O impacto das emissões veiculares no período pandêmico da Região Metropolitana de Piracicaba (RMP)

Palavras-Chave: *Top-down*; inventário; emissão veicular; inventário de emissão.

Autoras:

BIANCA CRISTINA DOS REIS PINTO, FT – UNICAMP

PROFª. DRª. SIMONE ANDRÉA POZZA (ORIENTADORA), FT – UNICAMP

1. INTRODUÇÃO

A poluição do ar é uma preocupação, principalmente em centros urbanos de países em desenvolvimento como o Brasil (Silva et al., 2025). Os veículos representam uma das principais fontes de poluição atmosférica (Pereira et al., 2023). Essa emissão é prejudicial ao meio ambiente, como também à saúde humana. Segundo a Organização Mundial da Saúde (WHO, 2022), cerca de 90% da população mundial vive em áreas onde a qualidade do ar está abaixo dos níveis recomendados, devido à elevada concentração de poluentes atmosféricos. Essa exposição prolongada contribui para milhões de mortes a cada ano, além de desencadear doenças cardiovasculares, respiratórias, psicológicas e mortes prematuras (Rybarczyk et al., 2024).

O setor de transporte veicular foi um dos mais afetados pelas restrições impostas durante a pandemia de COVID-19 (2020-2021), especialmente em 2020, quando a circulação de pessoas e as atividades externas foram limitadas (Polednik, 2021). Entretanto, estudos realizados por Lobato et al. (2021) no Brasil e por Zhang et al. (2022) na China destacam o rápido crescimento das atividades industriais e do tráfego veicular após o fim das restrições conhecidas como *lockdown*. Com isso, o inventário de emissões torna-se essencial para estimar e avaliar as emissões veiculares. A metodologia *top-down* baseia-se em informações agregadas, como o volume de tráfego e o consumo de combustíveis, permitindo uma aplicação mais rápida e com menor demanda por recursos técnicos e financeiros (Wang; Zhu, 2024).

Este estudo de caso avaliou a Região Metropolitana de Piracicaba (RMP), que foi consolidada em 24 de agosto de 2021, pela Lei Estadual nº 1.360 (São Paulo, 2021). Ela está localizada no estado de São Paulo e é composta por 24 municípios, dentre eles cidades de médio e grande porte, como Araras, Limeira, Piracicaba e Rio Claro. Possui população de aproximadamente 1,5 milhões de habitantes, com área total de 7.860,85 km². A região apresenta indústrias nos setores sucroalcooleiro, metalmecânico e integra um dos maiores polos cerâmicos do mundo, o Polo Cerâmico de Santa Gertrudes (São Paulo, 2023). Piracicaba é o município mais populoso da região com cerca de 438.827 habitantes, sendo a 13ª mais populosa do estado de São Paulo. A RMP está estrategicamente localizada na malha rodoviária estadual, facilitando o transporte de pessoas e mercadorias em direção

ao Porto de Santos e aos aeroportos de Congonhas, Cumbica e Viracopos (PDUI, 2020). Além disso, conta com uma frota de 517.908 veículos (ANP, 2022).

O objetivo deste trabalho foi estimar a emissão dos poluentes atmosféricos pela metodologia *top-down*, como o monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC), óxidos de nitrogênio (NO_x), aldeídos (RCHO), material particulado (MP), dióxido de carbono (CO_2) e óxido nitroso (N_2O) emitidos por fontes móveis da área de estudo, entre os anos de 2017 e 2022.

2. METODOLOGIA

Para a abordagem *top-down*, foi aplicado um conjunto de parâmetros definidos (Equação 1) com o objetivo de estimar o inventário de emissões. As informações sobre o consumo de combustíveis foram obtidas junto à Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), contemplando os volumes de etanol hidratado e gasolina C, adquiridos por cada município da RMP entre os anos de 2017 e 2022.

$$E_{T,p,c} = \sum_{k=1}^{n} * \sum_{j=1}^{n} * FE_{p,j,i,c} * C_{J,k} \qquad \text{Eq. 1}$$

onde,

- $E_{T,p,c}$ é a emissão estimada pelo método *top-down*, para o poluente p e da categoria c, em kg.ano^{-1};
- $FE_{p,j,i,c}$ é o fator de emissão para cada poluente p, combustível j, ano-modelo i e da categoria c, em kg.L^{-1};
- $C_{J,k}$ é a quantidade de combustível j, consumido na cidade k, em L.ano^{-1}.

Os fatores de emissão utilizados foram disponibilizados pela CETESB, sendo necessário agrupar os diferentes tipos de combustíveis e as categorias de veículos licenciados de acordo com sua classificação específica (Meotti, 2019).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

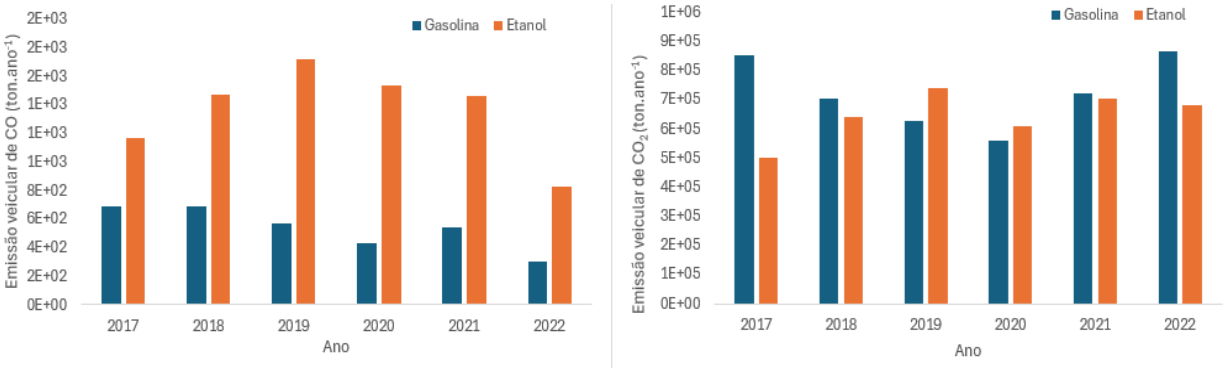
A Figura 1 apresenta a emissão dos poluentes HC total, NO_X e N_2O de veículos leves movidos a etanol (a) e a gasolina (b). Os resultados demonstram que embora tenham ocorrido oscilações anuais ao longo dos anos, as emissões foram impactadas devido a COVID-19, principalmente para veículos a etanol. A redução mais significativa em foi em 2022 dos veículos movidos a etanol que sugere a influência de fatores adicionais, como renovação da frota, mudanças no padrão de mobilidade ou políticas ambientais, destacando a importância do monitoramento contínuo para orientar estratégias de controle da poluição atmosférica na região.

Figura 1- Emissão de poluentes (HC Total, NO_X e N_2O) (ton.ano^{-1}) por veículos leves movidos a etanol (a) e gasolina (b) na RMP entre os anos 2017 e 2022.

(a) (b)

Como o monóxido de carbono (CO) apresentou os maiores níveis de emissão entre os poluentes avaliados para veículos leves movidos tanto para etanol quanto para gasolina, superando HC total, NO_x e N_2O, ele está apresentado em separadamente, na Figura 2 (a). Já na Figura 2 (b), nota-se que os veículos a gasolina são os que mais emitem CO_2. Comportamentos similares foram evidenciados em estudos realizados em diferentes regiões do Brasil: Rio de Janeiro (Souza et al., 2013); Região Metropolitana de Porto Alegre (Tang et al., 2016) e Campinas (Tomaz, et al., 2011).

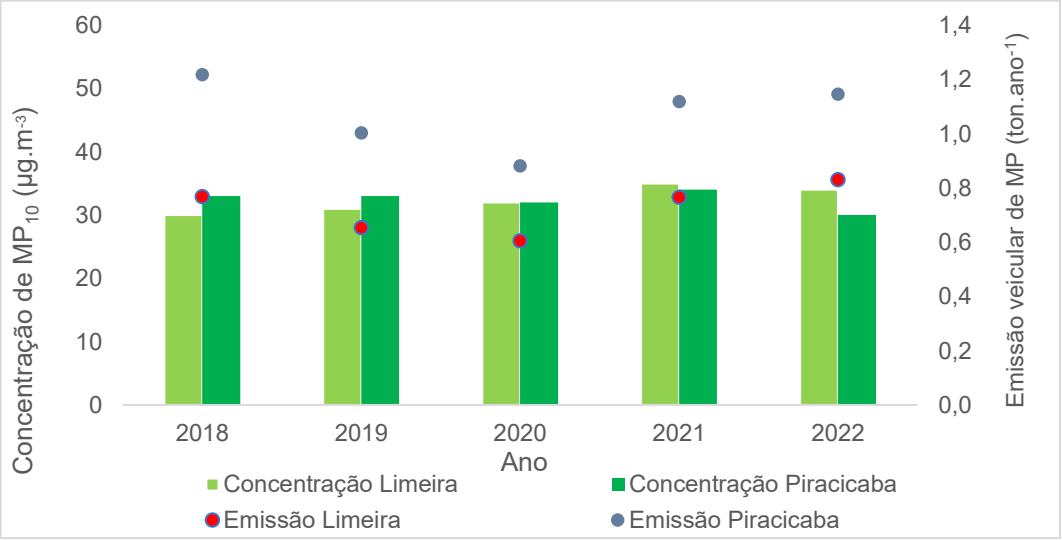
Figura 2- Emissão de poluentes, CO (a) e CO_2 (b) (ton.ano^{-1}) por veículos leves movidos a etanol e gasolina na RMP entre os anos 2017 e 2022.



(a) (b)

A Figura 4 apresenta a comparação entre as concentrações médias de MP_{10} (µg.m^{-3}) e as emissões veiculares (ton.ano^{-1}) nos municípios de Limeira e Piracicaba. Nota-se que, apesar da redução nas emissões de MP ao longo dos últimos anos, intensificada no período pós-pandemia, as médias de concentração de MP_{10} não apresentaram uma queda proporcional. Esse comportamento evidencia que a relação entre as emissões veiculares e a qualidade do ar é influenciada por diversos fatores, como condições meteorológicas, dispersão atmosférica e presença de fontes de poluição adicionais, como queimadas e atividades industriais (Shi et al., 2021; Nakada & Urban, 2020). O estudo conduzido por Liu et al. (2021), envolvendo 597 cidades, da Itália também identificou diminuição nos fatores de emissão de MP_{10} e $MP_{2,5}$ durante o confinamento da COVID-19, porém sem uma redução equivalente nas concentrações atmosféricas desses poluentes. Outro estudo feito no Brasil mostrou queda de 24,1% entre janeiro e maio de 2020 em comparação com o mesmo período de 2019 (Lobato et al., 2021). Portanto, a dinâmica dos poluentes atmosféricos é complexa, exigindo uma abordagem integrada para o entendimento e controle da qualidade do ar.

Figura 4- Concentração média de MP_{10} (µg.m^{-3}) obtida nas estações automáticas de Limeira e Piracicaba e a emissão veicular de MP (ton.ano^{-1}) da frota de veículos leves.



4. CONCLUSÕES

A aplicação da metodologia *top-down* possibilitou uma análise detalhada do comportamento das emissões veiculares na Região Metropolitana de Piracicaba entre os anos de 2017 e 2022. Os resultados indicam que o período pandêmico teve um impacto significativo na redução das emissões de poluentes, especialmente nos anos em que as restrições à mobilidade foram mais severas. A análise revelou uma diminuição nas emissões de material particulado (MP), contudo, o efeito observado parece ser temporário, refletindo uma diminuição momentânea na atividade veicular. Em particular, a redução das emissões para veículos movidos a etanol evidenciou o impacto direto das alterações nos padrões de circulação urbana durante o período de pandemia.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEL (ANP). Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/dados-estatisticos. Acesso em: 16 jan. 2025.

LIU, F.; WANG, M.; ZHENG, M.; et al. Air quality improvement in response to intensified control strategies in China during COVID-19 pandemic. *Science of the Total Environment*, v. 755, 142523, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142523.

LLAGUNO-MUNITXA, M.; BOU-ZEID, E. Papel das emissões veiculares na qualidade do ar urbano: o experimento de confinamento da COVID-19. Transp. Res. Part D: Transp. Environ., v. 115, p. 103580, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103580. Acesso em: 23 jun. 2025.

LOBATO, M. G.; MARTINS, J. A.; LOPES, F. J. S.; MARTINS, L. D. Avaliação das concentrações de poluentes atmosféricos em uma região urbana industrial durante o período de pandemia da COVID-19. *Estudos Avançados*, v. 35, n. 101, p. 73-89, 2021. Disponível em: https://www.scielo.br/j/esa/a/sRtHmMScvbxSJ3znxtYb7Sh/. Acesso em: 20 jun. 2025.

MEOTTI, B. Comparação entre métodos *top-down e bottom-up* na estimativa de emissões veiculares. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

NAKADA, L. Y. K.; URBAN, R. C. COVID-19 pandemic: Impacts on the air quality during the partial lockdown in São Paulo state, Brazil. *Science of the Total Environment*, v. 730, 139087, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139087.

PEREIRA, G. M.; NOGUEIRA, T.; KAMIGAUTI, L. Y.; SANTOS, D. M. D.; NASCIMENTO, E. Q. M.; MARTINS, J. V.; VICENTE, A.; ARTAXO, P.; ALVES, C.; VASCONCELLOS, P. D. C.; ANDRADE, M. D. F. Particulate matter fingerprints in biofuel impacted tunnels in South America's largest metropolitan area. Science of The Total Environment, v. 856, Part 2, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159006.

POLEDNIK, B. Air quality changes in a Central European city during COVID-19 lockdown. Sustainable Cities and Society, v. 73, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103096.

PREFEITURA DO ESTADO DE SÃO PAULO. Plataforma Digital do Plano de Desenvolvimento Urbano Integrado (PDUI) da Região Metropolitana de Piracicaba (RMP). Disponível em: https://rmp.pdui.sp.gov.br/. Acesso em: 18 jun. 2025.

RYBARCZYK, Y.; ZALAKEVICIUTE, R.; ORTIZ-PRADO, E. Causal effect of air pollution and meteorology on the COVID-19 pandemic: A convergent cross mapping approach. *Heliyon*, v. 10, n. 3, e25134, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25134.

SÃO PAULO (Estado). Com 92% da produção estadual, Santa Gertrudes se destaca como 'Capital da Cerâmica de Revestimento'. Assembleia Legislativa do Estado de São Paulo, 19 jul. 2023. Disponível em: https://www.al.sp.gov.br/noticia/?19%2F07%2F2023%2Fcom-92--da-producao-estadual--santa-gertrudes-se-destaca-como--capital-da-ceramica-de-revestimento-. Acesso em: 20 jun. 2025.

SÃO PAULO (Estado). Lei Complementar nº 1.360, de 24 de agosto de 2021. Dispõe sobre a reorganização da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB e dá providências correlatas. Disponível em: https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei.complementar/2021/lei.complementar-1360-24.08.2021.html. Acesso em: 20 jun. 2025.

SILVA, L. F. M.; ALENCAR, M. R. B.; NUNES, A. H. M.; GIODA, A. Real-time analysis of NOx emissions in heavy-duty diesel vehicles: Impact of speed and variations across vehicle groups. Atmospheric Pollution Research, v. 16, n. 9, p. 102572, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apr.2025.102572. Acesso em: 20

jun. 2025.

SHI, X.; BRASSEUR, G. P. The response in air quality to the reduction of Chinese economic activities during the COVID-19 outbreak. *Geophysical Research Letters*, v. 47, n. 11, e2020GL088070, 2020. DOI: https://doi.org/10.1029/2020GL088070.

SOUZA, C. D. R.; SILVA, S. D.; SILVA, M. A. V.; D'AGOSTO, M. A.; BARBOZA, A. P. Inventory of conventional air pollutants emissions from road transportation for the state of Rio de Janeiro. Energy Policy, v. 53, p. 125–135, 2013. DOI: 10.1016/j.enpol.2012.10.021.

TANG, G.; CHAO, N.; WANG, Y.; CHEN, J. Vehicular emissions in China in 2006 and 2010. Journal of Environmental Sciences, v. 48, p. 179–192, 2016. DOI: 10.1016/j.jes.2016.01.031.

UEDA, A. C.; TOMAZ, E. Inventário de emissão de fontes veiculares da região metropolitana de Campinas, São Paulo. Química Nova, v. 34, n. 9, p. 1496–1500, 2011. DOI: https://doi.org/10.1590/S0100-40422011000900003.

WANG, Q.; ZHU, H. Combined top-down and bottom-up approach for CO2 emissions estimation in Building sector of Beijing: Taking new energy vehicles into consideration. Energy, v. 290, 2024. DOI:https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130302.

WHO - WORLD HEALTH ORGANIZATION. Ambient (outdoor) air pollution. 2022. Disponível em: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health. Acesso em: 20 jun. 2025.

ZHANG, S.; WANG, Y.; WANG, J.; et al. The impact of COVID-19 lockdown on CO_2 emissions in a city with high industrial activities: A case study of Tangshan, China. *Science of The Total Environment*, v. 830, 154653, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154653.