 5 a 21 de agosto) em cinco estações semiautomáticas.³⁵ As coletas foram realizadas durante 24 horas, de 6 em 6 dias, seguindo as orientações da legislação vigente na época.⁷ Os valores médios obtidos foram de 10 ± 7 , 11 ± 15 , 11 ± 8 , 8 ± 5 e $10 \pm 5 \mu\text{g m}^{-3}$ para Recreio dos Bandeirantes, Maracanã, Copacabana, Urca e

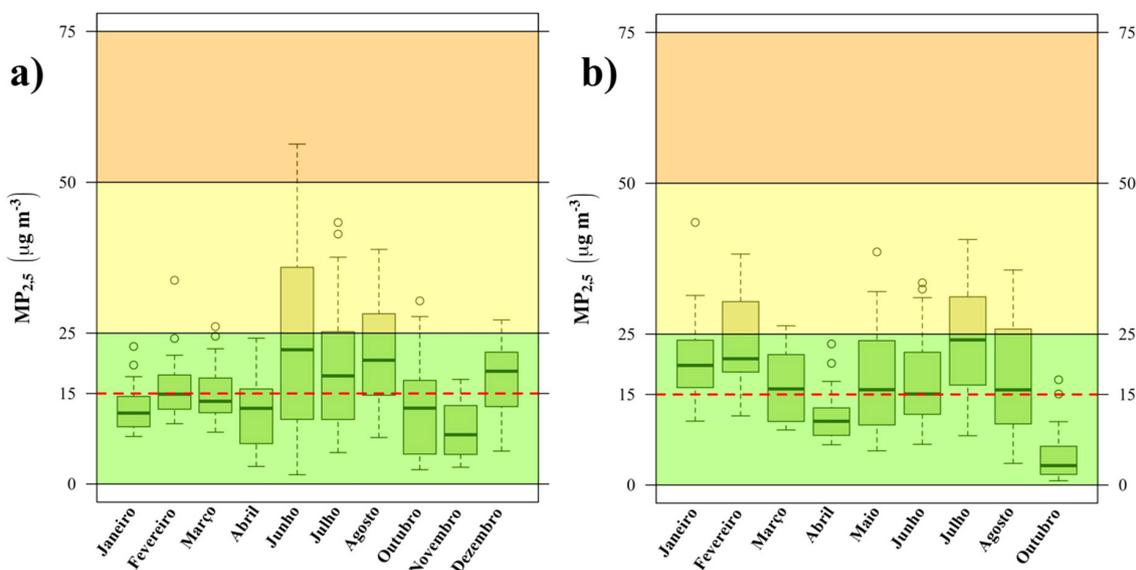


Figura 7. Boxplot das médias (24 horas) de material particulado fino ($MP_{2,5}$) determinadas pela estação de monitoramento automática de Irajá (dados cedidos pela SMAC) nos anos de: a) 2020 (janeiro-dezembro) e b) 2021 (janeiro-outubro). Os meses de maio e setembro de 2020 e setembro de 2021 foram excluídos por terem apenas 32, 43 e 57% dos dados, respectivamente

Lagoa, respectivamente. Como observado pelos autores, esses valores são ligeiramente menores que os medidos entre 2012 e 2015 em 15 estações semiautomáticas da RMRJ operadas pelo INEA, e reportados por Ventura *et al.* em 2018 (entre 6 e 20 $\mu\text{g m}^{-3}$).³⁹ Já os valores máximos, medidos em 2016, foram de 36, 95, 29, 23 e 28 $\mu\text{g m}^{-3}$ para Recreio dos Bandeirantes, Maracanã, Copacabana, Urca e Lagoa, respectivamente.³⁵ Novamente é observado que mesmo o valor médio sendo menor que o valor recentemente recomendado pela OMS, existem valores muito superiores a esse limite de 15 $\mu\text{g m}^{-3}$, especialmente no período seco (abril a setembro). Como discutido pelos autores, houve uma redução nos níveis de material particulado fino após a conclusão das obras de infraestrutura relacionadas aos Jogos Olímpicos, tanto pela conclusão das obras civis quanto pelas mudanças nos meios de transporte de uso coletivo.

A complexidade do problema de formação secundária de $\text{MP}_{2,5}$ ficou evidente em 2020, durante as medidas restritivas à mobilidade para mitigar a proliferação do vírus de COVID-19. Dantas *et al.* analisaram os resultados da estação de Irajá (monitoramento automático), durante o período de restrições e compararam com dados para o período 2012-2019.¹¹ Foi observada uma redução dos valores (até 40% ao meio dia) apenas durante o horário diurno, 6:00 às 18:00 horas aproximadamente. A dependência não linear da redução dos níveis de material particulado fino com a redução no trânsito veicular foi observada, também, em outros locais, por exemplo em algumas cidades da China e foi atribuída à contribuição dos óxidos de nitrogênio (NO_x).⁴⁰ Essa situação é semelhante ao aumento ou a estabilidade das concentrações de ozônio no mesmo período no qual a redução das emissões de NO_x (devida às restrições na circulação veicular), incrementou a capacidade oxidativa da atmosfera e a eficiência dos processos secundários.⁴¹

3.4. Recomendações da OMS

A OMS estima que aproximadamente 80% das mortes prematuras relacionadas às concentrações de $\text{MP}_{2,5}$ poderiam ser evitadas se os níveis fossem reduzidos em todo o mundo aos valores-guia indicados nas recomendações de 2021.⁴² As novas recomendações da OMS são o resultado de seis anos de estudos de diversos grupos de trabalho que compilaram e analisaram as informações obtidas em décadas de estudos.^{43,44} Os resultados desses estudos foram publicados num número especial da revista *Environmental International*, editado por Whaley *et al.* e as informações sobre material particulado foram compiladas no *review* de Orellano *et al.*^{45,46}

Atualmente, existem fortes evidências da relação entre a exposição ao material particulado fino ($\text{MP}_{2,5}$) e morte prematura, assim como diversas doenças (infecções respiratórias agudas inferiores, doença pulmonar obstrutiva crônica, doença isquêmica do coração, câncer do pulmão e acidente vascular cerebral). Também existem evidências

crescentes da relação com diabetes tipo II, mortalidade neonatal, nascimentos com baixo peso ou tempo de gestação menor que o normal e com a incidência de doenças neurológicas, inclusive Alzheimer. Atualmente a OMS considera que o risco de exposição ao $\text{MP}_{2,5}$ é tão grande quanto o tabagismo e se encontra entre os cinco maiores riscos dos 87 listados por essa agência.⁴⁴

A OMS chama também a atenção para o impacto econômico desses efeitos, seja pelos custos relacionados ao atendimento hospitalar quanto à perda de produtividade. Em 2013, o Banco Mundial estimou que o custo global direto das doenças ocasionadas pela exposição ao material particulado fino, era de aproximadamente US\$ 3,55 trilhões de dólares na área dos sistemas de saúde, além de US\$ 143 bilhões devido à perda de produtividade laboral. Existem, também, outros impactos da poluição do ar como danos na agricultura e pecuária, degradação ambiental em geral e, inclusive, mudanças climáticas.⁴⁴

3.5. Qualidade do ar ambiente e desenvolvimento sustentável

O problema da qualidade do ar está contemplado nos ODS desde diversos pontos de vista,¹ principalmente, saúde, energia, cidades e comunidades sustentáveis e parcerias entre os diversos sectores:

Objetivo 3, saúde e bem-estar, que se destina a assegurar uma vida saudável e promover o bem-estar para todas e todos, em todas as idades, e particularmente na sua meta 3.9 propõe ações para reduzir substancialmente o número de mortes e doenças causadas por produtos químicos e perigosos e por contaminação e poluição do ar, da água e do solo;

Objetivo 7, assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todas e todos, principalmente no que se refere a aumentar a eficiência energética, usar fontes de energia renováveis e mais limpas, expandir a infraestrutura e modernizar a tecnologia para serviços de energia sustentáveis;

Objetivo 11 (cidades e comunidades sustentáveis), que propõe tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis e, em sua meta 11.6 dispõe sobre a necessidade de medidas para reduzir o impacto ambiental negativo per capita das cidades, inclusive prestando especial atenção à qualidade do ar, gestão de resíduos municipais e outros;

Objetivo 17 (fortalecer os meios de implementação e revitalizar a parceria global para o desenvolvimento sustentável), que em sua meta 17.17 incentiva a promoção de parcerias públicas, público-privadas, privadas, e com a sociedade civil eficazes, a partir da experiência das estratégias de mobilização de recursos dessas parcerias.

Considerando a relação estreita entre a qualidade do ar, externo e interno, e a saúde das pessoas, não é possível lograr o desenvolvimento econômico e social de uma comunidade sem cuidar do meio ambiente e, em particular,

melhorar as condições de vida nas grandes cidades, o que necessariamente passa por uma melhoria da qualidade do ar.

A maior parte das fontes de poluição do ar externo, em geral, e de $MP_{2,5}$, em particular, são devidas aos processos industriais e a queima de combustíveis fósseis, e estão fora do controle dos indivíduos, sendo necessário o esforço e gerenciamento dos governos e instituições a nível local, regional e nacional na regulação dos diversos setores como transporte, indústrias, planejamento urbano, gerenciamento de resíduos e manejos dos solos.

A falta de recursos e de compromisso do poder público no monitoramento da qualidade do ar coloca em risco a saúde da população, especialmente dos setores mais vulneráveis, e impede a elaboração de um plano de gerenciamento de emissões que poderá tornar as cidades mais sustentáveis. A plataforma de dados do IEMA revela que apenas o estado de São Paulo, através da CETESB, coleta um número representativo de dados de qualidade do ar.¹² O esforço isolado dos técnicos da Secretaria Municipal de Meio Ambiente no Rio de Janeiro, sem o apoio substancial do município e principalmente sem um investimento importante do governo do estado, não é suficiente para gerenciar o problema da qualidade do ar numa cidade com a complexidade do Rio de Janeiro. Os resultados apresentados para a estação de monitoramento localizada em Irajá, onde foram observadas porcentagens altas de dados faltantes em três dos meses estudados, mostra claramente o problema da falta de recursos para a manutenção e continuidade do programa de controle da qualidade do ar.

Faz-se necessário o monitoramento extensivo e contínuo, a integração das redes de monitoramento estaduais e municipais e a participação da academia na caracterização da composição do material particulado e a determinação das fontes de emissão e os processos secundários.⁴⁷ Sem monitoramento, como mecanismo de controle e informação, e sem a elaboração de inventários de emissão detalhados, é impossível avaliar a degradação da qualidade do ar e o seu impacto na saúde da população, etapa inicial para priorizar os investimentos públicos em ações que levem à melhoria da qualidade ambiental e da qualidade do ar, em particular. O uso de combustíveis menos poluentes e de transportes alternativos, o controle das emissões industriais e a manutenção de áreas verdes, especialmente áreas de conservação ambiental, estão entre as medidas a serem consideradas.^{11,48}

É importante notar que para ser bem sucedido, um plano de gerenciamento da qualidade do ar deve ser economicamente sustentável e, ao mesmo tempo, efetivo nas melhorias ambientais, levando a uma melhoria da saúde da população e a uma redução dos custos com saúde pública e com perdas de produtividade.⁴⁹ Paralelamente, considerando que os poluentes do ar são transportados, é necessária uma articulação entre as diferentes esferas de governo e o estabelecimento de metas a nível local, regional e nacional.

A distribuição de competências em relação à gestão da qualidade do ar leva também à ineficácia da legislação.

Entanto os padrões de qualidade do ar e as normas referentes ao controle são atribuição da União, cabe aos Estados e ao Distrito Federal elaborar os Planos de Controle de Emissões Atmosféricas, que deverão ser definidos em regulamentação própria, e os Relatórios de Avaliação do Ar, que permitirão a progressão dos padrões intermediários até os valores finais. Não está prevista a articulação entre os Estado e os governos municipais, mesmo considerando que cabe aos municípios adotar políticas de mobilidade e desenvolvimento econômico que afetam a qualidade do ar, nem a articulação entre os municípios de grandes regiões metropolitanas, nas quais as emissões de uma cidade impactam claramente às cidades vizinhas. Finalmente, a legislação brasileira está desatualizada considerando as recomendações da OMS e as evidências mais recentes da ciência. Quando a Resolução 491 foi aprovada, diversos setores da saúde, ciências ambientais e até a Procuradoria Geral da República se manifestaram, solicitando a revisão dos padrões.⁹

Três anos após a aprovação da Resolução 491/2018, os governos estaduais deveriam apresentar seus planos de gerenciamento das emissões. Não há dúvidas de que não é possível estabelecer um plano confiável sem dados suficientes e sem o comprometimento das instâncias responsáveis. Coincidentemente, em 1991, o filósofo Bruno Latour escreveu: “*O navio está sem rumo: à esquerda, o conhecimento das coisas, à direita o interesse, o poder e a política dos homens*”. Trinta anos depois, o navio da qualidade do ar na maioria das cidades brasileiras continua sem rumo.⁵⁰

4. Conclusão

Os resultados deste trabalho mostram a complexidade da topografia da cidade do Rio de Janeiro e a diversidade de fontes de emissão resultantes do trânsito de veículos leves e pesados e das atividades industriais principalmente nas zonas norte e oeste da cidade e da RMRJ. Considerando essa complexidade, a cidade não dispõe de uma rede de monitoramento fixa adequada e apenas uma estação, localizada no bairro de Irajá, determina as concentrações de material particulado fino de forma contínua e disponibiliza esses dados para a população. Resultados obtidos por essa estação e pela estação de monitoramento móvel, que operou em diversos pontos da cidade entre 2010 e 2018, mostram que apesar do índice de qualidade do ar para este poluente ser em geral “bom”, conforme a legislação brasileira, o valor de $15 \mu\text{g m}^{-3}$ estabelecido pela OMS em 2021 é superado, em algumas áreas da cidade, em pelo menos 50% dos dias, o que coloca em risco a saúde da população, especialmente dos mais vulneráveis, crianças e idosos.

O desenvolvimento sustentável envolve necessariamente a harmonia entre o homem e a natureza e a garantia de saúde e bem estar para todas as pessoas. Existem fortes evidências da relação entre a qualidade do ar e diversas doenças e,

inclusive, a morte prematura de milhões de pessoas. O gerenciamento da qualidade do ar é extremamente complexo e requer um conhecimento prévio dos níveis de concentração dos diferentes poluentes e das fontes de emissão, além de investimentos tanto em equipamentos quanto em pessoal técnico qualificado. Dessa forma, é imprescindível que o Estado assuma seu papel de garantir o direito de todos os cidadãos à saúde e qualidade de vida.

Agradecimentos

Os autores agradecem a colaboração da Secretaria Municipal de Meio Ambiente de Rio de Janeiro e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. GA agradece financiamento parcial do CNPq e FAPERJ. JRBAR agradece bolsas de iniciação científica PIBIC/UFRJ e PIBIC/CNPq. CMS agradece uma bolsa FUNADESP.

Referências Bibliográficas

- Objetivos do Desenvolvimento Sustentável. Nações Unidas Brasil. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em: 20 dezembro 2021.
- Air Pollution and Child Health. Prescribing clear air. World Health Organization. Disponível em: <<https://www.who.int/publications/i/item/air-pollution-and-child-health>>. Acesso em: 20 dezembro 2021.
- World Health Organization. Air Quality Guidelines. Global Update 2005. Disponível em: <https://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0005/78638/E90038.pdf>. Acesso em: 20 dezembro 2021.
- World Health Organization. WHO expert consultation: available evidence for the future update of the WHO Global Air Quality Guidelines (AQGs). Disponível em: <<https://apps.who.int/iris/handle/10665/341714>>. Acesso em: 20 dezembro 2021.
- World Health Organization. 7 million premature deaths annually linked to air pollution. Disponível em: <<https://www.who.int/news/item/25-03-2014-7-million-premature-deaths-annually-linked-to-air-pollution>>. Acesso em: 20 dezembro 2021.
- World Health Organization. What are the WHO air quality guidelines? Disponível em: <<https://www.who.int/news-room/feature-stories/detail/what-are-the-who-air-quality-guidelines>>. Acesso em: 20 dezembro 2021.
- Resolução CONAMA número 3 (28/06/1990). Disponível em: <https://www.ibram.df.gov.br/images/resol_03.pdf>. Acesso em: 20 dezembro 2021.
- Resolução CONAMA número 491 (19/11/2018). Disponível em: <https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/51058895>. Acesso em: 20 dezembro 2021.
- Siciliano, B.; Dantas, G.; da Silva, C. M.; Arbilla, G.; The Updated Brazilian National Air Quality Standards: A Critical Review. *Journal of the Brazilian Chemical Society* **2019**, *31*, 523. [Crossref]
- Ministério do Meio Ambiente. Guia Técnico para a Avaliação e Monitoramento da Qualidade do Ar. Disponível em: <<https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/agendaambientalurbana/ar-puro/GuiaTecnicoParaQualidadedoAr.pdf>>. Acesso em: 20 dezembro 2021.
- Dantas, G.; Siciliano, B.; França, B. B.; Estevam, D. O.; da Silva, C. M.; Arbilla, G.; Using mobility restriction experience for urban air quality management. *Atmospheric Pollution Research* **2021**, *12*, 101119. [Crossref]
- Instituto de Energia e Ambiente. Plataforma da Qualidade do Ar. Disponível em: <<https://energiaeambiente.org.br/qualidadedoar>>. Acesso em: 20 dezembro 2021.
- Instituto de Energia e Ambiente. Apenas dez estados brasileiros e Distrito Federal têm redes de monitoramento da qualidade do ar, segundo dados do IEMA. Disponível em: <<https://energiaeambiente.org.br/apenas-dez-estados-brasileiros-e-distrito-federal-tem-redes-de-monitoramento-da-qualidade-do-ar-segundo-dados-do-iema-20210929>>. Acesso em: 20 dezembro 2021.
- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, CETESB. Qualidade do ar. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/ar/boletim-diario/>>. Acesso em: 20 dezembro 2021.
- Instituto do Meio Ambiente do Estado do Espírito Santo. Disponível em: <<https://iema.es.gov.br/qualidadedoar/dadosdemonitoramento/automatica>>. Acesso em: 20 dezembro 2021.
- Data Rio. Estações de Monitoramento da Qualidade do Ar. MonitorAr. Disponível em: <<https://www.data.rio/datasets/esta%C3%A7%C3%B5es-de-monitoramento-da-qualidade-do-ar-monitorar/explore?location=-22.925661%2C-43.402788%2C11.82>>. Acesso em: 20 dezembro de 2021.
- Secretaria Municipal de Meio Ambiente. Boletim de Qualidade do Ar. Disponível em: <<http://jeap.rio.rj.gov.br/je-metinfosmac/boletim>>. Acesso em: 20 dezembro de 2021.
- Silva, C. M.; da Silva, L. L.; Corrêa, S. M.; Arbilla, G.; Análise de Especiação de Compostos Orgânicos Voláteis Precursores de Ozônio nas Bacias Aéreas da Região Metropolitana do Rio de Janeiro. *Revista Virtual de Química* **2017**, *9*, 1887. [Crossref]
- Google Maps. Disponível em: <<https://www.google.com/maps/@-22.9241622,-43.3047459,12z>>. Acesso em: 20 dezembro 2021.
- Porto de Itaguaí. Disponível em: <<http://itaguaui.portosrio.gov.br/>>. Acesso em: 20 dezembro 2021.
- Casa da Moeda do Brasil. Catálogo comercial. Disponível em: <<https://www.casadamoeda.gov.br/arquivos/pcmb/negocios/produtos-e-servicos/catalogo-comercial/catalogo-portugues.pdf>>. Acesso em: 20 dezembro 2021.
- Refinaria Duque de Caxias. Petrobras. Disponível em: <<https://petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/principais-operacoes/refinarias/refinaria-duque-de-caxias-reduc.htm>>. Acesso em: 20 dezembro 2021.
- Pires, D. O.; Dissertação de Mestrado. Inventário de emissões atmosféricas de fontes estacionárias e sua contribuição para

- a poluição do ar na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005. [Link]
24. Plano mestre Porto de Niterói. Disponível em: <<https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/centrais-de-conteudo/se21-pdf>>. Acesso em: 20 dezembro 2021.
 25. Porto do Rio século XXI. Disponível em: <[http://www.rj.gov.br/Uploads/Noticias/8614versao-digital-caderno-porto-rio-sec-XXI-200713%20\(3\).pdf](http://www.rj.gov.br/Uploads/Noticias/8614versao-digital-caderno-porto-rio-sec-XXI-200713%20(3).pdf)>. Acesso em: 20 dezembro 2021.
 26. Secretaria Municipal do Meio Ambiente. Qualidade do ar na cidade do Rio de Janeiro. Relatório da Rede MonitorAr-Rio. 2011-2012. Disponível em: <http://www.rio.rj.gov.br/documents/91265/3252594/Relatorio+Monitorar++2011-2012.pdf>. Acesso em: 20 dezembro 2021.
 27. Ternium Brasil. Disponível em: <https://br.ternium.com/pt/nossa-empresa>. Acesso em: 20 dezembro 2021.
 28. DataRio. Mapa digital do Rio de Janeiro. Tráfego on line. Disponível em: <<https://www.arcgis.com/home/item.html?id=84f9f72134a34fbb85d3074136c3bf54>>. Acesso em: 20 dezembro 2021.
 29. Instituto Estadual do Ambiente. Inventário Emissões de Fontes Veiculares, Região Metropolitana do Rio de Janeiro, Ano base 2013. Disponível em: <<http://www.inea.rj.gov.br/wp-content/uploads/2019/01/Invent%C3%A1rio-de-Emiss%C3%B5es-de-Fontes-Veiculares.pdf>>. Acesso em: 20 dezembro 2021.
 30. Instituto Estadual do Ambiente. Qualidade do ar. Disponível em: <<http://www.inea.rj.gov.br/ar-agua-e-solo/qualidade-do-ar>>. Acesso em: 20 dezembro 2021.
 31. Instituto Estadual do Ambiente. Relatório da Qualidade do Ar do Estado do Rio de Janeiro, Ano base 2018. Disponível em: <<http://www.inea.rj.gov.br/wp-content/uploads/2020/11/relatorio-qualidade-ar-2018.pdf>>. Acesso em: 20 dezembro 2021.
 32. Data Rio. Bairros Cariocas. Disponível em: <https://www.data.rio/apps/bairros-cariocas/explore>. Acesso em: 20 dezembro 2021.
 33. Mendes, D.; Dantas, G.; da Silva, M. A.; de Seixas, E. G.; da Silva, C. M.; Arbilla, G.; Impact of the Petrochemical Complex on the Air Quality of an Urban Area in the City of Rio de Janeiro, Brazil. *Bulletin of the Environmental Contamination and Toxicology* **2020**, *104*, 438. [Crossref]
 34. Godoy, M. L. D. P.; Almeida, A. C.; Tonietto, G. B.; Godoy, J. M.; Fine and Coarse Aerosol at Rio de Janeiro prior to the Olympic Games: Chemical Composition and Source Apportionment. *Journal of the Brazilian Chemical Society* **2018**, *29*, 499. [Crossref]
 35. Ventura, L. M.; Ramos, M. B.; Gioda, A.; França, B. B.; Godoy, J. M. de O.; Air quality monitoring assessment during the 2016 Olympic Games in Rio de Janeiro, Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment* **2019**, *191*, 369. [Crossref]
 36. R Project. Disponível em: <<https://www.r-project.org/>>. Acesso em: 20 dezembro 2021.
 37. The Open Air Manual. Disponível em: http://www.dca.iag.usp.br/material/ritaynoue/PAE/aula_R/apostilas/OpenAir_Manual.pdf. Acesso em: 20 dezembro 2021.
 38. World Health Organization. Ambient (outdoor) air pollution. Disponível em: <[https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)>. Acesso em: 20 dezembro 2021.
 39. Ventura, L. M. B.; Ramos, M. B.; Santos, J. O.; Gioda, A.; Monitoring of air quality before the Olympic Games Rio 2016. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* **2019**, *91*, e20170984. [Crossref]
 40. Huang, X.; Ding, A.; Gao, J.; Zheng, B.; Zhou, D.; Qi, X. M.; Tang, R.; Wang, J.; Ren, C.; Nie, W.; Chi, X.; Xu, Z.; Chen, L.; Li, Y.; Che, F.; pang, N.; Wlang, H.; Tong, D.; Quin, W.; Cheng, W.; Liu, W.; Fu, B.; Chai, F.; Davis, S. J.; Zhang, Q.; He, K.; Enhanced secondary pollution offset reduction of primary emissions during COVID-19 lockdown in China. *National Science Review* **2020**, *8*, nwa137. [Crossref]
 41. Siciliano, B.; Dantas, G.; da Silva, C. M.; Arbilla, G.; Increased ozone levels during the COVID-19 lockdown: Analysis for the city of Rio de Janeiro, Brazil. *Science of the Total Environment* **2020**, *737*, 139765. [Crossref]
 42. World Health Organization. New WHO global air quality guidelines aim to save millions of lives from air pollution. Disponível em: <<https://www.who.int/news/item/22-09-2021-new-who-global-air-quality-guidelines-aim-to-save-millions-of-lives-from-air-pollution>>. Acesso em: 20 dezembro 2021.
 43. Organização Pan-americana de Saúde. Diretrizes globais de qualidade do ar da OMS. Resumo executivo. Disponível em: https://iris.paho.org/bitstream/handle/10665.2/54963/9789275724613_por.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 20 dezembro 2021.
 44. World Health Organization. WHO global air quality guidelines. Disponível em: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/345329/9789240034228eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 20 dezembro 2021.
 45. Whaley, P.; Nieuwenhuijsen, M.; Burns, J.; 2021. Environmental International. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/journal/environment-international/special-issue/10MTC4W8FXJ>. Acesso em: 20 dezembro 2021.
 46. Orellano, P.; Reynoso, J.; Quaranta, N.; Bardach, A.; Ciapponi, A.; Short-term exposure to particulate matter (PM10 and PM2.5), nitrogen dioxide (NO2), and ozone (O3) and all-cause and cause-specific mortality: Systematic review and meta-analysis. *Environmental International* **2020**, *142*, 105876. [Crossref]
 47. Gioda, A.; Beringui, K.; Justo, E. P. S.; Ventura, L. M. B.; Massone, C. G.; Costa, S. S. L.; Oliveira, S. S.; Araujo, R. G. O.; Nascimento, N. de M.; Severino, H. G. S.; Duyck, C. B.; Souza, J. R. de; Saint Pierre, T. D.; A review on atmospheric analysis focusing on public health, environmental legislation and chemical characterization. *Critical Reviews in Analytical Chemistry* **2021** (no prelo). [Crossref]
 48. Custodio, D.; Guimaraes, C. S.; Varanda, L. S.; Arbilla, G.; Pattern of volatile aldehydes and aromatic hydrocarbons in the largest urban rainforest in the Americas. *Chemosphere* **2010**, *79*, 1064. [Crossref]
 49. Carnevele, C.; Ferrari, F.; Guariso, G.; Maffei, G.; Turrini, E.; Volta, M.; Assessing the Economic and Environmental Sustainability of a Regional Air Quality Plan. *Sustainability* **2018**, *10*, 3568. [Crossref]
 50. Latour, B.; *Jamais fomos modernos*, 4a Ed. (1ª reimpressão), Editora 34: São Paulo, 2021.