



Modelagem da dispersão atmosférica de material particulado (MP10) e os impactos da utilização de veículos de carga movidos a GNL em São Paulo

Particulate matter atmospheric dispersion modeling and the impacts of using LNG fueled freight vehicles in São Paulo

Raquel Rocha Borges^{*1} , Ana Carolina Rodrigues Teixeira^{2,3} ,
Dominique Mouette^{1,2} , Flávia Noronha Dutra Ribeiro¹ 

¹ Escola de Artes, Ciências e Humanidades (EACH), Universidade de São Paulo,
São Paulo, SP, Brasil

Recebido (Received): 16/05/2021

Aceito (Accepted): 03/11/2021

² Instituto de Energia e Ambiente (IEE), Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil

³ Escola Politécnica (EP), Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil

E-mail: acrt88@hotmail.com (ACRT); dominiquem@usp.br (DM); flaviaribeiro@usp.br (FNDR)

*E-mail para correspondência: raquelrochaborges@gmail.com

Resumo: O sistema de transporte brasileiro baseia-se no modo rodoviário, sendo os caminhões o principal veículo utilizado no transporte de mercadorias, responsável por 70% das emissões de material particulado (MP) veiculares do Estado de São Paulo. Por isso, é cada vez maior a busca por tecnologias alternativas para reduzir as emissões do setor de transportes. Tendo em vista a necessidade de reduzir poluentes e melhorar a qualidade do ar em grandes centros urbanos, o objetivo dessa pesquisa é calcular e analisar as emissões de material particulado com diâmetro de até 10 μm (MP₁₀) provenientes de veículos de carga rodoviários na Avenida Marginal Tietê, na cidade de São Paulo. O presente trabalho faz uso do modelo de dispersão atmosférica AERMOD para calcular as concentrações médias desse poluente, decorrentes da emissão dos caminhões movidos a Diesel, e os impactos da substituição de 100% deste combustível pelo gás natural liquefeito (GNL). Os resultados mostram que a substituição tecnológica auxilia na redução de 99% das emissões de MP₁₀ ao longo do trecho da Avenida analisado, mas são necessários outros estudos para avaliar a concentração total e outros possíveis impactos, como os efeitos na saúde da população decorrentes da exposição desse poluente nessa via.

Palavras-chave: Material particulado; AERMOD; Dispersão atmosférica; Emissões.

Abstract: The Brazilian transport system is based on the use of highways and heavy-duty trucks are the main vehicles used to transport goods, responsible for 70% of vehicular particulate matter (PM₁₀) emissions in the State of São Paulo. Therefore, the search for alternative technologies to reduce emissions from the transport sector is increasing. Considering the importance of reducing pollutants emissions and the air quality improvement in large urban centers, this research aims to calculate and evaluate the particulate matter (PM₁₀) emissions from heavy-duty trucks on an avenue (*Avenida Marginal Tietê*) in the city of São Paulo. For this, the atmospheric dispersion model AERMOD was used to calculate the average PM₁₀ concentrations emitted by heavy-duty trucks powered by diesel, and the impacts derived from the replacement of 100% of this fuel by liquefied natural gas (LNG) was evaluated. Results show that the automotive technology replacement helps to reduce 99% of PM₁₀ by the analyzed avenue, but further studies are needed to assess the total concentration and other possible impacts, such as effects on human health resulting from exposure to this pollutant on this avenue.

Keywords: Particulate matter; AERMOD; Atmospheric dispersion; Emissions.

1. Introdução

A poluição do ar é uma questão urbana enfrentada em diferentes cidades do mundo e cada vez mais estudos mostram a ligação entre a poluição do ar e o aumento de riscos para a saúde humana (FIGLIOZZI, 2017; LURIE *et al.*, 2019; ZHAO, *et al.*, 2018). A exposição a poluentes tais como óxidos de nitrogênio (NO_x), monóxido de carbono (CO), ozônio (O₃) e material particulado (MP) contribuem para um maior

número de casos de doenças respiratórias, cardiovasculares e câncer de pulmão em grandes centros urbanos (TONG *et al.*, 2020). Nesse contexto, o controle da poluição do ar pode auxiliar na redução de gastos com a saúde da população (BAYAT *et al.*, 2019) e também melhorar a qualidade de vida urbana.

Sabe-se que o transporte rodoviário de carga realizado por caminhões é responsável por 70% das emissões de MP veiculares do Estado de São Paulo (CETESB, 2020). Ademais, esse tipo de transporte consome grandes quantidades de energia. Além da proporção do consumo de petróleo, o transporte atrai preocupações devido à liberação de poluentes tóxicos no ar e pela emissão de gases de efeito estufa (GEE), tendo em vista que a maior parte da população vive em áreas urbanas (MALIK; TIWARI, 2017; ZHANG *et al.*, 2019).

A exposição a poluentes atmosféricos é um fator de risco para seres humanos e muitos estudos buscam avaliar a relação entre poluição do ar e mortalidade usando dados de concentração de poluentes de estações de monitoramento da qualidade do ar (ABE; EL KHOURI MIRAGLIA, 2016; ANDREÃO; ALBUQUERQUE; KUMAR, 2018; DE FATIMA ANDRADE *et al.*, 2012; MARTINS *et al.*, 2017; TEIXEIRA *et al.*, 2020).

No âmbito dos impactos na saúde, ABE E EL KHOURI MIRAGLIA, (2016) analisaram cenários de redução de MP, e obtiveram como resultado que na cidade de São Paulo 5 mil mortes prematuras poderiam ser evitadas e US\$ 15 bilhões economizados anualmente com despesas de saúde, se os padrões de concentração da OMS fossem alcançados. Da mesma forma, Andreão *et al.* (2018) calcularam as mortes evitáveis ao atingir os padrões de concentração de MP fino ($MP_{2,5}$) da OMS em 24 cidades brasileiras. A cidade de São Paulo, por ser a mais populosa, apresentou o maior número de mortes evitáveis, atingindo 82 mil pessoas de todas as causas em 2017. TEIXEIRA *et al.* (2020) mostraram que a substituição de caminhões movidos a diesel por GNL na frota completa evita, por um lado, as mortes por câncer de pulmão, doenças cardiovasculares e outras doenças respiratórias em idosos, mas não seria possível eliminar todas as mortes associadas a esse tipo de veículo.

Do lado dos perfis de emissões de poluentes, MARTINS *et al.* (2017) estudaram os eventos extremos de poluição atmosférica nas áreas metropolitanas do Rio de Janeiro e São Paulo, comparando a qualidade do ar de ambas as áreas metropolitanas. Os resultados mostraram que as maiores concentrações de poluentes, incluindo $MP_{2,5}$, foram mais frequentes durante o inverno.

Os caminhões pesados e semipesados destacam-se pela grande participação nas emissões de MP e NOx, sendo o último um dos poluentes precursores de MP. De acordo com a CETESB (2019a), os caminhões contribuíram com 64% da emissão de MP no Estado de São Paulo em 2018, sendo os caminhões pesados a categoria que mais emite esse poluente (28%), seguido dos caminhões semipesados (15%), caminhões leves (11%), caminhões médios (8%) e caminhões semileves (2%). O uso intensivo dessas categorias reflete na emissão desses poluentes, formados durante os processos de combustão em motores do ciclo Diesel (CETESB, 2020). Cabe ressaltar que a qualidade do ar pode mudar em virtude das condições meteorológicas, que determinam condições favoráveis, ou não, à diluição e dispersão dos poluentes (CETESB, 2019a). Dessa forma, o impacto da emissão de poluentes não varia apenas com a fonte emissora, mas depende também de como a pluma de poluente se dispersa no ar.

Uma estratégia para reduzir a emissão dos poluentes nocivos é o uso de combustíveis alternativos (QUIROS *et al.*, 2017; THIRUVENGADAM *et al.*, 2018), principalmente em substituição ao diesel. Considerando as tecnologias disponíveis no mercado para veículos pesados, o gás natural liquefeito (GNL) aponta benefícios ambientais (ARTECONI; POLONARA, 2013; YEH, 2007), como por exemplo, a combustão mais limpa, que causa quase 99% menos emissões de MP e óxido de enxofre (SOx), cerca de 80% menos NOx e 20% menos dióxido de carbono (CO₂) comparado ao diesel; além de contribuir para a diminuição de ruídos. Ainda, as reduções de emissões por transportes rodoviários podem ser aprimoradas através da mistura de biometano liquefeito no combustível (PFOSER; SCHAUER; COSTA, 2018). Estudos em busca dos impactos positivos dos avanços nas tecnologias automotivas sobre as emissões colaboraram para apontar ações que contribuem para o desenvolvimento de políticas públicas e auxílio na tomada de decisão no setor de transportes. Além disso, tais ações amparam as metas dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), principalmente as ODS 3 (Saúde e bem-estar), 11 (Cidades e comunidades sustentáveis) e 13 (Ação contra a mudança global do clima) (ONU, 2021) por meio da melhoria da eficiência energética automotiva, redução de emissão de poluentes e consequente melhorias na qualidade do ar e da saúde da população, além da redução de GEE e suas contribuições para as mudanças climáticas.

No Estado de São Paulo, destacam-se algumas áreas críticas em termos de poluição do ar, especialmente a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). Os primeiros estudos de qualidade do ar na RMSP foram realizados no final da década de 1970, quando foi criada a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

(CETESB). Naquela época, o Estado de São Paulo crescia economicamente, e, junto, surgia uma urbanização desordenada que trouxe como consequência um aumento do número de fontes de poluição atmosférica, levando a uma situação crítica em relação à qualidade do ar (ANDRADE *et al.*, 2017).

Tendo em vista que os veículos são fontes importantes de poluição do ar, compreender a magnitude da poluição à qual os humanos estão expostos é importante para determinar o efeito das emissões veiculares na qualidade do ar próximo às avenidas e rodovias (WEN *et al.*, 2017). Com base nas afirmações acima, este trabalho tem como objetivo analisar a dispersão do material particulado inalável de até 10 micrômetros de diâmetro (MP_{10}), proveniente de caminhões pesados em uma avenida da cidade de São Paulo – SP (Av. Marginal Tietê). Ademais, este estudo estima a substituição de 100% da frota de caminhões movidos a diesel por GNL no transporte rodoviário de carga.

Este artigo está dividido da seguinte forma: a seção 2 apresenta o desenvolvimento da pesquisa mostrando a metodologia, a seção 3 apresenta os resultados e as discussões; enquanto a seção 4 apresenta as conclusões.

2. Metodologia

A dispersão atmosférica dos poluentes provenientes da substituição do combustível diesel por GNL em caminhões foi avaliada a partir da análise das concentrações de MP_{10} para o ano de 2018 utilizando o modelo AERMOD (*American Meteorological Society Environmental Protection Agency Regulatory Model*). A análise das concentrações foi realizada em uma das principais avenidas da cidade de São Paulo, a Av. Marginal Tietê (via expressa), no sentido Ayrton Senna, que apresenta fluxo intenso de veículos, principalmente de caminhões, com aproximadamente 870 veículos por dia (CET, 2019). Para tanto, foi necessário coletar dados meteorológicos, dados de volumes por pontos de contagem de caminhões e fatores de emissão de MP_{10} para ambos os combustíveis. A localização dos receptores, que são os pontos de interesse no espaço nos quais queremos mensurar as concentrações de poluentes, também foram definidos. Todos esses dados foram utilizados como entrada para o modelo AERMOD.

O AERMOD é um modelo de dispersão de poluentes recomendado pela EPA (*United States Environmental Protection Agency*), que considera os efeitos da turbulência atmosférica e incorpora um algoritmo para simular os efeitos da deposição de poluentes, mesmo em terrenos complexos. Por isso, o AERMOD é considerado o melhor modelo de dispersão gaussiana, cuja formulação é baseada nos princípios da camada limite planetária (CLP) (EPA, 2005). Por esse motivo, a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), assim como outros órgãos ambientais, recomenda a utilização desse modelo para simular concentrações ambientais para períodos de curta e longa exposição (CETESB, 2019b), a fim de avaliar o licenciamento ambiental de novos empreendimentos. O AERMOD é um modelo de dispersão de pluma gaussiana, o que permite descrever os processos de difusão turbulenta que ocorrem na atmosfera e calcular a concentração média de poluentes em função do que foi emitido, da altura que essa emissão aconteceu e das condições atmosféricas.

Diversas pesquisas têm mostrado a importância desses estudos para previsão de concentrações de poluentes no ar e para a implementação de políticas públicas. TEZEL-OGUZ *et al.* (2020) utilizaram o AERMOD para determinar a concentração de NOx na qualidade do ar e os impactos na saúde humana, e seus resultados mostraram que 10,1% da população que vive no distrito de Ortahisar, na Turquia, foi exposta a concentrações de NOx relacionadas ao tráfego superiores ao valor limite regulatório. PERUGU; WEI; YAO, (2016) estudaram o impacto do movimento de caminhões pesados na poluição geral por $MP_{2,5}$ em áreas urbanas utilizando o AERMOD. Os resultados do modelo mostraram que 71% das emissões de $MP_{2,5}$ de origem móvel urbana são causadas por caminhões e 21% das concentrações de $MP_{2,5}$ do ambiente urbano geral podem ser atribuídas a caminhões em Cincinnati, nos EUA. GULIA; SHRIVASTAVA; NEMA, (2015) avaliaram a qualidade do ar urbano na Índia utilizando o AERMOD para prever NOx, SO_2 e MP_{10} . Os resultados mostraram que o modelo apresentou resultados satisfatórios de acordo com a comparação observada usando métodos estatísticos. Dentre as principais fontes de poluição do ar identificadas, o transporte motorizado e a suspensão de poeira nas estradas destacam-se na emissão de MP_{10} .

A **Figura 1** mostra o fluxograma das etapas da modelagem para a obtenção das concentrações de poluentes, que serão descritas abaixo.

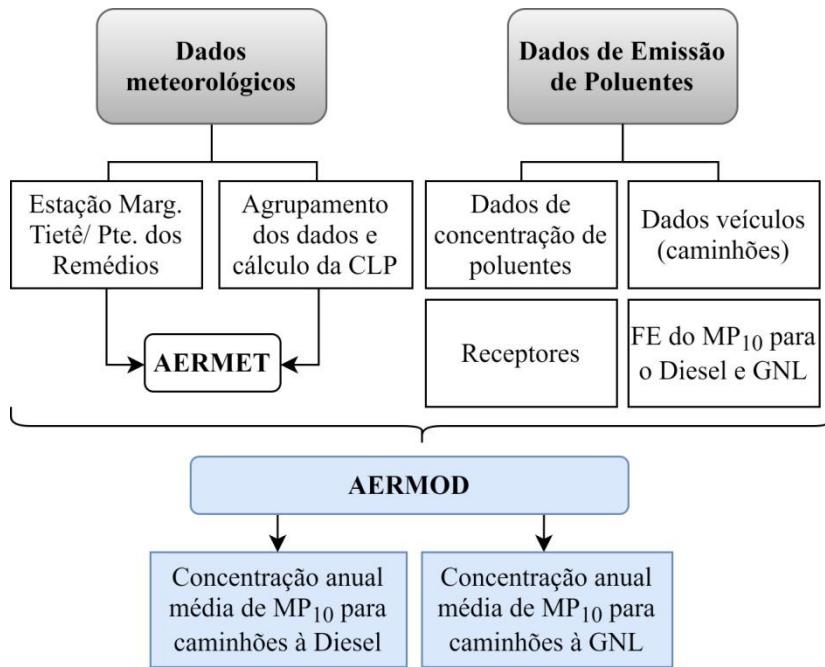


Figura 1: Fluxograma da modelagem.

2.1. Dados meteorológicos

Para o processamento dos dados meteorológicos pelo pré-processador AERMET (AERMOD *Meteorological Preprocessor*), foram utilizados os dados disponíveis pela rede local de monitoramento da qualidade do ar da CETESB (CETESB, 2018). A estação meteorológica selecionada foi a Marginal Tietê/Ponte dos Remédios, devido a sua proximidade (cerca de 30m), para analisar a tendência e a variabilidade da concentração de poluentes de MP₁₀.

O processamento das informações meteorológicas ocorreu em três estágios: 1) Extração e tratamento dos dados meteorológicos, como dados de superfície e dados específicos do local (**Tabela 1**); 2) Agrupamento dos dados da superfície e do ar superior, com os dados específicos do local em períodos de 24 horas; 3) Leitura dos arquivos de dados agrupados e cálculo dos parâmetros da CLP exigidos pelo AERMOD (EPA, 2004a).

Tabela 1: Parâmetros utilizados no estágio 1

Parâmetros	Dados (médias horárias)	Fonte
Temperatura do ar	Período 01/01/2018 até 31/12/2018	Estação meteorológica Marginal Tietê – Ponte dos Remédios (CETESB, 2018)
Umidade relativa do ar	Período 01/01/2018 até 31/12/2018	Estação meteorológica Marginal Tietê – Ponte dos Remédios (CETESB, 2018)
Velocidade do vento	Período 01/01/2018 até 31/12/2018	Estação meteorológica Marginal Tietê – Ponte dos Remédios (CETESB, 2018)
Direção do vento	Período 01/01/2018 até 31/12/2018	Estação meteorológica Marginal Tietê – Ponte dos Remédios (CETESB, 2018)
Altura da estação meteorológica	3,5 m	Estação meteorológica Marginal Tietê – Ponte dos Remédios (CETESB, 2018)
Radiação solar	Período 01/01/2018 até 31/12/2018	Estação meteorológica Marginal Tietê – Ponte dos Remédios (CETESB, 2018)
Altura da CLP	Altura Climatológica calculada por Sánchez <i>et al.</i> (SÁNCHEZ <i>et al.</i> , 2020)	Sánchez <i>et al.</i> (SÁNCHEZ <i>et al.</i> , 2020)

Com os dados fornecidos acima, o modelo agrupa os arquivos e calcula os parâmetros da CLP, como velocidade de fricção de superfície, altura de mistura e comprimento de Monin Obukhov, e assim, produz os arquivos de entrada para o AERMOD (EPA, 2005).

Além disso, como o vento exerce papel fundamental para a dispersão de poluentes, foi elaborada a rosa dos ventos com os dados de direção e velocidade do vento, utilizados pela simulação do AERMOD.

2.2. Emissão de poluentes

Considerando a disponibilidade de dados e a importância da cidade de São Paulo para o estudo de dispersão atmosférica, este trabalho teve como foco a Av. Marginal Tietê (via expressa), sentido Ayrton Senna, que apresenta fluxo intenso de caminhões, com aproximadamente 870 veículos por dia/faixa (CET, 2019). O trecho considerado liga a Ponte do Limão até a Ponte da Vila Guilherme, o qual foi dividido em quatro partes para facilitar a análise, devido às curvas da avenida. A **Tabela 2** mostra os trechos, seu comprimento, bem como a largura da avenida.

Tabela 2: Trechos da Avenida Marginal Tietê

Trechos	Comprimento (km)	Largura (km)
Ponte do limão - Ponte da Casa Verde	1,278	0,002
Ponte da Casa Verde - Ponte das Bandeiras	2,408	0,002
Ponte das Bandeiras - Ponto 1	1,170	0,002
Ponto 1 - Ponte da Vila Guilherme	8,80	0,002

A **Figura 2** mostra a área de estudo, bem como a localização e disposição dos receptores ao longo da avenida.

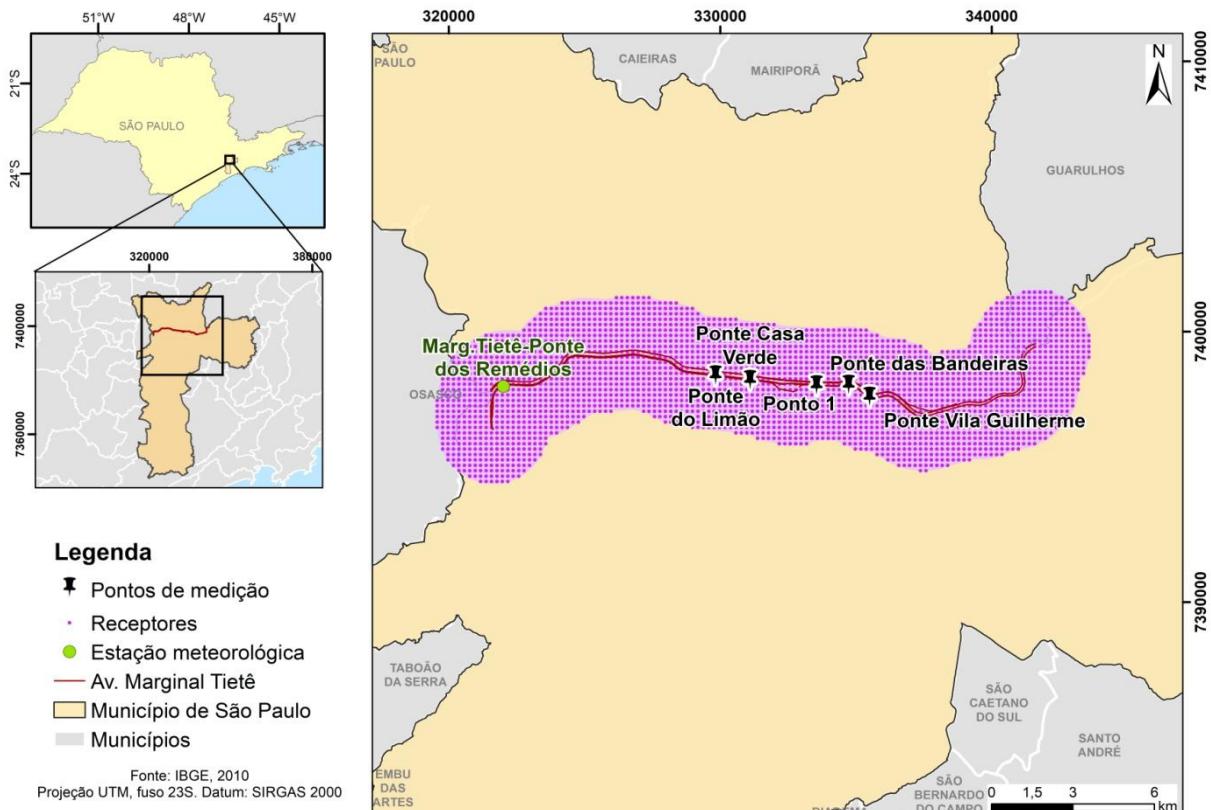


Figura 2: Área de estudo e localização dos receptores.

Para calcular a taxa de emissão diária foram utilizados os dados de contagem de veículos do relatório de Mobilidade no Sistema Viário Principal de 2018, disponibilizado pela Companhia de Engenharia de Tráfego (CET-SP) (CET, 2019), a partir da média do número de caminhões entre os volumes das horas mais carregadas no período da manhã e da tarde, correspondendo ao valor de 273,5 caminhões/dia, além dos fatores de emissão de MP_{10} e largura da via, conforme representado na Equação 1.

$$T_c = \frac{N.FE_c.C_t}{3600.A_t} \quad \text{Eq. (1)}$$

Onde: T_c é a taxa de emissão de MP_{10} para o combustível (c) em $g\ s^{-1}\ m^{-2}$, N é o número médio de caminhões percorrendo o trecho por hora, FE_c é o fator de emissão de MP_{10} do combustível (c) em $g\ km^{-1}$, C_t é o comprimento do trecho de via (t) em km, A_t é a área do trecho de via (t) em m^2 , calculada com o comprimento do trecho em m e a largura da via no trecho em m, segundo a **Tabela 2**. O valor de 3600 converte a emissão por hora em emissão por segundo. Nesse estudo, por ser uma primeira aproximação, será considerada uma única taxa média de emissão durante todo o período.

Os dados do fator de emissão de MP_{10} para veículos pesados movidos a diesel foram obtidos da CETESB (CETESB, 2018), e os veículos pesados movidos a GNL foram obtidos de MOUETTE *et al.* (2019). Uma média de $0,07\ g\ MP_{10}\ km^{-1}$ foi usada para o Diesel, enquanto uma média de $0,0002\ g\ MP_{10}\ km^{-1}$ foi usada para o GNL.

Trabalhos experimentais (ADAM *et al.*, 2017; ALAMIA *et al.*, 2016; OGUNKOYA; FANG, 2015) com diferentes tipos de combustíveis foram realizados em muitos países, mas cada um possui características específicas ligadas às características do motor, sua vida útil, manutenção, assim como à qualidade do combustível utilizado. Porém, alguns artigos utilizam esses resultados como ponto de partida para outras pesquisas, sem ponderar as características específicas de cada local.

2.3. AERMOD

Para a simulação pelo AERMOD foram identificadas as latitudes e longitudes dos pontos iniciais e finais de cada trecho, inseridos os valores das taxas de emissão diárias para cada combustível, altura da emissão do escapamento dos caminhões (0,5 m) e a largura da via (20 m) (**Figura 2**). Com isso, a simulação foi realizada na escala de tempo anual para o período de 2018, contabilizando o total de 8.744 horas. Apenas 0,18% dos dados meteorológicos foram considerados inválidos, pois apresentaram ausência de dados de algum parâmetro utilizado.

Para a localização dos receptores, foi considerado um *buffer* de 2000 metros em torno da Av. Marginal Tietê, utilizando uma grade cartesiana com 200 metros entre cada ponto da grade. Sendo assim, foram colocados 2767 receptores para cobrir toda a área. Além disso, cabe ressaltar que a substituição do combustível diesel pelo GNL foi de 100% para a frota de caminhões.

O modelo foi processado para calcular as concentrações de MP_{10} para ambos os combustíveis (diesel e GNL) em condições planas para o terreno, pois o local não apresenta variações de altitude complexas.

Por se tratar de um modelo de dispersão estacionário, considera-se que as características da dispersão são constantes em todo o período de uma hora. Os pressupostos são baseados na equação de pluma gaussiana, assumindo que a emissão é contínua. Dessa forma, durante o trajeto do poluente da fonte até o receptor, a massa emitida para a atmosfera continua sendo a mesma, assim como as condições meteorológicas no tempo do trajeto (EPA, 2004b).

A equação geral de concentração, que se aplica em condições estáveis ou convectivas, é dada por:

$$C_T\{x_r, y_r, z_r\} = f \cdot C_{c,s}\{x_r, y_r, z_r\} + (1 - f) \cdot C_{c,s}\{x_r, y_r, z_p\} \quad \text{Eq. (2)}$$

Onde:

$C_T\{x_r, y_r, z_r\}$ é a concentração total ($g\ m^{-3}$);

f é a função de ponderação do estado da pluma (sem dimensão);

$C_{c,s}\{x_r, y_r, z_r\}$ é a contribuição da concentração do estado horizontal da pluma (c e s se referem à condição convectiva e estável, respectivamente) ($g\ m^{-3}$);

$\{x_r, y_r, z_r\}$ é a representação de coordenadas de um receptor (z_r é a altura do receptor acima da base da fonte local) (m);

$C_{c,s}\{x_r, y_r, z_p\}$ é a contribuição da pluma vertical ($g\ m^{-3}$);

z_p é a altura do “mastro” do receptor - a altura de um receptor acima do terreno local (m) - para terrenos planos $z_p = z_r$, deixando apenas a contribuição da pluma horizontal;

3. Resultados e discussões

A dispersão atmosférica de MP_{10} emitida por caminhões na Av. Marginal Tietê (via expressa), sentido Ayrton Senna, para o ano de 2018, foi simulada por meio do AERMOD. Cabe ressaltar que foram consideradas apenas as concentrações de MP_{10} emitidas diretamente do tráfego de caminhões, não sendo considerada a formação de poluentes secundários e nem emissão de outras fontes. A **Figura 3** mostra a média de todas as concentrações horárias calculadas de MP_{10} para o ano de 2018, aqui chamada de média anual, proveniente de caminhões movidos a diesel.

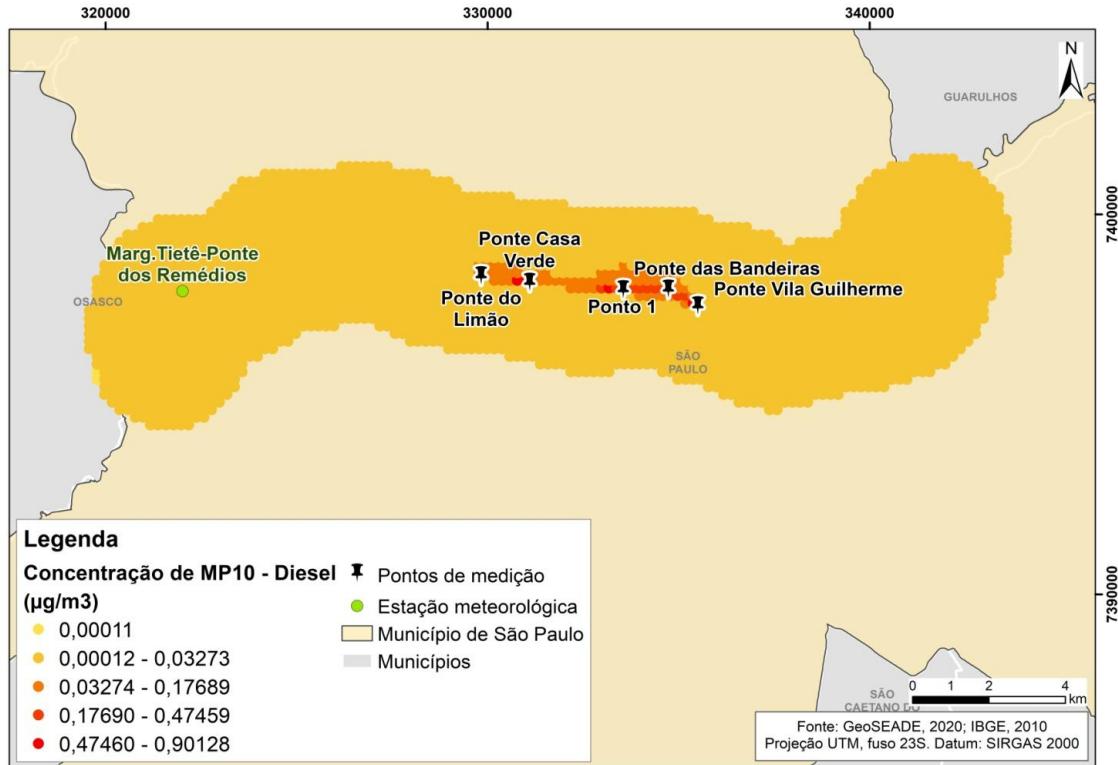


Figura 3: Concentração média anual (2018) de MP_{10} proveniente de caminhões movidos a diesel.

Os resultados mostram que as concentrações variam de um local para o outro, sendo a menor concentração correspondendo a $0,00011 \mu\text{g m}^{-3}$ em dois receptores, e a maior $0,90128 \mu\text{g m}^{-3}$ em um receptor. Como era esperado de um modelo de pluma gaussiana, as concentrações mais altas estão localizadas nos trechos onde foram feitas as contagens de caminhões, próximas à Av. Marginal Tietê. No entanto, apesar dos valores mostrados na **Figura 3** representarem a concentração média anual de MP para o ano de 2018, quando são avaliados os dados horários na modelagem realizada, a concentração horária máxima encontrada no período foi de $6,84 \mu\text{g m}^{-3}$, no dia 2/10/2018 às 21h, indicando uma contribuição substancial para a poluição atmosférica local quando as condições meteorológicas não favorecem a dispersão. Com relação à dispersão, nota-se que as concentrações diminuem à medida que a dispersão aumenta, o que significa que quanto mais longe da avenida, maior será a dispersão da pluma de poluente e consequentemente menores as concentrações de MP_{10} . Dessa forma, uma avaliação futura que pode ser desenvolvida é sobre o impacto que essas concentrações têm na população lindeira à avenida (aproximadamente 242 mil pessoas no trecho analisado) (IBGE, 2021), já que os impactos e efeitos nocivos à saúde dependem diretamente do nível de exposição ao poluente. Cabe ressaltar também que, além do nível de exposição, a concentração de MP_{10} avaliada foi apenas àquela decorrente dos gases de exaustão dos motores de caminhões. Portanto, outras fontes que contribuem para a concentração total não foram consideradas.

A fim de avaliar o impacto na concentração de poluentes decorrente de 100% da substituição da tecnologia automotiva, o modelo foi simulado considerando o uso de GNL. A **Figura 4** mostra os resultados das concentrações médias anuais para o GNL considerando as emissões de MP_{10} , com base nas mesmas condições e período da simulação de caminhões movidos a diesel.

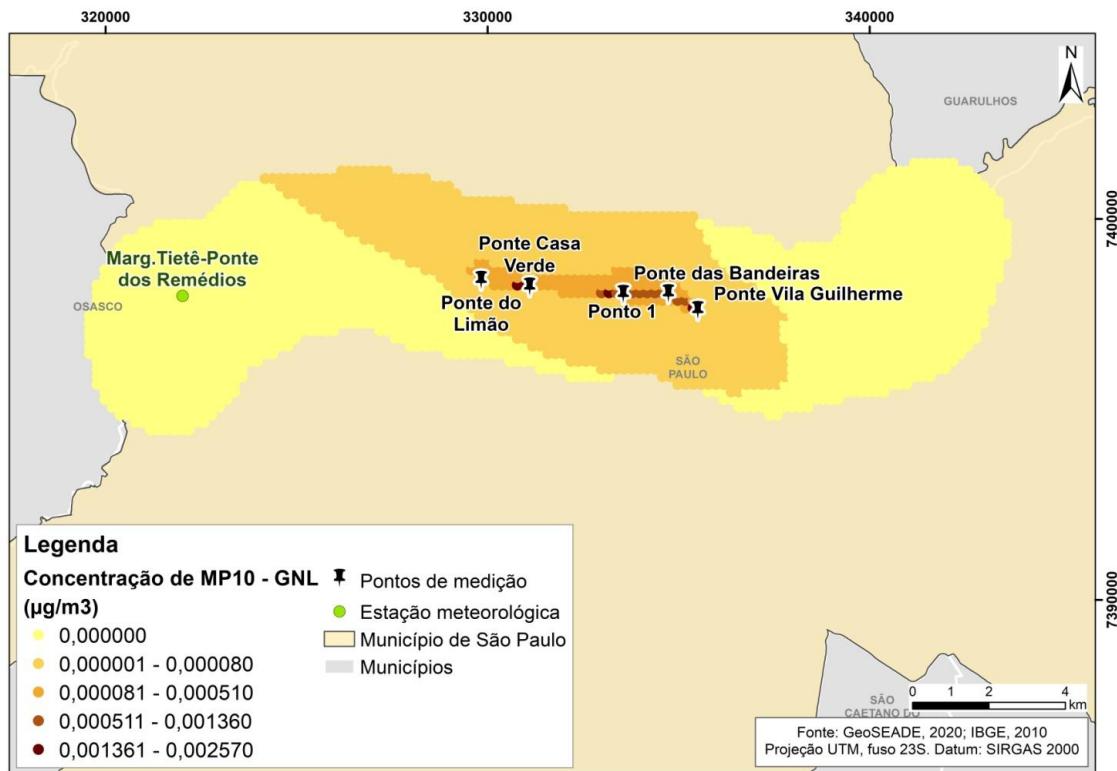


Figura 4: Concentração média anual (2018) de MP₁₀ proveniente de caminhões movidos a GNL.

Os resultados mostram que as concentrações variam de um lugar para o outro, sendo a menor concentração correspondendo a 0 $\mu\text{g m}^{-3}$ e a maior 0,002570 $\mu\text{g m}^{-3}$. A cor amarelo-clara representa os 1766 receptores que tiveram a concentração de MP₁₀ reduzida para 0 $\mu\text{g m}^{-3}$, evidenciando uma redução do poluente quando é feita a substituição de combustível para a frota de caminhões. Cabe ressaltar que a emissão é proveniente somente dos caminhões no trecho analisado, excluindo outros tipos de fonte. De maneira semelhante ao diesel, as maiores concentrações de MP₁₀ para caminhões movidos a GNL, estão localizadas próximas à avenida onde foram feitas as medidas de fluxo de veículos. A máxima concentração horária encontrada com o uso do GNL foi também muito menor que para o diesel, chegando a apenas 0,01958 $\mu\text{g m}^{-3}$ no dia 2/10/2018 às 21h.

Nota-se que o padrão de concentração de MP₁₀ nos receptores é diretamente influenciado pelo vento, assim como a dispersão de poluentes, como mostra a **Figura 5**.

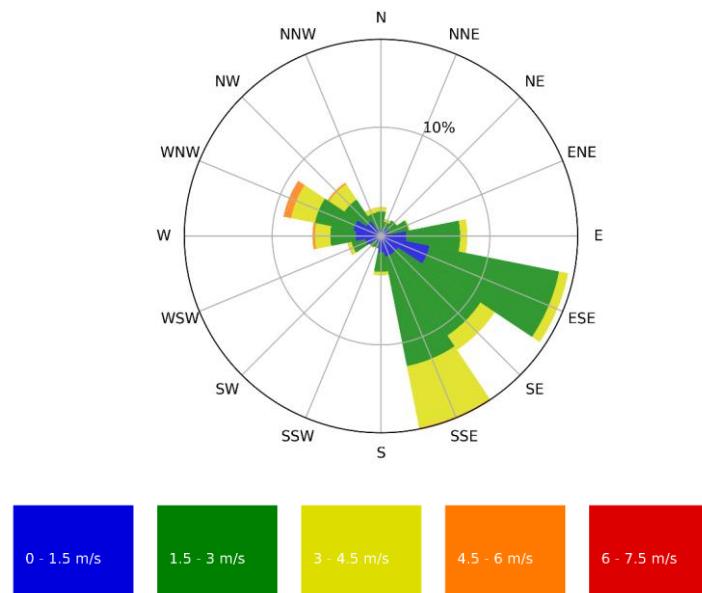


Figura 5: Rosa dos ventos da estação meteorológica Marginal Tietê/Ponte dos Remédios, 2018 da CETESB.

Espera-se que a maior concentração seja encontrada próxima à avenida, que é a fonte de poluição. Como a direção predominante do vento está alinhada ao eixo sudeste-noroeste, a dispersão de poluentes ocorre nesse sentido. O rótulo de 10% da circunferência permite verificar as medidas de direção de vento e a frequência com que ocorre. Desta forma, os ventos de WNW acontecem com menos de 10% das vezes, enquanto SSE e ESE ocorrem perto de 20%. Por isso, à medida que ocorre o afastamento dos trechos, menores são as concentrações, e maior é a dispersão atmosférica, contribuindo para uma melhoria da qualidade do ar local.

Em relação às condições atmosféricas do período analisado, de acordo com a CETESB (2019a), o ano de 2018 apresentou um inverno com condições meteorológicas desfavoráveis para a dispersão atmosférica, com 22% de dias desfavoráveis à dispersão de poluentes no período de maio a setembro. Essa situação está relacionada com o registro de chuvas inferiores às médias climatológicas mensais esperadas nos meses de maio, junho e julho. Além disso, nesse período ocorreram dias com baixos percentuais de umidade relativa do ar, que também contribuíram para condições mais desfavoráveis à dispersão. As concentrações mais altas dos poluentes, com exceção do ozônio, ocorrem, geralmente, no período compreendido entre os meses de maio a setembro, devido à maior ocorrência de inversões térmicas em baixos níveis, alta porcentagem de calmaria, ventos fracos e baixos índices pluviométricos (CETESB, 2019a).

Vale ressaltar que essa simulação é uma primeira aproximação para avaliar a contribuição de MP_{10} emitido pelos caminhões que circulam no trecho analisado da Av. Marginal Tietê, sem levar em consideração outros tipos de fontes emissoras, e não considera a emissão fora da avenida, além de não simular a formação de poluentes secundários. Outra questão a ser considerada é que os resultados de concentração simulados pelo AERMOD dependem diretamente do fator de emissão dos veículos pesados. Tendo em vista o setor e as tecnologias para o transporte rodoviário de cargas, existem algumas lacunas sobre o fator de emissão de poluentes e como esses valores são utilizados na comunidade científica. Além disso, os fatores de emissão veiculares estão diretamente ligados às características do motor e sua vida útil e manutenção, assim como também à qualidade do combustível utilizado. Como mencionado anteriormente, esse estudo utilizou um fator de emissão médio para fazer os cálculos e encontrar as concentrações de poluentes e estudo futuros poderão utilizar uma variação do fluxo de veículos para melhor estimar a variabilidade temporal dessa concentração.

Em relação a falta de dados e limitações de trabalhos, MACHADO *et al.* (2021) fizeram uma revisão sistemática discutindo as limitações de dados de entrada em estudos voltados às tecnologias de transporte rodoviário de mercadorias interessados na redução de GEE e poluentes. Os resultados mostraram que as novas tecnologias podem apresentar inconsistências em dados ambientais e desempenho econômico, e que a falta de dados de entrada existe. Entretanto, para que os estudos sejam realizados, é necessário utilizar estimativas ou dados disponíveis na literatura. Com relação às incertezas associadas aos modelos de qualidade do ar, HANNA *et al.* (2007) estimaram os efeitos das incertezas nos dados de entrada de emissões, nos dados meteorológicos e nos parâmetros dos modelos de dispersão, utilizando o método probabilístico de Monte Carlo baseado em amostragem aleatória e massivas. Os resultados apontam que as incertezas nos dados de entrada das emissões contribuem mais para a incerteza total do que aquelas provenientes dos dados de entrada meteorológicos.

4. Conclusões

Este trabalho avaliou a dispersão de MP_{10} considerando as emissões de caminhões em uma avenida da cidade de São Paulo, a Av. Marginal Tietê (via expressa), sentido Ayrton Senna. Além disso, simulou a substituição de combustível, do diesel pelo GNL para 100% da frota de caminhões. Os resultados mostraram a distribuição espacial desse poluente, destacando a influência do vento para a dispersão atmosférica, e mostrando que as maiores emissões relacionadas aos combustíveis diesel e GNL estão concentradas nos receptores localizados próximos ao trecho medido na avenida, enquanto as menores concentrações ocorrem à medida em que há um afastamento do trecho estudado. Além disso, através dos resultados encontrados pelo modelo, a substituição do diesel pelo GNL pode auxiliar na redução de material particulado, chegando a 99% de redução.

Ainda, enfatiza-se a importância de medidas de redução de emissões veiculares para melhoria da qualidade do ar, principalmente nos centros urbanos, e também poderia reduzir mortes prematuras e economizar com despesas de saúde (ABE; EL KHOURI MIRAGLIA, 2016; ANDREÃO; ALBUQUERQUE; KUMAR, 2018). As características dos combustíveis vêm melhorando para atingir os

limites estabelecidos pelos programas de controle, mas, ainda assim, há uma preferência por parte da legislação pelo desenvolvimento e subsídio de combustíveis usuais que possam fornecer segurança energética, em vez de opções mais sustentáveis (TEIXEIRA *et al.*, 2020).

Em relação à qualidade do ar, a qual é diretamente influenciada pela distribuição e intensidade das emissões de poluentes atmosféricos e que sofre forte influência das condições meteorológicas para a dispersão atmosférica, cabe destacar alguns parâmetros que favorecem altos índices de poluição, como a alta porcentagem de calmaria, ventos fracos e inversões térmicas a baixa altitude. Todos estes fatores podem contribuir para que os poluentes fiquem próximos à superfície, prejudicando a dispersão dos poluentes (CETESB, 2019a).

Por fim, essa pesquisa é relevante para compreender a relação entre a dinâmica de tráfego de caminhões e a qualidade do ar de centros urbanos. Para estudos futuros, é relevante avaliar a concentração total de material particulado, considerando outras fontes e outros possíveis impactos, como os efeitos na saúde da população decorrentes da exposição a esse poluente nessa via.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio do “Centro de Pesquisa para Inovação em Gases de Efeito Estufa (RCGI) localizado na Universidade de São Paulo (USP) e financiado pela FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Bolsa FAPESP Proc. 2014/50279 -4) e Shell Brasil, e a importância estratégica do apoio dado pela ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) através do incentivo regulatório de P&D. A pesquisadora Ana Carolina Rodrigues Teixeira agradece especialmente o atual apoio financeiro da bolsa Processo 2019 / 09242-3 da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP. Flávia N. D. Ribeiro e Dominique Mouette foram financiadas com apoio à pesquisa processo nº 2017/20148-3, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

Referências

- ABE, Karina Camasmie; EL KHOURI MIRAGLIA, Simone Georges. Health impact assessment of air pollution in São Paulo, Brazil. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, [S. l.], v. 13, n. 7, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijerph13070694>
- ADAM, Abdullah *et al.* Analysis of combustion characteristics, engine performance and exhaust emissions of diesel engine fueled with upgraded waste source fuel. **International Journal of Hydrogen Energy**, [S. l.], v. 42, n. 28, p. 17993–18004, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.04.021>
- ALAMIA, Alberto *et al.* Well-to-wheel analysis of bio-methane via gasification, in heavy duty engines within the transport sector of the European Union. **Applied Energy**, [S. l.], v. 170, n. 2016, p. 445–454, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.001>
- ANDRADE, Maria de Fatima *et al.* Air quality in the megacity of São Paulo: Evolution over the last 30 years and future perspectives. **Atmospheric Environment**, [S. l.], v. 159, p. 66–82, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.03.051>
- ANDREÃO, Willian L.; ALBUQUERQUE, Taciana T. A.; KUMAR, Prashant. Excess deaths associated with fine particulate matter in Brazilian cities. **Atmospheric Environment**, [S. l.], v. 194, n. September, p. 71–81, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.09.034>
- ARTECONI, a.; POLONARA, F. LNG as vehicle fuel and the problem of supply: The Italian case study. **Energy Policy**, [S. l.], v. 62, p. 503–512, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.08.016>
- BAYAT, Reza *et al.* Health impact and related cost of ambient air pollution in Tehran. **Environmental Research**, [S. l.], v. 176, n. June, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108547>
- BIN ZHAO, HAOTIAN ZHENG, SHUXIAO WANG, KIRK R. SMITH, XILUA, KRISTIN AUNAN, YU GU, YUAN WANG, DIAN DING, JIA XING, XIAO FU, XUDON YANG, KUO-NAN LIOU, and Jiming Hao. Change in household fuels dominates the decrease in PM2.5 exposure and premature mortality in China in 2005-2015. **PNAS**, [S. l.], v. 115, n. 49, p. 12401–12406, 2018.

CET. Mobilidade no Sistema Viário Principal Volumes-2018. São Paulo: Companhia de Engenharia de Tráfego, 2019.

CETESB. Emissões Veiculares no Estado de São Paulo 2017. São Paulo: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2018.

CETESB. Qualidade do ar no Estado de São Paulo 2018. São Paulo: *[s. n.]*, 2019 a.

CETESB. Manual para elaboração de estudos ambientais com AIA v.02_19. São Paulo: *[s. n.]*, 2019 b. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/licenciamentoambiental/wp-content/uploads/sites/32/2019/12/Manual_EIA_RAP_v_02.pdf

CETESB. Qualidade do ar no Estado de São Paulo 2018. São Paulo: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2019 c. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/publicacoes-relatorios/>

CETESB. Emissões veiculares no Estado de São Paulo 2019. São Paulo: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2020. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/publicacoes-relatorios/>

DE FATIMA ANDRADE, Maria *et al.* Vehicle emissions and PM 2.5 mass concentrations in six Brazilian cities. **Air Quality, Atmosphere and Health**, *[S. l.]*, v. 5, n. 1, p. 79–88, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11869-010-0104-5>

EPA. User's Guide for the AERMOD Meteorological Preprocessor (AERMET). **Research Triangle Park, NC, Office of Air Quality**, *[S. l.]*, p. 310, 2004 a. Disponível em: <https://doi.org/EPA-454/B-03-002>

EPA. **AERMOD: Description of Model Formulation.** North Carolina: U.S. Environmental Protection Agency (EPA), 2004 b.

EPA. **Revision to the Guideline on Air Quality Models: Adoption of a Preferred General Purpose (Flat and Complex Terrain) Dispersion Model and Other Revisions.** North Carolina: U.S Environmental Protection Agency (EPA), 2005. Disponível em: https://www3.epa.gov/ttn/scram/guidance/guide/appw_05.pdf

FIGLIOZZI, Miguel A. Lifecycle modeling and assessment of unmanned aerial vehicles (Drones) CO 2 e emissions. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, *[S. l.]*, v. 57, p. 251–261, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.09.011>

GULIA, Sunil; SHRIVASTAVA, Akarsh; NEMA, A. K. Assessment of Urban Air Quality around a Heritage Site Using AERMOD : A Case Study of Amritsar City , India. **Environ Model Assess**, *[S. l.]*, p. 599–608, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10666-015-9446-6>

HANNA, Steven R. *et al.* Uncertainties in air toxics calculated by the dispersion models AERMOD and ISCST3 in the Houston ship channel area. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, *[S. l.]*, v. 46, n. 9, p. 1372–1382, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/JAM2540.1>

IBGE. **Censo 2010.** *[s. l.]*, 2021. Disponível em: <https://mapasinterativos.ibge.gov.br/grade/default.html>. Acesso em: 4 set. 2021.

LURIE, Kelly *et al.* PM 2.5 in a megacity of Asia (Karachi): Source apportionment and health effects. **Atmospheric Environment**, *[S. l.]*, v. 202, n. June 2018, p. 223–233, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.01.008>

MACHADO, Pedro G. *et al.* Review of life cycle greenhouse gases, air pollutant emissions and costs of road medium and heavy-duty trucks. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment**, *[S. l.]*, v. 10, n. 4, p. 1–18, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/wene.395>

MALIK, Leeza; TIWARI, Geetam. Assessment of interstate freight vehicle characteristics and impact of future emission and fuel economy standards on their emissions in India. **Energy Policy**, *[S. l.]*, v. 108, n. May, p. 121–133, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.05.053>

MARTINS, Leila Droprinchinski *et al.* Extreme value analysis of air pollution data and their comparison between two large urban regions of South America. **Weather and Climate Extremes**, [S. l.], v. 18, n. October, p. 44–54, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wace.2017.10.004>

MOUETTE, Dominique *et al.* Costs and emissions assessment of a Blue Corridor in a Brazilian reality: The use of liquefied natural gas in the transport sector. **Science of the Total Environment**, [S. l.], v. 668, p. 1104–1116, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.255>

OGUNKOYA, Dolanimi; FANG, Tiegang. Engine performance, combustion, and emissions study of biomass to liquid fuel in a compression-ignition engine. **Energy Conversion and Management**, [S. l.], v. 95, p. 342–351, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.02.041>

ONU. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. [s. l.], 2021. Disponível em: <https://odsbrasil.gov.br>. Acesso em: 10 maio. 2021.

PERUGU, Harikishan; WEI, Heng; YAO, Zhuo. Integrated data-driven modeling to estimate PM2.5 pollution from heavy-duty truck transportation activity over metropolitan area. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, [S. l.], v. 46, p. 114–127, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.03.013>

PFOSER, Sarah; SCHAUER, Oliver; COSTA, Yasel. Acceptance of LNG as an alternative fuel: Determinants and policy implications. **Energy Policy**, [S. l.], v. 120, n. May, p. 259–267, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.05.046>

QUIROS, David C. *et al.* Greenhouse gas emissions from heavy-duty natural gas, hybrid, and conventional diesel on-road trucks during freight transport. **Atmospheric Environment**, [S. l.], v. 168, p. 36–45, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.08.066>

SÁNCHEZ, Maciel Piñero *et al.* Rawinsonde - Based Analysis of the Urban Boundary Layer in the Metropolitan Region of São Paulo , Brazil. **Earth and Space Science**, [S. l.], 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2019EA000781>

TEIXEIRA, Ana Carolina Rodrigues *et al.* PM emissions from heavy-duty trucks and their impacts on human health. **Atmospheric Environment**, [S. l.], 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117814>

TEZEL-OGUZ, Melike Nese *et al.* Application of reduction scenarios on traffic-related NOx emissions in Trabzon, Turkey. **Atmospheric Pollution Research**, [S. l.], n. March, p. 1–11, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.06.014>

THIRUVENGADAM, Arvind *et al.* Natural gas vehicles in heavy-duty transportation-A review. **Energy Policy**, [S. l.], v. 122, n. August, p. 253–259, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.07.052>

TONG, Ruipeng *et al.* Health effects of PM2.5 emissions from on-road vehicles during weekdays and weekends in Beijing, China. **Atmospheric Environment**, [S. l.], v. 223, p. 117258, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117258>

WEN, Dongqi *et al.* Near-roadway monitoring of vehicle emissions as a function of mode of operation for light-duty vehicles. **Journal of the Air & Waste Management Association**, [S. l.], v. 67, n. 11, p. 1229–1239, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10962247.2017.1330713>

YEH, Sonia. An empirical analysis on the adoption of alternative fuel vehicles: The case of natural gas vehicles. **Energy Policy**, [S. l.], v. 35, n. 11, p. 5865–5875, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.06.012>

ZHANG, Yong *et al.* Analyzing truck fleets' acceptance of alternative fuel freight vehicles in China. **Renewable Energy**, [S. l.], v. 134, p. 1148–1155, 2019. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.016>



Este artigo é distribuído nos termos e condições do *Creative Commons Attributions/Atribuição-NãoComercial-Compartilhável* (CC BY-NC-SA).