



UFRPE

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

FERNANDO LEITE NUNES DA COSTA

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA DISPERSÃO DE
POLUENTES ATMOSFÉRICOS APLICADAS A UMA VIA
URBANA, UTILIZANDO O MODELO HYSPLIT

RECIFE - PE
AGOSTO/2023

FERNANDO LEITE NUNES DA COSTA

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA DISPERSÃO DE
POLUENTES ATMOSFÉRICOS APLICADAS A UMA VIA
URBANA, UTILIZANDO O MODELO HYSPLIT

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal Rural de Pernambuco, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental. Área de concentração: Tecnologia e Gestão do Meio Ambiente. Linha de Pesquisa: Controle e Remediação da Poluição.

Orientadora: Prof.^a Dra. Marilda Nascimento Carvalho

Coorientador: Prof. Dr. Glauber Lopes Mariano

RECIFE – PE
AGOSTO/2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C837m

Costa, Fernando Leite Nunes da

Modelagem e simulação da dispersão de poluentes atmosféricos aplicadas a uma via urbana, utilizando o modelo HYSPLIT / Fernando Leite Nunes da Costa. - 2023.
81 f. : il.

Orientadora: Marilda Nascimento Carvalho.

Coorientador: Glauber Lopes Mariano.

Inclui referências e anexo(s).

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Recife, 2023.

1. Poluição do ar. 2. Inventário de emissão veicular. 3. Estação de monitoramento. 4. Concentração de poluição. 5. Trajetórias do ar. I. Carvalho, Marilda Nascimento, orient. II. Mariano, Glauber Lopes, coorient. III. Título

CDD 620.8

FERNANDO LEITE NUNES DA COSTA

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA DISPERSÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS
APLICADAS A UMA VIA URBANA, UTILIZANDO O MODELO HYSPLIT

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal Rural de Pernambuco, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental. Área de concentração: Tecnologia e Gestão do Meio Ambiente. Linha de Pesquisa: Controle e Remediação da Poluição.

Aprovado em 31 de agosto de 2023.

Prof.^a Dra. MARILDA NASCIMENTO CARVALHO (PPEAMB/UFRPE)
Presidente da Banca e Orientadora

Prof. Dr. GLAUBER LOPES MARIANO (ICAT/UFAL)
Coorientador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. SÉRGIO LUCENA (DEQ /UFPE)
Examinador Externo

Prof. Dr. ROMILDO MORANT DE HOLANDA (PPEAMB/UFRPE)
Examinador Interno

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação a todos que de alguma forma contribuíram ou pretendem contribuir para uma sociedade melhor, principalmente para aqueles que se esforçam direta e indiretamente, almejando a um meio ambiente com melhor qualidade do ar.

AGRADECIMENTOS

A Deus, primeiramente, pela oportunidade da vida e pela capacidade transformadora de aprendizado nessa trajetória.

Agradeço enormemente a minha família, em especial, a Ari por me apoiar em minhas escolhas e ajudar, mesmo que reclamando, nas horas que mais preciso. A minha mãe, por ser especial em minha vida. Além do meu pai, que não está em corpo entre nós, mas que sei que estaria feliz pela minha conquista, como sempre ficava. As minhas irmãs, pelas brincadeiras descabidas, mas sempre respeitando meus objetivos e, da forma delas, me apoiando. Obrigado a todos pelo apoio e conforto nos momentos em que mais precisei. Amo vocês!

À Universidade Federal Rural de Pernambuco e ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental – PPEAMB da Universidade Federal Rural de Pernambuco por todo suporte técnico e científico ao longo dessa jornada.

A todos os professores que colaboraram com a minha formação no percurso do mestrado, em especial, a minha orientadora, Dra. Marilda Nascimento Carvalho pela colaboração grandiosa neste trabalho, pela paciência nos momentos difíceis, pela empolgação de realizar um bom trabalho e por me oportunizar a experiência com essa área de investigação. Gratidão sempre!

Ao meu coorientador o professor Dr. Glauber Lopes Mariano que foi fundamental para a concretização deste trabalho com sua vasta experiência, dedicação e paixão pelo tema de poluição do ar, além de ser um profissional incrível. Muito, muito obrigado!

Aos meus amigos e colegas da UFRPE, em especial a Regina, pois a partir do momento que nos conhecemos (online), se fez presente e prestativa. Agradeço demais pela ajuda nessa trajetória.

Aos meus amigos que me apoiaram diretamente e indiretamente durante todo o período em que estive engajado nesse objetivo. Em especial, a aqueles que não concordavam, mas entendiam que eu precisava me isolar para produzir esta dissertação.

Aos membros da banca avaliadora, pela disponibilidade e pelas contribuições realizadas.

À FACEPE – Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia e Pernambuco, pelo apoio financeiro para a concretização desta pesquisa.

*“Todas as vitórias ocultam uma
abdicação”.*

Simone de Beauvoir

COSTA, F. L. N. da. **Modelagem e simulação da dispersão de poluentes atmosféricos aplicadas a uma via urbana, utilizando o modelo HYSPLIT**. 2023. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2023.

RESUMO

O crescimento populacional, sobretudo nos centros urbanos, tem levado a um aumento significativo da frota de veículos, o que resulta em maiores emissões de poluentes no ar, afetando a saúde da população e o meio ambiente. Nesse primeiro caso, cerca de 4,2 milhões de mortes estima-se ocorrer em decorrência da poluição do ar por ano. Soma-se a isso os impactos destrutivos causados no ecossistema, que contribuem para o aquecimento global. Dessa forma, as emissões veiculares são identificadas como uma das principais fontes causadoras da poluição do ar atmosférico em regiões urbanizadas. O objetivo desta investigação foi quantificar e simular a dispersão da poluição atmosférica decorrente das emissões atmosféricas em pontos de alto tráfego veicular na Av. Agamenon Magalhães, Recife, Pernambuco, em período previamente selecionado, por meio da modelagem matemática, utilizando o HYSPLIT. Para isso, foi realizado o inventário de emissões veiculares em 2021, que buscou quantificar e analisar as emissões de poluentes atmosféricos provenientes de veículos automotores, fornecendo base de informações sólidas para possíveis tomadas de decisões relacionadas ao controle da poluição. A partir do modelo HYSPLIT, foram feitas as simulações das dispersões atmosféricas das emissões veiculares, com vistas a identificar as áreas com maiores concentrações e avaliar a qualidade do ar, além de observar as trajetórias do ar a partir do ponto das emissões. Os resultados, obtidos ao longo da investigação, oferecem dados importantes para a compreensão das emissões veiculares e sua relação com a qualidade do ar, assim como possibilidades de reflexão do uso de estratégias para o controle de poluição. Nesse contexto, foi observado um aumento de aproximadamente 212% no número de veículos em Recife ao longo de 30 anos (1991-2021). No ano de 2021, os veículos leves (automóveis) representaram 57,12% da frota total de Recife e desempenharam um papel significativo nas emissões de CO e CO₂. Notavelmente, durante os fins de semana (sábado e domingo), foi constatada uma redução média de 21% nas emissões poluentes. Além disso, por meio da modelagem realizada, foi possível identificar as áreas mais impactadas, abrangendo até 10 km de raio a partir dos pontos de emissão. Bairros como Espinheiro, Encruzilhada e Alto José Bonifácio se destacaram como áreas afetadas. No que tange aos efeitos na saúde humana, as avaliações permaneceram em conformidade com os padrões estabelecidos pelo Conama 491/2018. As simulações das trajetórias do ar revelaram que 83% das correntes de vento saem Sudeste, enquanto apenas 17% saem Nordeste. Isso sugere a necessidade de se considerar a localização como uma variável essencial para uma instalação de estação de monitoramento futura em Recife, a fim de proporcionar uma compreensão mais abrangente da qualidade do ar na região. Em síntese, esta pesquisa não apenas delineou possíveis diretrizes para investigações futuras sobre a poluição atmosférica, levando em consideração o crescimento populacional e a urbanização, mas também contribuiu para a reflexão de cenários futuros. Ademais, ofereceu subsídios para uma possível consideração sobre estratégias de planejamento urbano sustentável, promovendo abordagens mais conscientes e eficazes para o desenvolvimento urbano.

PALAVRAS-CHAVE: Poluição do ar; Inventário de emissão veicular; Estação de monitoramento; Concentração de poluição; Trajetórias do ar.

COSTA, F. L. N. da. **Modeling and simulation of the dispersion of air pollutants applied to an urban road, using the HYSPLIT model.** 2023. 81 f. Dissertation (Master's in Environmental Engineering) - Federal Rural University of Pernambuco, Recife, 2023.

ABSTRACT

Population growth, especially in urban centers, has led to a significant increase in the fleet of vehicles, which results in higher emissions of pollutants in the air, affecting the health of the population and the environment. In this first case, about 4.2 million deaths are estimated to occur as a result of air pollution per year. Added to this are the destructive impacts on the ecosystem, which contribute to global warming. Thus, vehicular emissions are identified as one of the main sources of air pollution in urbanized regions. The objective of this investigation was to quantify and simulate the dispersion of air pollution resulting from atmospheric emissions in points of high vehicular traffic on Av. Agamenon Magalhães, Recife, Pernambuco, in a previously selected period, through mathematical modeling, using HYSPLIT. For this, the inventory of vehicular emissions was carried out in 2021, which sought to quantify and analyze the emissions of air pollutants from motor vehicles, providing a solid information basis for possible decision-making related to pollution control. From the HYSPLIT model, simulations of the atmospheric dispersions of vehicular emissions were made, in order to identify the areas with the highest concentrations and evaluate the air quality, in addition to observing the air trajectories from the point of emissions. The results, obtained throughout the investigation, offer important data for the understanding of vehicular emissions and their relationship with air quality, as well as possibilities for reflection on the use of strategies for pollution control. In this context, an increase of approximately 212% in the number of vehicles in Recife was observed over 30 years (1991-2021). In the year 2021, light vehicles (automobiles) accounted for 57.12% of Recife's total fleet and played a significant role in CO and CO₂ emissions. Notably, during the weekends (Saturday and Sunday), an average reduction of 21% in pollutant emissions was observed. In addition, through the modeling performed, it was possible to identify the most impacted areas, covering up to 10 km of radius from the emission points. Neighborhoods such as Espinheiro, Encruzilhada and Alto José Bonifácio stood out as affected areas. Regarding the effects on human health, the evaluations remained in accordance with the standards established by Conama 491/2018. Simulations of air trajectories revealed that 83% of wind currents leave Southeast, while only 17% leave Northeast. This suggests the need to consider location as an essential variable for a future monitoring station installation in Recife in order to provide a more comprehensive understanding of air quality in the region. In summary, this research not only outlined possible guidelines for future investigations on air pollution, taking into account population growth and urbanization, but also contributed to the reflection of future scenarios. In addition, it offered subsidies for a possible consideration of sustainable urban planning strategies, promoting more conscious and effective approaches to urban development.

Keywords: Air pollution; Vehicular emission inventory; Monitoring station; Concentration of pollution; Air trajectories.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1 – Fluxograma geral da metodologia.....	32
Figura 2 – Localização do trecho de estudo.	33
Figura 3 – Localização dos radares adotados.	34
Figura 4 – Registro de veículos em 1990 e 2021.	36
Figura 5 – Percentual de poluentes por categoria veicular.....	42
Figura 6 – Fluxo médio veicular da semana (segunda a sexta) e finais de semana (sábado e domingo).....	45

CAPÍTULO 2

Figura 1- Localização do trecho de estudo.....	55
Figura 2 - Total de veículos circulante na Av. Agamenon Magalhães no sentido Olinda - 2021.	56
Figura 3 – Quantidades de emissões veiculares inventariada de monóxido de carbono (CO) no trecho de alto fluxo veicular em outubro de 2021.	61
Figura 4 – Simulação da dispersão/concentração num período de 24h, dia (08-10-2021), pelo modelo HYSPLIT do monóxido de carbono (CO) em mg/m^3 dividido em três períodos de 8h. a) período de 3 à 11 UTC (0h - 8h); b) período de 11 à 19 UTC (8h -16h); c) período de 19 à 3 UTC (16h -0h).	63
Figura 5 – Simulação do monóxido de carbono (CO) e observação do alcance das plumas (outubro de 2021). a) maior alcance da pluma azul - dia 06. b) maior alcance da pluma amarela - dia 08.	64
Figura 6 – Concentrações máximas de monóxido de carbono (CO) observada nas simulações de dispersão do HYSPLIT para o mês de outubro (dividido em três períodos do dia).	65
Figura 7 – Simulação das trajetórias dos ventos e agrupamento em 5 <i>cluster forward trajectories</i> (trajetórias para frente).	67
Figura 8 – Direção e velocidade do vento para (outubro de 2021).	68
Figura 9 – Distribuição das frequências das classes dos ventos (outubro de 2021).	69
Figura 10 – Frequência acumulada da velocidade vento distribuída por hora (mês de outubro - 2021).	70

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

Tabela 1- Estações de monitoramento em Pernambuco.....	30
Tabela 2 - Total de veículos circulante na Av. Agamenon Magalhães no sentido Olinda (destaque para o mês de maior fluxo) - 2021.	35
Tabela 3 - Agrupamento da categoria veicular por tipos de combustíveis.....	36
Tabela 4 - Categorização por ponderação da frota veicular com o fluxo veicular do radar.....	37
Tabela 5 - Fatores de emissão alternativos quando utilizado número total de veículo por categoria.....	38
Tabela 6 - Total de emissões em 2021 de CO, NO _x , RCHO, NMHC, CH ₄ , MP e CO ₂ em quilos.	40
Tabela 7 - Taxa de emissões de poluentes em outubro 2021, com destaque para os dias de maior e de menor emissão.....	43
Tabela 8 - Taxas médias de emissões de poluentes no mês de outubro.	44

CAPÍTULO 2

Tabela 1— Precipitação, velocidade média do vento e temperatura média (mensais em 2021).	56
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIDS	Síndrome da Imunodeficiência Adquirida
ANTP	Associação Nacional de Transportes Públicos
Av.	Avenida
BRAVES	Brazilian Vehicular Emissions Inventory Software
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CPRH	Companhia Pernambucana do Meio Ambiente
CLA	Centro de Lançamento de Alcântara
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COVID -19	Coronavirus Disease 2019
CTTU	Companhia de Trânsito e Transporte Urbano
DENATRAN	Departamento Nacional de Trânsito
DETRAN	Departamento Estadual de Trânsito
EDGAR	Emissions Database for Global Atmospheric Research
EIA	Estudo de Impacto Ambiental
FACEPE	Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco
GDAS	Global Data Assimilation System
GFS	Global Forecast System
GNV	Gás Natural Veicular
HYSPLIT	Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEMA	Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos
IFPE	Instituto Federal de Pernambuco
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INEA	Instituto Nacional do Ambiente
MMA	Ministério do Meio Ambiente
NOAA	National Oceanic and Atmospheric
OMS	Organização Mundial da Saúde
PIB	Produto Interno Bruto
PPEAMB	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental
PROCONVE	Programa de Controle do Ar por Veículos Automotores
RIMA	Relatório de Impacto Ambiental
UFRPE	Universidade Federal Rural de Pernambuco

U.S.EPA	United States Environmental Protection Agency
UTC	Coordinated Universal Time
VLS	Veículo Lançador de Satélite
WHO	World Health Organization

LISTA DE SÍMBOLOS

CH ₄	Metano
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
g. km ⁻¹	Grama por quilometro
h	Hora
hab.km ⁻²	Habitante por quilometro quadrado
Kg	Quilograma
Km	Quilometro
Km ²	Quilometro quadrado
mg.m ⁻³	Miligrama por metro cúbico.
mm	Milímetros
MP	Material Particulado
m.s ⁻¹	Metros por segundo
NMHC	Hidrocarbonetos Não Metano
NO _x	Óxido de Nitrogênio
O ₃	Ozônio
RCHO	Aldeídos
%	Porcentagem
°C	Graus Celsius
(°)	Direção do vento

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
2. OBJETIVOS.....	17
2.1. Objetivo geral	17
2.2. Objetivos específicos	17
3. REVISÃO DE LITERATURA	18
3.1. Poluição atmosférica em centros urbanos.....	18
3.2. Inventários de emissões veiculares	20
3.3. Dispersão e trajetórias de poluentes com o modelo HYSPLIT	21
4. ESTRUTURA DA DISSERAÇÃO	23
REFERÊNCIAS	23
CAPÍTULO 1 - AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES VEICULARES EM UMA REGIÃO METROPOLITANA DE ALTO FLUXO VEICULAR.....	28
1. INTRODUÇÃO	29
2. MATERIAL E MÉTODOS	31
2.1. Inventário de emissões veiculares.....	31
2.2. Área de estudo	33
2.3. Distância percorrida.....	34
2.4. Caracterização da frota veicular.....	35
2.5. Fator de emissão	38
3. RESULTADOS.....	38
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	45
AGRADECIMENTO	46
REFERÊNCIAS	47
CAPÍTULO 2 - AVALIAÇÃO DA DISPERSÃO DE MONÓXIDO DE CARBONO (CO) PROVENIENTE DE FONTES MÓVEIS EM UMA REGIÃO METROPOLITANA DE ALTO FLUXO VEICULAR.....	51
1. INTRODUÇÃO	52
2. MATERIAL E MÉTODOS	55
2.1. Área de estudo	55
2.2. Dados meteorológicos.....	55
2.3. Estimativas das emissões veiculares	57
2.4. Modelo HYSPLIT.....	58

2.4.1.	Dispersão de emissões veiculares.....	58
2.4.2.	Trajétórias do vento	59
3.	RESULTADOS	60
3.1.	Inventário do monóxido de carbono (CO).....	60
3.2.	Modelagem da dispersão do monóxido de carbono.....	61
3.3.	Modelagem da trajetória dos ventos	66
4.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	70
	AGRADECIMENTO	71
	REFERÊNCIAS	72
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	75
	ANEXO A. Aplicação do cálculo para o inventário – exemplo prático (CAPÍTULO 1).	78
	ANEXO B. Descritivos para a simulação no modelo HYSPLIT (CAPÍTULO 2).	79

1- INTRODUÇÃO

Dados da Organização Mundial da Saúde (OMS, 2021) alertam acerca da ameaça da poluição do ar e da saúde humana da população no mundo todo. Ainda indicam que 91% da população mundial estão expostos a má qualidade do ar, a qual excedem os limites seguros para a saúde humana.

Nesse sentindo, problemática bastante discutida em diversas cidades no mundo, inclusive as brasileiras, são as emissões de poluição atmosférica de fonte móvel, os automóveis. A poluição do ar é considerada um dos maiores desafios em centros urbanos (LAWRENCE et al., 2007; GURJAR et al., 2008; ANDRADE et al., 2012; MIRANDA et al., 2012; TARGINO et al., 2016; ANJOS et al., 2018).

Nas áreas urbanas, Alonso et al. (2020) chamam a atenção para alguns poluentes de emissões veiculares que são comumente encontrados: monóxido de carbono (CO); óxidos de nitrogênio (NO_x); ozônio (O₃); material particulado (MP), dentre outros.

Sobre isso, De Moura et al. (2021) argumentam que valores elevados de poluentes atmosféricos, no geral, podem provocar diversos efeitos sobre a saúde da população exposta, especialmente em se tratando de crianças e de idosos, que são mais vulneráveis. Além disso, a poluição do ar vem sendo considerada um fator de risco para diversas doenças relacionadas ao sistema respiratório e cardiovascular. Essas doenças estão amplamente interligadas à má qualidade do ar e à poluição atmosférica que, em casos mais graves, podem levar a morte.

Por isso, a avaliação das concentrações, das dispersões e dos receptores de poluentes na atmosfera é fundamental para o desenvolvimento de programas e políticas públicas que visem ao controle e ao monitoramento da poluição do ar. Com essa reflexão, surge a problemática do monitoramento brasileiro da qualidade do ar, que fica restrito a algumas regiões, sendo que algumas delas, mesmo com o monitoramento, possuem dados insatisfatórios (IEMA, 2014). Vormittag et al. (2021) complementam essa informação ao constatar que em 2020 existiam 430 estações no Brasil, porém só 86,3% delas estavam em atividade. A Região Sudeste possuía substancialmente 297 das estações de monitoramento ativas. A menor região monitorada foi o Nordeste, com cerca de 5 estações de monitoramento.

Ademais, em Pernambuco, têm-se listadas seis estações de monitoramento do ar. Dados do início de 2023, mostram que cinco delas estão atualmente em funcionamento e nenhuma delas se localiza na capital, Recife (CPRH, 2023; IEMA, 2023).

Foi com base nessa lacuna, portanto, que buscou-se quantificar as emissões veiculares em um ponto de alto fluxo veicular, na Av. Gov. Agamenon Magalhães, Recife- PE. Essa

quantificação aconteceu a partir da realização de inventário de emissões veiculares dos poluentes mais representativos em centros urbanos: CO, NO_x, RCHO, NMHC, CH₄, MP e CO₂.

Além disso, foi feita a modelagem de dispersão da poluição atmosférica decorrente dessas emissões, utilizando o modelo HYSPLIT. Aqui, foi possível observar as possíveis regiões impactadas pelas poluições atmosféricas geradas por emissões veiculares.

Esta investigação, enfim, objetivou preencher a lacuna de monitoramento da qualidade do ar existente em Recife – PE e, assim, contribuir significativamente nessa seara, fornecendo informações para futuras pesquisas acadêmicas. No mais, os resultados aqui demonstrados possibilitam a reflexão sobre as ações de órgãos e/ou secretarias ligadas ao meio ambiente, com vistas a estratégias de gestão que versem sobre a proteção da comunidade urbana e melhorias da qualidade do ar, mitigando impactos ambientais causados pelo setor de transporte.

2- OBJETIVOS

2.1- Objetivo geral

Quantificar, por meio de inventários de fontes de emissões veiculares, as emissões em ponto de alto tráfego veicular em Recife, Pernambuco, e simular a dispersão do monóxido de carbono em períodos de maior concentração, utilizando o modelo HYSPLIT.

2.2 – Objetivos específicos

- (i) Mensurar as contribuições dos poluentes veiculares na poluição do ar em ponto de alto tráfego veicular da Avenida Agamenon Magalhães, Recife – PE, a partir da realização de inventário das emissões veiculares.
- (ii) Investigar, por meio de simulações com o modelo HYSPLIT, a dispersão das emissões veiculares de CO e as trajetórias do vento em um trecho urbano de alto fluxo veicular em período de alta concentração.

3- REVISÃO DE LITERATURA

3.1 - Poluição atmosférica em centros urbanos

O intenso processo de urbanização das cidades e o aumento exponencial da população das últimas décadas e sua consequente associação com o consumo excessivo de combustível fóssil, desmatamento, queima e geração de resíduos, ou seja, ocorrências não sustentáveis da atividade humana, contribuem para a degradação e agravamento da poluição atmosférica (SILVEIRA; FERREIRA; MIRANDA, 2023). Dessa forma, a poluição do ar apresenta-se como um desafio e preocupação da saúde pública, mesmo quando seus níveis ficam dentro do limite estabelecido pela legislação atual.

A poluição do ar pode surgir de duas formas: a partir de origem natural e de origem antropogênica. A natural decorre de fenômenos que não advêm da atividade da sociedade, a exemplo da erupção vulcânica, dos incêndios florestais (quando não iniciados por ação humana), dentre outros processos (SPORTISSE, 2016). Já a poluição de origem antropogênica é ocasionada pelas ações da atividade humana no meio ambiente, como a queima de combustíveis fósseis, queimadas (devido ação humana), geração de energia etc. (MARQUES, 2017). Assim, para uma melhor compreensão dos problemas causados pela poluição, é preciso entender o processo de geração da poluição do ar, os poluentes emitidos por essas atividades e a dispersão desses poluentes, bem como, as consequências aos possíveis receptores.

Sendo assim, a geração de poluição por meios antropogênicos, mais precisamente quando da queima de combustíveis fósseis, é uma das principais preocupações em centros urbanos, pois o transporte veicular que se utiliza dessa energia é identificado como uma das principais fontes móveis causadoras da poluição do ar atmosférico em regiões urbanizadas (CETESB, 2021). Por isso, o monitoramento das concentrações de poluentes na atmosfera, advindas dos veículos automotores, acaba se tornando imprescindível, pois coleta e gera informações das concentrações dos poluentes atmosféricos, além de habilitar tomadas de decisões e planejamento de ações e políticas públicas voltadas à melhoria da qualidade do ar (WHO, 2016).

O monitoramento da qualidade do ar no Brasil ainda está restrito a algumas regiões e, em alguns casos, insatisfatório no que se refere ao histórico amostral, cobertura territorial, quantidade de parâmetros monitorados e representatividade nas medições (IEMA, 2014).

Em 2020, o Brasil apresentava 430 estações de monitoramento. Dessas, 371 encontram-se em atividade. Além disso, a grande maioria dessas estações brasileiras (ativas) localiza-se na

Região Sudeste (80,3%), e a menor parte na Região Nordeste (1,1%). Ademais, a região Norte representa 8,4%, a Sul 7,8% e o Centro-Oeste 2,4% das estações em atividade (VORMITTAG et al., 2021).

Por outro lado, WHO (2016) explicita que, das cidades que tem monitoramento da qualidade do ar, cerca de 80% não atendem aos parâmetros básicos em níveis da poluição do ar, negligenciando o bem-estar e agravando problemas para a saúde da população. Este número aumenta, chegando a 98%, quando investigados os monitoramentos de cidades de baixa renda *per capita*. Em contrapartida, os países de alta renda *per capita* têm esse número diminuído para 56%.

Os problemas relacionados à poluição causam impactos nos receptores, meio ambiente e sociedade. Na perspectiva ambiental, as altas concentrações populacionais e as grandes demandas de consumo nos centros urbanos vêm sendo associadas a um progressivo aumento da degradação do meio ambiente. Dentre fatores da degradação do meio ambiente, a poluição atmosférica e a qualidade do ar aparecem em posição de destaque (MAIA et al., 2019).

A poluição atmosférica provoca danos à natureza e acarreta impactos destrutivos em todos os ecossistemas, culminando, em última análise, com o aquecimento global. Ademais, estas mudanças significam um perigo significativo à sobrevivência da vida humana e animal, bem como um desastre ecológico que levará anos para se recuperar (PRIMAVESI; ARZABE; PEDREIRA, 2007)

Os seres humanos são os mais afetados pela poluição do ar, principalmente quando estão localizados em áreas urbanas e países em desenvolvimento (WHO, 2016). Por exemplo, a poluição do ar gera perdas previdenciárias que, em países de baixa renda e renda média, provocam redução de até 2% do seu Produto Interno Bruto (PIB). Já os países de maior renda têm custo com saúde nessa temática de 1,7% do total de gastos anuais. Soma-se a isso, o prejuízo com perdas previdenciárias que alçam patamares de US\$ 4,6 trilhões de dólares por ano, o que representa 6,2% da produção econômica global (LANDRIGAN et al, 2018)

Para Fuller et al. (2018), países com alta e média-alta renda lidam melhor com o impacto da poluição do ar. Já em países com média-baixa e baixa renda, a poluição do ar é um risco predominante de mortalidade. Além disso, Suk et al. (2018) afirmam que as crianças são mais vulneráveis a poluição do ar. Landrigan et al. (2018), por sua vez, correlacionam a poluição a maiores causas de mortes prematuras.

Portanto, a poluição do ar, além de trazer prejuízos à saúde da população, resulta em gastos para o Estado, devido ao aumento do número de atendimentos, internações hospitalares, afastamento do trabalho e uso de medicamentos (BRASIL, s.d.).

3.2 – Inventários de emissões veiculares

O crescimento econômico e o incentivo ao consumo das últimas décadas proporcionaram um aumento no número de veículos automotores no mundo inteiro. De 2011 a 2021, a frota veicular do Brasil, obteve um acréscimo de cerca de 58%, passando de aproximadamente 70,5 milhões para 111,4 milhões de veículos. O estado brasileiro que possui a maior frota veicular é São Paulo representando aproximadamente 28,3% (31.455.473) da frota total brasileira em 2021. O estado de Pernambuco é o 10º estado com a maior frota veicular, o equivalente a cerca de 3% (3.334.479) da frota veicular total brasileira (DENATRAN, 2021).

No ano de referência de 2021, segundo a CETESB (2021), as emissões de alguns poluentes aumentaram, quando comparados ao ano anterior – ano com pandemia de COVID-19 decretada e, que teve, portanto, baixo fluxo veicular. O CO (monóxido de carbono), por exemplo, foi um dos poluentes que apresentou aumento no ano de 2021, justificado pelo crescimento do número do fluxo de veículos.

Nesse sentido, as emissões de poluentes pelos veículos automotores podem ser exaustivas (emissão direta do escapamento), evaporativas (durante o uso ou no repouso do veículo), pelos processos físicos de desgastes de pneus, freios e pista, além da ressuspensão de partículas do solo, ou mesmo pelo abastecimento dos veículos (MMA, 2011; HOINASKI et al., 2021)

Assim, para propor estratégias para redução da poluição atmosférica, é necessário determinar a quantidade de emissões e a sua distribuição espacial a partir das diversas fontes, tornando, de grande importância, o uso de inventários na gestão da poluição atmosférica (ANDRADE, 2017). Contudo, para emissões de fontes móveis, como a veicular, o planejamento estratégico está longe de ser trivial porque as fontes de emissões estão em movimento no espaço ao longo do tempo.

Para os veículos, uma forma de quantificação das emissões é pela estimativa, utilizando métodos matemáticos, como o inventário. Além disso, o uso do inventário de emissão pode identificar as diversas fontes e os possíveis poluentes emitidos (MMA, 2011). Contudo, Vallero (2008) adverte para a possibilidade de os inventários carregarem erros na precisão das estimativas, chamando a atenção para outras formas de monitoramento, a exemplo das estações fixas de medição, que podem estar localizadas inadequadamente, gerando erros de leitura e registro a partir de equipamentos obsoletos, dentre outros fatores que também podem incorrer em equívocos.

O inventário de emissão veicular consiste no levantamento das emissões de poluentes

emitidos pela frota de veículos automotores na região de estudo, o qual faz uso de uma metodologia indicada para a avaliação da contribuição dos veículos automotores na poluição do ar. Nesse sentido, existem duas metodologias para realização de inventário: a *bottom-up* e a *top-down*. Elas se diferenciam basicamente pela maneira de agregar os dados (INEA, 2016; BRANDAO, 2020).

Na metodologia *bottom-up*, o total de emissões inventariadas são quantificadas a partir do somatório das emissões típicas de cada categoria de veículo, ou seja, considera o perfil da frota e a distância percorrida, que também é denominada a partir da intensidade de uso do veículo, além do fator de emissão, tudo em um determinado período (MMA,2011; SOARES, 2019). Esse método se baseia em informações locais para estimar os fatores de emissões, requerendo dados mais específicos de cada local (INEA, 2016).

Já na metodologia *top-down*, tem-se uma abordagem mais simples, já que a totalização das emissões ocorre a partir do conhecimento do volume de combustíveis consumidos na região inventariada. Nesse sentido, o fator de emissão, que é baseado no combustível e consumo do mesmo, se alinha à autonomia dos veículos (MMA,2011; SOARES, 2019). Esse método é geralmente utilizado para verificar tendências e impactos em escalas regionais. Contudo, segundo Brandão (2020), o método *top-down*, para estimativas das emissões de escape veicular, tende a apresentar uma margem de erro maior que o *bottom-up*.

Nesse panorama, os inventários realizados pela CETESB (2021) utilizam a forma de cálculo do tipo *bottom-up*, a qual serve de referência para a comunidade científica e os setores governamentais, uma vez que quantificam anualmente os poluentes emitidos por fontes móveis. Assim, os inventários podem ser aplicados em regiões com diferentes áreas, como em bairros, municípios ou até em estados e em territórios nacionais.

3.3 – Dispersão e trajetórias de poluentes com o modelo HYSPLIT

A dispersão é um processo complexo devido a fatores que influenciam na concentração de determinado poluente na atmosfera, como o transporte, a transformação química e a deposição dos poluentes (STEN et al., 2015). Esses fatores ficam mais dinâmicos quando atrelados à condição meteorológica do local. Isso inclui o vento, turbulências e a ocorrência do fenômeno de inversão térmica (DUARTE, 2016). Dessa forma, os modelos de dispersão do ar produzem simulações com a junção dos cálculos matemáticos e dos fenômenos da física e da química, que reagem ao transporte, à dispersão e à transformação dos poluentes no ar (BRASIL, 2021).

A modelagem da dispersão atmosférica vem sendo amplamente utilizada na gestão de efluentes gasosos e de qualidade do ar, notabilizando-se como uma ferramenta importante para as entidades reguladoras e constituindo-se como uma das principais técnicas de avaliação da qualidade do ar (SILVA, 2013). Além disso, é uma ferramenta que está sendo amplamente utilizada na elaboração de Estudos de Impacto Ambiental (EIA) e nos Relatórios de Impacto de Ambiental (RIMA), conforme prevê a legislação ambiental brasileira (DERISIO, 2016).

O modelo HYSPLIT (*Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory*) é um sistema de modelagem de cálculo em tempo real e análise de fontes de transporte em relação a uma variedade de poluentes físicos atmosféricos. O sistema é capaz de calcular trajetórias simples, bem como simulações complexas de transporte, dispersão, transformação química e deposição de poluentes atmosféricos, podendo tratar simultaneamente processos múltiplos de transportes atmosféricos e físicos, campos de entrada meteorológicos variados e fontes de emissão com diferentes categorias (MA et al., 2021).

O HYSPLIT é um modelo gratuito, desenvolvido pela *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) e pelo *Australia Weather Bureau*. Ele utiliza o método de cálculo híbrido entre a abordagem Lagrangiana e Euleriana. A abordagem Lagrangiana adota um referencial móvel para os cálculos de advecção e difusão, conforme as trajetórias ou parcelas de ar se movem de sua localização inicial. Já a metodologia Euleriana, utiliza uma grade tridimensional fixa como um quadro de referência para calcular as concentrações de poluentes no ar (NGAN et al., 2015).

Cheol et al. (2020), explicam algumas possíveis aplicações do HYSPLIT, como o rastreamento e a previsão da liberação de material radioativo, fumaça de incêndio florestal, poeira soprada pelo vento, poluentes de várias fontes de emissão estacionárias e móveis, alérgenos e cinzas vulcânicas, entre outras aplicações. Um exemplo do uso do modelo é a investigação de Palácios et al. (2018), que usaram as trajetórias do modelo HYSPLIT para explicar a contribuição de poluentes externos nos valores medidos de poluição da região. Eles conseguiram explicar, nesse caso, as influências externas na contribuição para o aumento de aerossóis na região do cerrado e pantanal, concluindo que parte das concentrações medidas vinham de outras regiões.

Outra opção de uso foi operada por Pereira (2022) num estudo hipotético para gestão de segurança de agentes biológicos altamente contaminantes, com o auxílio das simulações do HYSPLIT. Com o modelo, ele propôs o cenário de liberações acidentais de antraz na plataforma de nível de biossegurança 3, campos da Fundação Osvaldo Cruz, Rio de Janeiro. Os resultados mostram que as potencialidades das áreas com maiores concentrações da carga infectante

ficariam mais restritas a um raio de 1 quilometro. O modelo pôde ser usado, pois, para gerir estratégias para a possibilidade de um desastre biológico.

4- ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação foi estrutura em dois capítulos:

Capítulo 1 – Nesse capítulo, aborda-se o detalhamento dos conceitos e a importância do inventário de emissões veiculares. Além disso, para a produção do inventário, utilizou-se como base a metodologia *bottom-up*, cuja a finalidade foi a de quantificar a poluição do ar numa região com grade fluxo de veículos. Foram apresentados, de forma organizada, os dados de entrada, bem como a produção e os resultados do inventário. Ademais, também são apresentados alguns exemplos de inventário para diferentes contextos, a exemplo de pequenas e de grandes regiões, para ilustrar a sua aplicabilidade na prática.

Capítulo 2 – Neste momento, discorre-se a simulação da dispersão dos poluentes e trajetórias dos ventos a partir da região de grande tráfego veicular num trecho da Av. Agamenon Magalhães, em Recife-PE. Para isso, utilizou-se do modelo HYSPLIT. Aqui, explica-se como foi utilizado o modelo nas simulações, tanto para a dispersão quanto para as trajetórias do ar. No mais, foi possível apresentar ainda os possíveis receptores das poluições atmosféricas geradas pelas emissões veiculares do trecho investigado, com informações relevantes em relação à direção dos ventos para possíveis reflexões sobre gestão de qualidade do ar.

REFERÊNCIAS

- ALONSO, M. F.; MOURA, S. F. D.; VERDI, T. F. Estudo da Dispersão do Monóxido de Carbono Associado a Emissão Veicular na Região Metropolitana de Porto Alegre com o Sistema de Modelagem Numérica CCATT-BRAMS. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, p. 49-62, 2020.
- ANDRADE, M. F.; MIRANDA, R. M.; FORNARO, A.; KERR, A.; OYAMA, B.; ANDRÉ, P. A.; SALDIVA, P. H. N. Vehicle emissions and PM_{2.5} mass concentrations in six Brazilian cities. **Air Quality, Atmosphere & Health**, v. 5, n. 1, p. 79-88, 2012.
- ANDRADE, M. De F., KUMAR, P., DE FREITAS, E. D., YNOUE, R. Y., MARTINS, J., MARTINS, L. D. & ZHANG, Y. Air quality in the megacity of São Paulo: Evolution over the last 30 years and future perspectives. **Atmospheric environment**, v. 159, p. 66-82, 2017.
- ANJOS, M.; LOPES, A.; ALVES, E. Uso dos modelos CAL3QHC e I-Tree Canopy na avaliação da qualidade do ar em Aracaju: estimativas da concentração de PM₁₀ em vias de tráfego intenso de automóveis. **Geosp – Espaço e Tempo** (Online), v. 22, n. 3, p. 707-728,

dez. 2018. ISSN 2179-0892.

BRANDÃO, P. V. R. **Estudo da dispersão atmosférica de poluentes originários da frota veicular em Salvador–BA**. 190 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – UFBA, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2021.

BRASIL, D. R. Uma Modelagem Baseada no PSO para Estimativas das Taxas de Emissão de Particulados em um Acidente Nuclear. **Master's dissertation, COPPE/UFRJ**, 2021.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Qualidade do Ar**, (s.d.). Disponível em: <http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/qualidade-do-ar>>. Acesso em: 25 jul. 2023.

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Relatório de Qualidade do Ar no estado de São Paulo**. São Paulo: Governo do Estado de São Paulo/Secretaria do Meio Ambiente/Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. 2021. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/wp-content/uploads/sites/28/2022/10/Relatorio-de-Qualidade-do-Ar-no-Estado-de-Sao-Paulo-2021.pdf>. Acesso em: 08 mai. 2023.

CHEOL, H. K.; CHAI, T.; STEIN, A.; KONDRAGUNTA, S. Modelagem inversa de emissões de incêndio restritas pelo transporte de pluma de fumaça usando modelo de dispersão HYSPLIT e observações geoestacionárias de satélite. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 20, issue 17, p. 10259–10277, 2020.

CPRH - Agência Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. **Qualidade do Ar - rede de monitoramento**. Pernambuco. 2023. Disponível em: <http://www2.cprh.pe.gov.br/monitoramento-ambiental/qualidade-do-ar-2/rede-de-monitoramento/> . Acesso em: 20 mai. 2023.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO – DENATRAN. **Estatísticas Frota de Veículos – DENATRAN** Disponível em: < <https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/conteudo-Senatran/frota-de-veiculos-2021>. Acesso em: 20 jun. 2023.

DERISIO, J. C. Introdução ao controle de poluição ambiental. **Oficina de textos**, 2016.

DUARTE, E. S. F. **Análise e caracterização do material particulado atmosférico fino em uma região metropolitana de Natal-RN**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil, 2016.

FULLER, R.; RAHONA, E.; FISHER, S.; CARAVANOS, J.; WEBB, D.; KASS, D. Pollution and non-communicable diseases: time to end the neglect. **Lancet Planetary Health**2. (3):e96–e98, 2018.

GURJAR, B. R.; BUTLER, T. M.; LAWRENCE, M. G.; LELIEVELD, J. Evaluation of emissions and air quality in megacities. **Atmospheric Environment**, v. 42, n. 7, p. 1593- 1606, 2008.

HOINASKI, L.; VASQUES, T. V.; MEOTTI, B.; WILL, R.; RIBEIRO, C. B.; DOS SANTOS, O. N.; RODELLA, F. H.; PLACIDO, J.; CHIMINELLI, R. **Avaliação do impacto das emissões veiculares, queimadas, industriais e naturais na qualidade do ar em Santa Catarina. Série relatórios**. Santa Catarina, 2021.

IEMA, Instituto de Energia e Meio Ambiente. **1º Diagnóstico da rede de monitoramento da qualidade do ar no Brasil**. São Paulo, 2014. Disponível em: [http://www.forumclima.pr.gov.br/arquivos/File/Rosana/Diagnostico Qualidade do Ar Versa o Final Std.pdf](http://www.forumclima.pr.gov.br/arquivos/File/Rosana/Diagnostico%20Qualidade%20do%20Ar%20Versao%20Final%20Std.pdf). Acesso em: 15 jun. 2023.

IEMA. Instituto de Energia e Meio Ambiente. Plataforma da qualidade do ar. **Downloads dos dados, Pernambuco**. Brasil, Pernambuco, 2023. Disponível em: <https://energiaeambiente.org.br/qualidadedoar/> . Acesso em: 29 mai. 2023.

INEA. Instituto Estadual do Ambiente (RJ). **Inventário de emissões de fontes veiculares: região metropolitana do Rio de Janeiro** / Instituto Estadual do Ambiente (RJ), [autores: Luciana Maria Baptista Ventura; Felipe de Oliveira Pinto]. – Rio de Janeiro: INEA, 2016.

LANDRIGAN, P.; FULLER, R.; ACOSTA, N. J. R.; ADEYI, O.; ARNOLD, R.; BASU, N.; BALDÉ, A. B.; BERTOLLINI, R.; BOSE-O'REILLY, S.; BOUFFORD, J. I.; BREYSSE, P. N.; CHILES, T.; MAHIDOL, C.; COLL-SECK, A. M.; CROPPER, M. L.; FOBIL, J.; FUSTER, V.; GREENSTONE, M.; HAINES, A.; HANRAHAN, D.; HUNTER, D.; KHARE, M.; KRUPNICK, A.; LANPHEAR, B.; LOHANI, B.; MARTIN, K.; MATHIASSEN, K. V.; MCTEER, M. A.; MURRAY, C. J. L.; NDAHIMANANJARA, J. D.; PERERA, F.; POTOČNIK, J.; PREKER, A. S.; RAMESH, J.; ROCKSTRÖM, J.; SALINAS, C.; SAMSON, L. D.; SANDILYA, K.; SLY, P. D.; SMITH, K. R.; STEINER, A.; STEWART, R. B.; SUK, W. A.; SCHAYCK, O. C. P. V.; YADAMA, G. N.; YUMKELLA, K.; ZHONG, M. The Lancet Commission on pollution and health. **The lancet**, v. 391, n. 10119, p. 462-512, 2018.

LAWRENCE, M. G.; BUTLER, T. M.; STEINKAMP, J.; GURJAR, B. R.; LELIEVELD, J. Regional pollution potentials of megacities and other major population centers. **Atmospheric Chemistry and Physics Discussions**, v. 7, n. 14, p. 3969-3987, 2007.

MA, Y.; WANG, M.; WANG, S.; WANG, Y.; FENG, L.; WU, K. Air pollutant emission characteristics and HYSPLIT model analysis during heating period in Shenyang, China. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 193, p. 1- 14, 2021.

MAIA, J. L. M.; M NETTO, V.; COSTA, B. L. G. da. Forma urbana e poluição atmosférica: impactos na cidade do Rio de Janeiro. urbe. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 11, 2019.

MARQUES, L. C. **Modelagem matemática da dispersão de poluentes atmosféricos em indústria siderúrgica no Ceará**. 2017. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

MIRANDA, R. M.; ANDRADE, M. F.; FORNARO, A.; ASTOLFO, R.; ANDRÉ, P. A.; SALDIVA, P. H. N. Urban air pollution: a representative survey of PM2.5 mass concentrations in six Brazilian cities. **Air Quality, Atmosphere & Health**, v. 5, n. 1, p. 63-77, 2012.

MMA. 1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários Relatório Final. **Ministério do Meio Ambiente**, 2011. Disponível em: http://www.mma.gov.br/estruturas/163/_publicacao/163_publicacao27072011055200.pdf. Acesso em: 20 fev. 2023.

DE MOURA, P. H.; SANTOS, D. W. L.; SILVA, J. de M.; PEREIRA, P. G.; DA SILVA, F. P.; MORENO, A. M. Poluição atmosférica e hospitalizações por agravos pulmonares em idosos na cidade de Nova Iguaçu. **Estudos Interdisciplinares sobre o Envelhecimento**, [S. l.], v. 26, n. 1, 2021.

NGAN, F.; STEIN, A.; FINN, D.; ECKMAN, R. Dispersion simulations using HYSPLIT for the Sagebrush Tracer Experiment. **Atmospheric Environment**, v. 186, p. 18-31, 2018.

OMS. Organização Mundial da Saúde, 2021. Disponível em: https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_1. Acesso em: 18 fev. 2023.

PALÁCIOS, Rafael et al. Optical properties and spectral dependence of aerosol light absorption over the Brazilian Pantanal. **Atmospheric Pollution Research**, v. 13, n. 5, p. 101413, 2022.

PEREIRA, A. P. M. F. **Liberação acidental de antraz em um laboratório de pesquisa: estudo de caso**. 2022. 211 f. Tese (Doutorado em Saúde Pública e Meio Ambiente) - Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca, Fundação Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro, 2022.

PRIMAVESI, O.; ARZABE, C.; PEDREIRA, M. dos S. **Mudanças climáticas: visão tropical integrada das causas, dos impactos e de possíveis soluções para ambientes rurais ou urbanos**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2007. 200p. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/48017/mudancas-climaticas-visao-tropical-integrada-das-causas-dos-impactos-e-de-possiveis-solucoes-para-ambientes-rurais-ou-urbanos>.

VALLERO, D. Fundamentals of air pollution. Durham, North Carolina: **Elsevier Inc**, 2008.

VORMITTAG, E. D. M.; DE ARAÚJO, P. A.; CIRQUEIRA, S. S. R.; WICHER NETO, H.; SALDIVA, P. H. N. Análise do monitoramento da qualidade do ar no Brasil. **Estudos Avançados**, 2021, vol. 35, p. 7-30.

SILVEIRA, C.; FERREIRA, J.; MIRANDA, A. I. A multiscale air quality and health risk modelling system: Design and application over a local traffic management case study. **Atmospheric Environment**, v. 294, p. 119481, 2023.

SILVA, C. **Modelagem Lagrangeana Da Dispersão Atmosférica De Radionuclídeos E Sistemas De Informação Geográfica Como Ferramentas De Suporte Ao Planejamento De Emergência Na Área De Influência Do Complexo Nuclear De Angra Dos Reis – Rj**. Tese Submetida Ao Corpo Docente Do Instituto Alberto Luiz Coimbra De Pós-Graduação E Pesquisa De Engenharia (Coppe) Da Universidade Federal Do Rio De Janeiro Como Parte Dos Requisitos Necessários Para A Obtenção Do Grau De Doutor Em Ciências Em Engenharia Civil - 2013.

SOARES, L. M. **Previsão de emissões veiculares com a implantação gradativa de veículos híbridos e elétricos na cidade do Rio de Janeiro**. 2019. 113f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

SPORTISSE, B. Fundamentals in Air Pollution. [S.l.]: **Springer**, 2016.

SUK WA, HEACOCK ML, TROTTIER BA, AMOLEGBE SM, AVAKIAN MD, HENRY

HF. Assessing the economic and societal benefits of SRP-funded research." **Environmental Health Perspectives** 126. No (6):065002, 2018.

TARGINO, A. C.; GIBSON, M. D.; KRECL, P.; RODRIGUES, M. V. C.; SANTOS, M. M.; CORRÊA, M. P. Hotspots of black carbon and PM 2.5 in an urban area and relationships to traffic characteristics. **Environmental Pollution**, v. 218, p. 475-486, 2016.

WHO. World Health Organization. Ambient Air Pollutins: a Global Assessment of Exposure Burden. **World Health Organization**, 2016. Disponível em: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/250141/9789241511353-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y> .Acesso em: 16 dez. 2022.

CAPÍTULO 1

AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES VEICULARES EM UMA REGIÃO METROPOLITANA DE ALTO FLUXO VEICULAR

EVALUATION OF VEHICLE EMISSIONS IN A METROPOLITAN REGION WITH HIGH VEHICLE FLOW

RESUMO

As emissões veiculares são uma das principais causas de poluição em áreas urbanas, seus efeitos perpassam as camadas social, econômica e ambiental da sociedade. Na social, os problemas estão relacionados à saúde, que vai de problemas alérgicos a respiratórios. Na econômica, as doenças relacionadas à poluição afetam a questão previdenciária. Na ambiental, as concentrações populacionais e altas demandas de consumo dos centros urbanos vêm sendo associadas a um progressivo aumento da degradação do meio ambiente. Nesse sentido, o presente artigo tem por objetivo estimar a contribuição dos poluentes CO, NO_x, RCHO, NMHC, CH₄, MP e CO₂ na poluição do ar, no ponto de alto tráfego veicular da Avenida Agamenon Magalhães, Recife – PE, a partir da realização de inventário das emissões veiculares. Para isso, foi usada a metodologia *bottom-up*, a qual se utilizou da quantidade da frota veicular (distribuída por categorias), distância percorrida e fatores de emissões dos veículos. Os resultados mostram que a quantidade de emissões no ano de 2021, no trecho inventariado, foi de cerca de 3.922,03 kg de CO, 831,98 kg de NO_x, 14,66kg de RCHO, 2.913,87 kg de NMHC, 279,04 kg de CH₄, 87,06kg de MP e de 603.743,89 kg de CO₂. No que confere ao período, o mês de outubro foi o mais crítico, enquanto que os dias referentes aos finais de semana emitiram em média 21% a menos de poluição, devido à diminuição do fluxo veicular.

Palavras-chave: Inventário de emissão veicular; *Bottom-up*; Poluição do ar.

ABSTRACT

Vehicular emissions are one of the main causes of pollution in urban areas, their effects permeate the social, economic and environmental layers of society. In social, the problems are related to health, ranging from allergic to respiratory problems. In the economy, pollution-related diseases affect the pension issue. In the environment, population concentrations and high consumption demands of urban centers have been associated with a progressive increase in environmental degradation. In this sense, this article aims to estimate the contribution of the pollutants CO, NO_x, RCHO, NMHC, CH₄, MP and CO₂ in air pollution, at the point of high vehicular traffic of Avenida Agamenon Magalhães, Recife – PE, from the inventory of vehicular emissions. For this, the bottom-up methodology was used, which used the amount of the vehicle fleet (distributed by categories), distance traveled and vehicle emissions factors. The results show that the amount of emissions in the year 2021, in the inventoried stretch, was about 3,922.03 kg of CO, 831.98 kg of NO_x, 14.66kg of RCHO, 2,913.87 kg of NMHC, 279.04 kg of CH₄, 87.06kg of PM and 603,743.89 kg of CO₂. As far as the period is concerned, the month of October was the most critical, while weekend days emitted on average 21% less pollution, due to decreased vehicular flow.

Keywords: Vehicular emission inventory; Bottom up; Air pollution.

1. INTRODUÇÃO

A poluição do ar representa uma grande ameaça à saúde humana e ao meio ambiente (MORENO et al., 2023). Dados da Organização Mundial da Saúde - OMS (2021) indicam que cerca de 91% da população mundial vivem em lugares onde os níveis de qualidade do ar excedem os limites seguros para a saúde humana. Além disso, a poluição do ar é responsável por cerca de 4,2 milhões de mortes por ano devido a acidentes vasculares cerebrais, doenças cardíacas, câncer de pulmão e doenças respiratórias crônicas, bem como é responsável a nível mundial por mortes prematuras, que contabilizaram por volta de 9 milhões em 2015. Isso representa três vezes mais morte que aquelas causadas em decorrência do vírus AIDS, tuberculose e malária juntos (LANDRIGRAN et al., 2018).

Somando-se a isso, as concentrações populacionais e as altas demandas de consumo nos centros urbanos vêm sendo associadas a um progressivo aumento da degradação do meio ambiente. Dentre fatores de degradação, a poluição atmosférica e a qualidade do ar aparecem em posição de destaque. Nesse contexto, as pessoas mais afetadas pelos poluentes do ar estão localizadas em áreas urbanas e países em desenvolvimento (MAIA et al., 2019).

Poluentes do ar é, segundo a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente nº 491, qualquer forma de matéria em quantidade, concentração, tempo ou outras características, que tornem ou possam tornar o ar impróprio ou nocivo à saúde, inconveniente ao bem-estar público, danoso aos materiais, à fauna e flora ou prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade ou às atividades normais da comunidade (CONAMA, 2018).

Diante disso, o transporte urbano que utiliza energia a partir de combustíveis fósseis é identificado como uma das principais fontes móveis causadoras da poluição do ar atmosférico em regiões urbanizadas. Por isso, o monitoramento das concentrações de poluentes na atmosfera, advindas dos veículos automotores, acaba se tornando imprescindível, pois coleta e gera informações das concentrações dos poluentes atmosféricos, além de habilitar tomadas de decisões, planejamento de ações e políticas públicas voltadas à melhoria da qualidade do ar (WHO, 2016).

No Estado de Pernambuco, por exemplo, existem poucas estações de monitoramento da qualidade do ar e, das que existem (Tabela 1), nenhuma delas se localiza no Município do Recife, capital do Estado. Além disso, não há disponibilização de dados em tempo real, gerando, portanto, agravo nos diagnósticos das emissões de poluição do ar, de transparência na informação à população, bem como, da violação a direitos fundamentais, à saúde e ao meio ambiente (VORMITTAG et al, 2021).

Tabela 1- Estações de monitoramento em Pernambuco.

ESTAÇÕES	Locais do monitoramento					
	Ipojuca	Ed. Cupe	IFPE	CPRH	SUAPE	Gaibu (desativada em 2020)
Latitude	8°26' 17.20"S	8°23' 58.56"S	8°23' 5.45"S	8°20' 15.47"S	8°36' 84.50"S	8°19' 44.37" S
Longitude	35°0' 45.43"O	35°2' 23.29"O	35°2'29. 61"O	35°1' 19.82"O	35°3' 68.45"O	34°57' 22.66"O
Municípios de instalação	Ipojuca	Ipojuca	Ipojuca	Cabo de Santo Agostinho	Ipojuca	Cabo de Santo Agostinho
Período de dados disponibilizados (IEMA)	A partir de 2017	A partir de 2020	A partir de 2017	A partir de 2017	A partir de 2022	A partir de 2017

Fonte: Adaptado de CPRH (2023) e IEMA (2023).

O inventário de emissão veicular consiste no levantamento de poluentes. Para a concretização desse tipo de investigação, existem dois métodos: o *bottom-up* e o *top-down*, que se diferenciam basicamente pela maneira de agregar os dados (CETESB, 1994; LOUREIRO, 2005; INEA, 2016).

Nesse viés, o uso de inventários é de grande importância na gestão da poluição atmosférica, podendo ser usado para uma análise de modelagem da dispersão, para o gerenciamento estratégico no combate e controle da poluição do ar, para o planejamento e adaptação de rede de monitoramento da qualidade do ar, para o uso e ocupação do solo e para detectar a responsabilidade sobre as emissões (ANDRADE, 2017).

O inventário de emissões pode ajudar a avaliar uma série de informações a respeito da qualidade do ar para a comunidade urbana, como mostra o segundo relatório sobre emissões atmosféricas em Santa Catarina no ano de 2020, que ressalta a escassez de monitoramento na cidade e que é imprescindível a necessidade científica de diagnóstico da poluição do ar de diferentes fontes por meio dos inventários na cidade (HOINASKI et al., 2021).

Para escolher o melhor método, precisa-se levar em considerações alguns fatores, dentre eles o custo, a precisão da estimativa e dos dados obtidos, assim como, a finalidade do inventário, o tempo e recursos disponíveis. Ademais, as estimativas não fornecem dados em tempos reais, contudo, os resultados produzidos pelos inventários são razoáveis e de baixo custo orçamentário, pois fazem uso da base de dados veiculares, fatores de emissões e equações matemáticas (U.S.EPA, 2001).

O inventário apresenta-se como uma ferramenta útil, rápida e econômica, podendo fornecer uma solução eficaz para a falta de monitoramento. Hoinaski et al. (2022), ao atentarem

para a escassez e urgência de investigações dessa natureza, desenvolvem um banco de dados multiespécies de alta resolução espaço-temporal de emissões veiculares no Brasil chamado de Brazilian Vehicular Emissions Inventory Software - BRAVES. Esse estudo alcançou melhores desempenhos que o Emissions Database for Global Atmospheric Research (EDGAR) e, a partir dele, foi possível a comunidade científica e ambiental obter novos conhecimentos nas emissões veiculares no Brasil.

Assim como nesses exemplos, há uma pluralidade de estudos e abordagens de inventários disponíveis, cada um com suas variações em termos de acurácia. Não obstante, a preponderância dessas abordagens busca mitigar as lacunas inerentes à ausência de monitoramento da qualidade do ar. Desse modo, o presente trabalho teve como objetivo a elaboração de um inventário de emissões veiculares, usando o método *bottom-up*, com a finalidade de estimar a contribuição dos veículos automotores na poluição do ar, no ponto de alto tráfego veicular, na Avenida Agamenon Magalhães, região totalmente urbana na cidade do Recife. No mais, os seguintes poluentes foram englobados pela pesquisa: CO (monóxido de carbono), NO_x (óxidos de nitrogênio), RCHO (aldeídos), NMHC (hidrocarbonetos não metano), CH₄ (metano), MP (material particulado) e CO₂ (dióxido de carbono).

Cabe destacar, por fim, que os dados estimados da qualidade do ar obtidos pela pesquisa podem auxiliar as secretarias voltadas às questões ambientais e demais órgão afins, podendo contribuir com medidas públicas de gestão que visem à proteção da comunidade urbana.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Inventário de emissões veiculares

A metodologia do inventário adotada nesse estudo foi a *bottom-up*, a qual usa o total de emissões inventariadas e quantificadas a partir do somatório das emissões típicas de cada categoria de veículo, ou seja, considera o perfil da frota e a distância percorrida, que também pode ser mensurada pela intensidade de uso do veículo. Além disso, ainda há que se considerar o fator de emissão, tudo em um determinado período de tempo. Tal método é empregado para caracterizar as emissões por vias (MAES, 2019).

A equação matemática (1) que descreve a metodologia *bottom-up* é:

$$E_{linha,i} = Fr_{j} \times (Fe_{i}/1000) \times L \quad (1)$$

onde:

$Elinha,i$: representa a emissão veicular estimadas para o poluente i na seção de interesse.

Fe,i : corresponde ao fator de emissão do poluente i ($g.km^{-1}$);

Fr,j : denota o número total de veículos da classe j que circulam na via de interesse durante um período de tempo t ;

L : corresponde à extensão da via de interesse (medida em km)

1000: fator de conversão de g para kg.

A Figura 1 mostra o fluxograma da metodologia para estimativas das emissões veiculares a partir dos dados DETRAN, considerando informações locais para estimar os poluentes de emissões, requerendo dados específicos, como frotas registradas de veículos no Departamento Estadual de Trânsito de Pernambuco (DETRAN, 2021), dados de radares eletrônicos (RECIFE, 2021), para obtenção da quantidade de carros circulantes, distância percorrida no local do estudo (GOOGLE, 2023), fatores de emissões alternativos (CANCELLI; DIAS, 2014). Dessa forma, de posse dos dados, foi possível aplicá-los matematicamente, conforme a equação *bottom-up*, e gerar os resultados da quantidade de poluentes emitidos. Cabe salientar que os inventários, portanto, podem ser aplicados em regiões pequenas e grandes, como em bairros, municípios ou até em estados e em territórios nacionais.

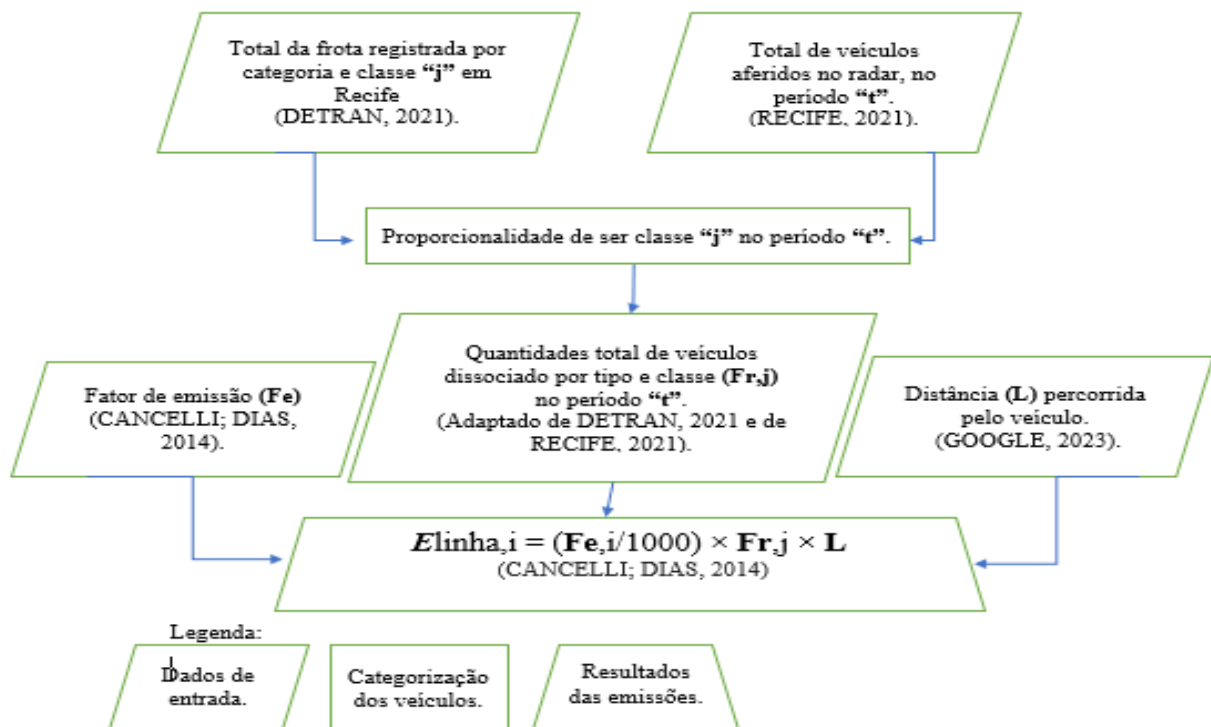


Figura 1- Fluxograma geral da metodologia.

Fonte: Autores (2023).

2.2. Área de estudo

A via utilizada para o inventário de emissões veiculares fica localizada em Recife (Figura 2), cidade do litoral pernambucano, Região Nordeste do Brasil, limitada pelos municípios de Olinda, Paulista, Camaragibe, Jaboatão dos Guararapes e São Lourenço da Mata. O município é banhado a leste pelo Oceano Atlântico e tem sua população estimada em 1.661.017 de pessoas, as quais vivem em uma área territorial de 218,84 km², que resultam em uma densidade demográfica de 7.584,55 (hab.km⁻²) habitantes por quilômetros quadrados (IBGE, 2021). O clima de Recife, conforme a classificação de Köppen (1936), é (As) quente e úmido. Ademais, do estudo realizado no período 1961 a 2008, obteve-se a temperatura média anual do ar de 25,5 °C. A precipitação média anual de 2.305 mm (período de mais chuvas concentrado no quadrimestre entre abril e julho) e a umidade relativa média anual de 80% (SOUZA e AZEVEDO, 2009).

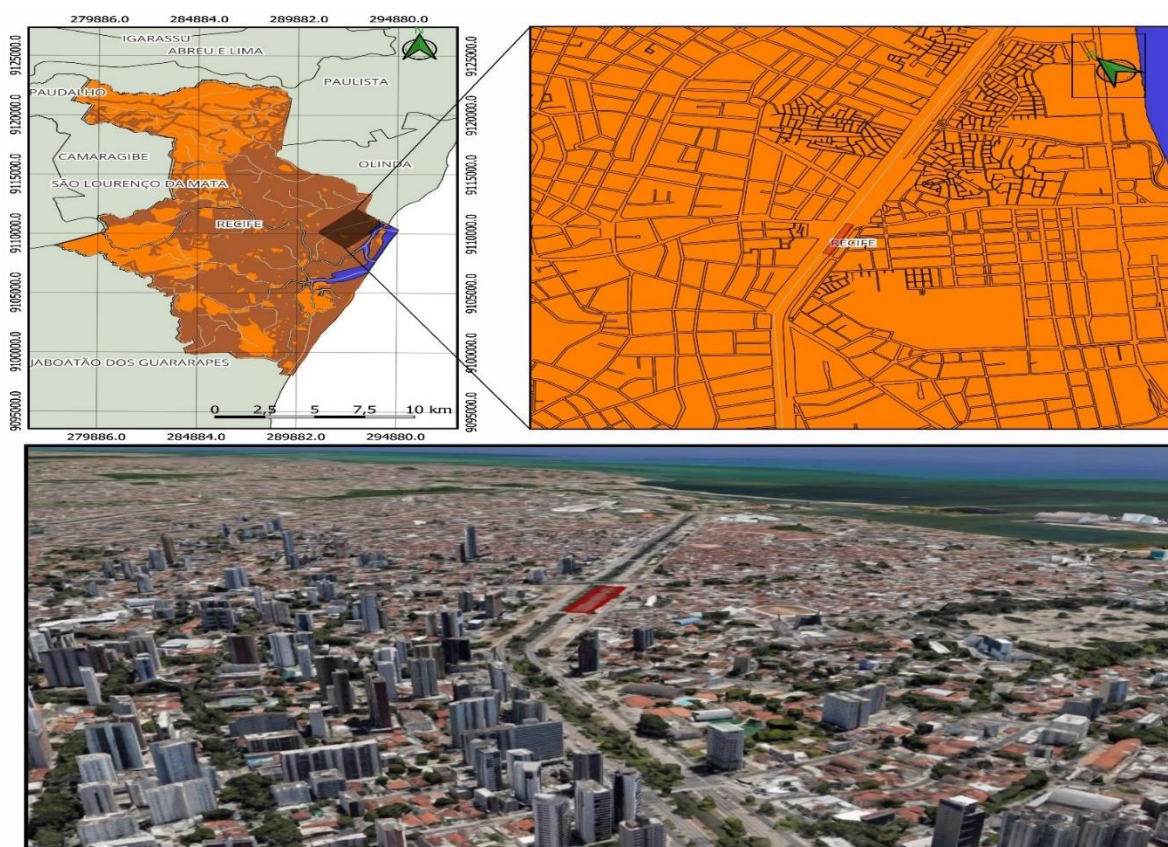


Figura 2- Localização do trecho de estudo.
Fonte: Autores (2023).

A Av. Governador Agamenon Magalhães foi a via selecionada para o inventário de emissões veiculares, no trecho que se inicia na Ponte José de Barros Lima (início) até as

mediações do Shopping Center Tacaruna (fim), no sentido Boa Viagem – Olinda. A parte específica da via (Figura 2), selecionada com vistas a diminuir possíveis interferências nas estimativas, consiste em um percurso de exatos 200 metros de via com intenso fluxo de veículos, onde estão as lombadas eletrônicas, CTTU 5948 e CTTU 5949, entre a latitude 8° 2'35.47"S e longitude 34°53'9.13"O (GOOGLE, 2023).

2.3. Distância percorrida

A distância percorrida faz parte de um dos dados de entrada para o cálculo do inventário. Esse dado é importante, uma vez que, o seu aumento ou sua diminuição, acarretará numa estimativa para mais ou para menos em um inventário.

No caso específico da pesquisa, adotou-se a distância de 200 metros, no local de maior fluxo veicular, além disso, esse trecho houve menos interferência de entrada e saída de veículos, dando a certeza que todos os veículos passaram pelo local, viabilizando o cálculo dos poluentes da emissão veicular mais próximo do real.

Por isso, optou-se pelo recorte de trecho da Av. Agamenon Magalhães, para estimar a partir dele a quantidade de poluentes de emissões veiculares, desconsiderando outros tipos de emissões como evaporativas, de ressuspensão do solo e de outras fontes como as fixas.

Além disso, para uma melhor análise e redução de erros redundantes de inventários na estimativa de emissões, levou em consideração o período referente ao ano de 2021 como o ano de referência para a pesquisa. Os radares eletrônicos adotados para o inventário estão na Figura 3. A partir deles, obteve-se o quantitativo de veículos que passaram pela via.



Figura 3- Localização dos radares adotados.
Fonte: Adaptado do Google (2023).

2.4. Caracterização da frota veicular

Os dados veiculares utilizados para mensuração do inventário foram obtidos no site da Prefeitura da Cidade do Recife (RECIFE, 2021) e no portal da transparência no Departamento Estadual de Trânsito de Pernambuco (DETRAN, 2021). O DETRAN contribuiu com a frota de veículos registrados em Recife (Figura 4) e a Prefeitura do Recife com os veículos circulantes nos radares de trânsito da Avenida Agamenon Magalhães (Tabela 2).

Tabela 2 - Total de veículos circulante na Av. Agamenon Magalhães no sentido Olinda (destaque para o mês de maior fluxo) - 2021.

MÊS	CTTU (5948) e (5949)
Janeiro	530.659
Fevereiro	1.084.995
Março	1.111.911
Abril	1.088.912
Maio	1.136.885
Junho	1.116.470
Julho	1.156.171
Agosto	1.105.716
Setembro	934.013
Outubro	1.270.256
Novembro	1.257.586
Dezembro	1.065.529
Total anual	12.859.103

Fonte: Adaptado de Recife (2021).

Aqui, no que confere à quantidade de veículos circulantes nos radares de trânsito da Avenida Agamenon Magalhães (Tabela 2), os dados foram adquiridos junto à Prefeitura do Recife por meio do seu site oficial. Assim, foram obtidos os dados das lombadas eletrônicas CTTU 5948 e CTTU 5949 - ambas contemplando 2 faixas, as quais estão localizadas no mesmo trecho, mas em lados opostos (RECIFE, 2021). Com vistas a esses dados, selecionou-se, para fins de inventário, o ano de 2021 como o período de tempo investigado, e o mês com maior fluxo veicular, nesse caso, outubro desse mesmo ano. Esse foi o recorte temporal mais representativo, pois evidencia o momento mais crítico de emissões veiculares, conforme a Tabela 2.

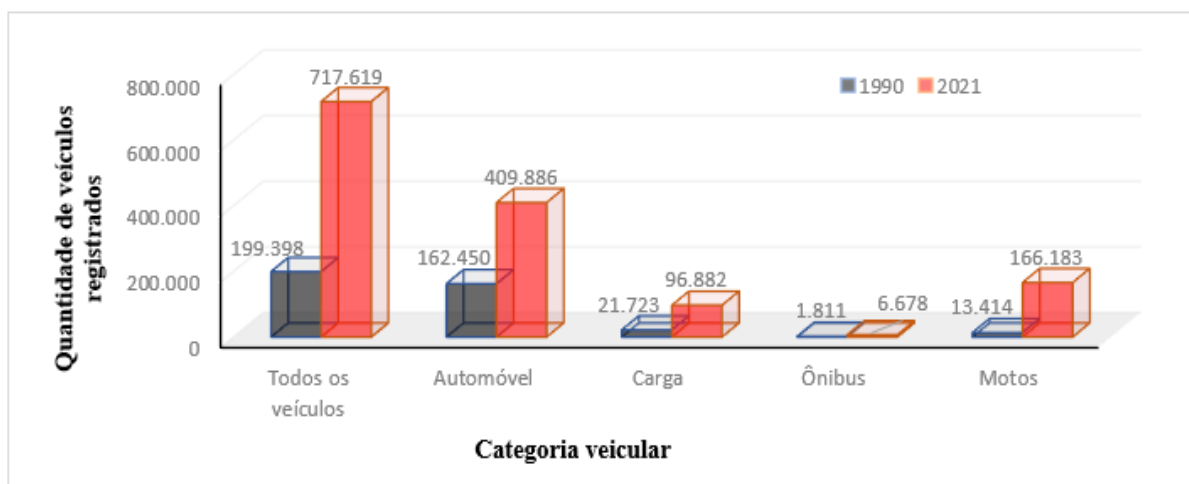


Figura 4- Registro de veículos em 1990 e 2021.

Fonte: Adaptado de DETRAN (2021).

Já nesse caso dos dados referentes à frota de veículos registrados em Recife (Figura 4), eles foram solicitados junto ao portal da transparência do Departamento Estadual de Trânsito de Pernambuco (DETRAN, 2021). Os dados recebidos foram agrupados nas categorias leves, comerciais leves, motos e pesados, conforme mostra a Tabela 3. Os veículos leves representam os automóveis; os comerciais leves contemplam os caminhões, as caminhonetes e as camionetas; já os veículos pesados são os ônibus e microônibus; ademais, existem as motos, que abarcam motocicletas, motonetas e ciclomotores. Por fim, tem-se a categoria "outros", que englobam os veículos que compõem a frota: diesel/GNV, elétrico fonte externa, elétrico fonte interna, gás metano, gasogênio e sem combustível. Sendo que esse último representa 99% do total da categoria (DETRAN, 2021). Portanto, a classificação denominada "outros" não foi considerada para fins de simplificação de cálculos.

Tabela 3 - Agrupamento da categoria veicular por tipos de combustíveis.

TOTAL DE VEÍCULOS E DISTRIBUIÇÃO DA FROTA DE RECIFE POR TIPO DE VEÍCULO NO ANO DE 2021			
CATEGORIAS	Classe (DETRAN PE)	Nº DE VEÍCULOS	%
Leves	Automóvel	409.886	57,12
Comerciais Leves	Carga	96.882	13,50
Pesados	Ônibus	6.678	0,93
Motos	Motos	166.183	23,16
Outros	Outros	37.990	5,29
	Total	717.619	100

Fonte: Adaptado de DETRAN (2021).

Com vistas à realização dos cálculos das emissões, foi necessária fazer a ponderação entre a frota registrada em Recife e a quantidade de veículos circulantes no local objeto de estudo, conforme demonstrado na Tabela 4.

Tabela 4 - Categorização por ponderação da frota veicular com o fluxo veicular do radar.

Aplicação da ponderação da frota registrada e fluxo veicular na Av. Agamenon Magalhães em outubro de 2021

Mês 10	Fator de ponderação:	0,571	0,231	0,009	0,135
Dias	Total veículo	Automóveis	Motos	Ônibus	Caminhões
1	46098	26322	10695	415	6223
2	38959	22246	9038	351	5259
3	32001	18273	7424	288	4320
4	42957	24528	9966	387	5799
5	44353	25326	10290	399	5988
6	36935	21090	8569	332	4986
7	45396	25921	10532	409	6128
8	47518	27133	11024	428	6415
9	38934	22231	9033	350	5256
10	30606	17476	7101	275	4132
11	40374	23054	9367	363	5450
12	31723	18114	7360	286	4283
13	44732	25542	10378	403	6039
14	44588	25460	10344	401	6019
15	46104	26325	10696	415	6224
16	36842	21037	8547	332	4974
17	31658	18077	7345	285	4274
18	42246	24122	9801	380	5703
19	45485	25972	10553	409	6140
20	45787	26144	10623	412	6181
21	46437	26516	10773	418	6269
22	47485	27114	11017	427	6410
23	38450	21955	8920	346	5191
24	32394	18497	7515	292	4373
25	44445	25378	10311	400	6000
26	42306	24157	9815	381	5711
27	45137	25773	10472	406	6093
28	45965	26246	10664	414	6205
29	45310	25872	10512	408	6117
30	38949	22240	9036	351	5258
31	30082	17177	6979	271	4061

Fonte: Adaptado de DETRAN (2021) e Recife (2021).

2.5. Fator de emissão

Em inventários de emissão de poluentes por fontes móveis, as estimativas de emissões veiculares são comumente geradas utilizando fatores de emissão (FE) para cada tipo de veículo, juntamente com informações sobre a frota veicular. Os fatores de emissão representam a massa de um composto emitida por distância percorrida e são normalmente baseados em medições realizadas em condições controladas (LACEY; DE MELO LISBOA, 2007).

Os fatores de emissão para as categorias de veículos leves, comerciais leves, pesados e motos e pesados são apresentados na Tabela 5. Esses fatores de emissões foram propostos por Cancelli e Dias (2014). Eles são resultados das médias do primeiro Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários. Assim, cada categoria veicular tem seu fator atrelado a um poluente. Além disso, os fatores de emissão não tiveram seus dados acrescidos em razão da intensidade de uso dos veículos.

Tabela 5 - Fatores de emissão alternativos quando utilizado número total de veículo por categoria.

CATEGORIAS e POLUENTES	CO (g.km ⁻¹)	NO _x (g.km ⁻¹)	RCHO (g.km ⁻¹)	NMHC (g.km ⁻¹)	CH ₄ (g.km ⁻¹)	MP (g.km ⁻¹)	CO ₂ (g.km ⁻¹)
Automóveis e veículos comerciais leves	1,2	0,4	0,01	0,4	0,15	0,015	210
Motocicletas	3	0,15	-	0,5	0,1	0,01	210
Caminhões leves, médios e pesados	1	0,4	-	5	-	0,15	445
Ônibus urbanos e rodoviários	1,1	0,5	-	9	-	0,2	445

Fonte: Adaptado de Cancelli e Dias (2014).

3. RESULTADOS

Na cidade do Recife, a frota de veículos registrada no DETRAN passou de 230.451 mil veículos em 1991 para 717.619 mil em 2021, resultando em um aumento de aproximadamente 212%. Desse total, a classe automóvel passou de 162.450 mil para 409.886 mil, em um aumento de 152%. Os veículos da classe carga foram de 21.723 a 96.882, contabilizando 346% de aumento. Os ônibus, em 1990, tinham uma frota de 1.811, que cresceu para 6.678, em 2021, um aumento porcentagem de 269%. Já a classe motos foi de 13.414 para 166.183, representando um aumento expressivo de 1139%.

Confrontando os números da população estimada do Recife, em 2021, que era de 1.661.017 habitantes (IBGE), e a frota total registrada no DETRAN neste mesmo ano, chega-

se à média de um veículo para cada 2,3 habitantes. Isso é reflexo do aumento do poder aquisitivo da população, de incentivos fiscais e, principalmente, da falta de transporte público com qualidade (ANTP, 2012).

Sendo assim, o inventário de emissões veiculares levou em consideração o ano de 2021 como referência. Aqui, estimou-se uma frota registrada de aproximadamente 718 mil veículos, distribuídos nas categorias: automóveis, comerciais leves, moto, ônibus e outros (DETRAN, 2021). Além disso, a frota de veículos que transitou pelas lombadas eletrônicas, CTTU 5948 e CTTU 5949, no ano de 2021, foi de 12.859.103, totalizando uma média mensal de 1.071.591. O total anual, no trecho pesquisado, emitiu uma poluição estimada de 3.922,03 kg de CO; 831,98 kg de NO_x; 14,66kg de RCHO; 2.913,87 kg de NMHC; 279,04 kg de CH₄; 87,06kg de MP; e 603.743,89 kg de CO₂ (Tabela 6).

Um inventário de emissões veiculares para o ano de 2018 a partir de 32 vias, conduzido por Brandão (2021), levando em consideração a cidade de Salvador, mostra que, no mês de janeiro, o fluxo veicular na Av. Paralela foi de 1.349.070. A frota licenciada no Departamento de Trânsito na cidade era de 888.747 veículos e os poluentes inventariados foram CO, NMHC, NO_x, MP. Nesse estudo, foram propostos três cenários de possibilidades de emissões veiculares com fatores de emissões distintos. Um desses cenários diz respeito à observação do fluxo veicular de avenidas, informações que foram obtidas por meio dos radares de velocidades.

Brandão (2021) não disponibilizou os totais de emissões de poluentes referentes às 32 vias, mas utilizou esses totais para calcular a quantidade em toneladas para ano de 2018 em toda a cidade de Salvador. Segundo a pesquisa, foram 16.500 de CO, 2.070 de NMHC, 16.200 de NO_x, 2.970 de MP. Ele ressalta, ainda, que a margem de incerteza das variáveis selecionadas, distância percorrida anual (média) dos veículos e fatores de emissões utilizados, foi de 30%.

Ao observar esses dados de emissão de forma média, pelas 32 vias usadas nesse inventário, e convertendo para quilogramas, observa-se uma média de emissão, em quilograma, por via, de cerca de 515.000 de CO, 64.000 de NMHC, 506.000 de NO_x, 92.000 de MP, resultado muito maior do que aquele apresentado pela presente pesquisa.

Isso se explica porque a distância selecionada para a pesquisa em Recife não fez uso da projeção do uso veicular anual e sim da quantidade de veículos, que foi de 100% da frota real em circulação no trecho analisado e também do tamanho da via selecionado.

No que compete aos fatores de emissões, tanto o inventário de Recife quanto o de Salvador usam dados do primeiro Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários, porém de formas diferentes. O de Brandão (2021) fez ajustes em

relação as idades dos veículos, já o no de Recife adotou-se o método simplificado de Cancelli e Dias (2014).

Uma outra pesquisa, de autoria de Soto Baca (2017), realizada em Lima, no Peru, em trecho de 0,79 km com alto fluxo veicular, apurou que a emissão de dióxido de carbono (CO₂) foi de 892.814,1 kg no ano de 2017. O método usado é similar ao *bottom-up*, porém com especificidades diferentes.

Nessa pesquisa, o fluxo veicular calculado foi de 12.724 veículos diários. Assim, para estimar a quantidade de emissão por veículo, usou-se dados gerais do “*transportation energy data book*” e da agência de proteção ambiental dos Estados Unidos da América, as quais disponibilizam um fator de emissão (8,81 kg de CO₂) por galão americano consumidos, que 1 galão são 3,78 litros. O produto dessas variáveis resultou, então, na emissão de CO₂ por dia de 2.446,34 kg (SOTO BACA, 2017).

A pesquisa do Peru, portanto, apresenta similaridades quanto à de Recife no que diz respeito aos métodos empregados, já que ambas as pesquisas fizeram uso da simplificação dos fatores de emissões e envolvem variáveis diretamente proporcionais. Dessa forma, maiores quantidades de veículos e maiores percursos implicam em aumento nas emissões. Por fim, o método usado no Peru não categorizou os veículos observando a idade da frota, colocando-os como se fossem iguais. Isso tudo resume o porquê dos resultados de ambas as pesquisas.

Tabela 6 - Total de emissões em 2021 de CO, NO_x, RCHO, NMHC, CH₄, MP e CO₂ em quilos.

MÊS	CTTU (5948) e (5949)	CO(kg)	NO _x (kg)	RCHO (kg)	NMHC (kg)	CH ₄ (kg)	MP (kg)	CO ₂ (kg)
Janeiro	530.659	161,85	34,33	0,60	120,25	11,52	3,59	24.914,44
Fevereiro	1.084.995	330,92	70,20	1,24	245,86	23,54	7,35	50.940,52
Março	1.111.911	339,13	71,94	1,27	251,96	24,13	7,53	52.204,22
Abril	1.088.912	332,12	70,45	1,24	246,75	23,63	7,37	51.124,42
Mai	1.136.885	346,75	73,56	1,30	257,62	24,67	7,70	53.376,75
Junho	1.116.470	340,52	72,24	1,27	252,99	24,23	7,56	52.418,27
Julho	1.156.171	352,63	74,80	1,32	261,99	25,09	7,83	54.282,23
Agosto	1.105.716	337,24	71,54	1,26	250,56	23,99	7,49	51.913,37
Setembro	934.013	284,87	60,43	1,06	211,65	20,27	6,32	43.851,91
Outubro	1.270.256	387,43	82,19	1,45	287,84	27,56	8,60	59.638,52
Novembro	1.257.586	383,56	81,37	1,43	284,97	27,29	8,51	59.043,66
Dezembro	1.065.529	324,99	68,94	1,21	241,45	23,12	7,21	50.026,59
Total anual	12.859.103	3.922,03	831,98	14,66	2.913,87	279,04	87,06	603.734,89

Fonte: Autores (2023).

Em termos percentuais, cabe observar que a classe automóvel, composta por aproximadamente 57,1% da frota de veículos circulantes (Figura 5), no trecho em estudo, no ano de 2021, foi responsável pela liberação de 100% das emissões com aldeídos (RCHO). Isso se deve ao fato de o fator de emissão adotado para as outras classes veiculares terem sido zero. Inclusive, essa também foi a classe com os maiores índices de emissão dos poluentes, NO_x , CH_4 e CO_2 .

Já na pesquisa de Pinheiros et al. (2017), acerca dos resultados do inventário dos poluentes CO, HC, NO_x , RCHO e MP, realizada a partir da frota de 2013 do município de Manaus (53,54% da frota de Manaus pertencem a categoria auto - mesmo que automóvel), a liberação de aldeído (RCHO) representou 75% da emissão por automóvel, resultado próximo ao apresentado pela pesquisa de Recife. Isso se deve ao fato de ambas as pesquisas apresentarem fatores de emissão zero para algumas classes.

Ainda no que confere à pesquisa realizada em Manaus, as demais emissões de poluentes, para cada automóvel por ano, foram de cerca de 52,52 kg de CO, 19,01 kg de HC, 21,22 kg de NO_x , 0,15 de RCHO e 0 kg de MP. Em contrapartida, o trecho em Recife para os mesmos poluentes, emitiu e por ano, respectivamente, 1.759,13 kg de CO, 586,38kg de NO_x , 14,66kg de RCHO e 21,99 kg de MP.

A classe carga, por sua vez, que é distribuída entre caminhões, caminhoneta, caminhonete e representou cerca de 13,5% da frota, emitiu por volta de 62% de material particulado (MP) e, também, 62% de hidrocarbonetos não metano (NMHC) (Figura 5).

Nessa acepção, o INEA (2016) argumenta que a quantidade vultuosa de MP é explicada em razão de essa classe se utilizar, principalmente, do diesel como combustível. Já no caso do NMHC, as duas categorias (caminhão e automóveis) representam juntas cerca de 80% das emissões desse poluente. Esse resultado é semelhante ao da pesquisa de Recife, pois, ao somar as classes (carga e automóvel), resultam em 82% de emissões de NMHC. Sobre esses resultados, Aguiar e De Albuquerque (2012) afirmam ser preocupante a emissão de NMHC, pois intensificam a produção do gás do efeito estufa e do gás ozônio na troposfera.

Na classe moto, 23,2% da frota, quantidade bem menor que a classe automóvel, contribui relevantemente para a emissão de monóxido de carbono (CO), 45,2% (Figura 5). Para fins de comparação, foi realizado um inventário, em Taiwan, em que se constatou o seguinte: as motocicletas podem emitir até 12 vezes mais CO que outras classes veiculares (HUNG et al., 2012). Ademais, o CO é derivado de combustão incompleta e muito presente em grandes centros urbanos, por haver mais veículos em circulação (GUIMARÃES, 2011).

Já as maiores emissões da classe ônibus, que representa a menor quantidade da frota total em circulação, foram de hidrocarbonetos não metano (NMHC) e material particulado (MP). Contudo, as emissões (Figura 5) do MP apresentaram resultado menor, quando comparação aos das demais classes veiculares. A explicação para esses resultados pode encontrar respaldo nos investimentos nas adequações dos veículos com vistas à melhora na qualidade do ar, conforme argumenta Andrade et al. (2017), ao mostrar a evolução da quantidade de MP num período de 30 anos na Região Metropolitana de São Paulo. Segundo eles, uma diminuição do total de MP foi resultado de políticas como a do PROCONVE - Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores, lançado pelo Governo Federal em 1986.

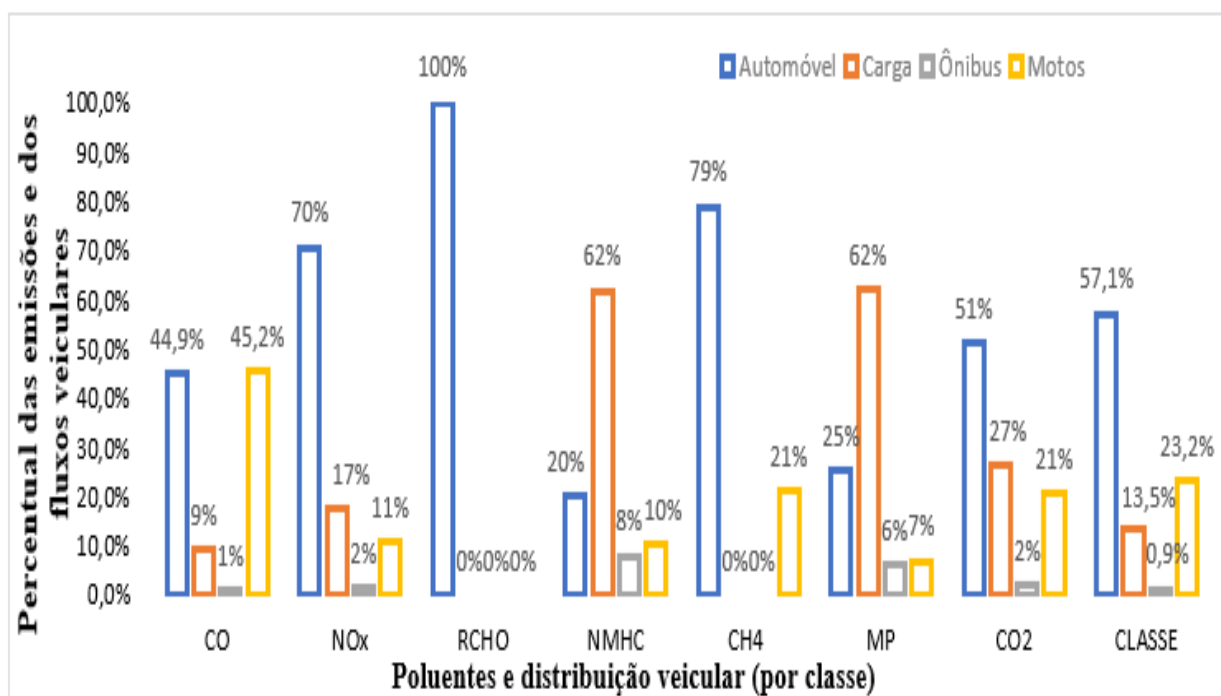


Figura 5 - Percentual de poluentes por categoria veicular.

Fonte: Autores (2023).

Ao levar em consideração os índices de emissão no período de todo o ano de 2021, o mês de outubro foi o que mais emitiu poluição (Tabela 7). Nesse mês, os dias 8 e 31 foram, respectivamente, os dias mais e menos críticos. A diferença entre esses dois dias variou nas emissões de poluição em 5,31 kg CO; 1,12 kg de NO_x; 0,01 kg de RCHO; 3,95 kg de NMHC; 0,37 kg de CH₄; 0,11 kg de MP; e 818,62 kg de CO₂.

Tabela 7 - Taxa de emissões de poluentes em outubro 2021, com destaque para os dias de maior e de menor emissão.

Outubro		Quantidade de emissão dos poluentes						
Dias	Total veículo	CO(kg)	Nox(kg)	RCHO(kg)	NMHC(kg)	CH ₄ (Kg)	MP(kg)	CO ₂ (kg)
1	46.098	14,06	2,98	0,05	10,45	1,00	0,31	2.164,30
2	38.959	11,88	2,52	0,04	8,83	0,85	0,26	1.829,13
3	32.001	9,76	2,07	0,04	7,25	0,69	0,22	1.502,45
4	42.957	13,10	2,78	0,05	9,73	0,93	0,29	2.016,83
5	44.353	13,53	2,87	0,05	10,05	0,96	0,30	2.082,37
6	36.935	11,27	2,39	0,04	8,37	0,80	0,25	1.734,10
7	45.396	13,85	2,94	0,05	10,29	0,99	0,31	2.131,34
8	47.518	14,49	3,07	0,05	10,77	1,03	0,32	2.230,97
9	38.934	11,87	2,52	0,04	8,82	0,84	0,26	1.827,95
10	30.606	9,33	1,98	0,03	6,94	0,66	0,21	1.436,95
11	40.374	12,31	2,61	0,05	9,15	0,88	0,27	1.895,56
12	31.723	9,68	2,05	0,04	7,19	0,69	0,21	1.489,39
13	44.732	13,64	2,89	0,05	10,14	0,97	0,30	2.100,17
14	44.588	13,60	2,88	0,05	10,10	0,97	0,30	2.093,41
15	46.104	14,06	2,98	0,05	10,45	1,00	0,31	2.164,58
16	36.842	11,24	2,38	0,04	8,35	0,80	0,25	1.729,73
17	31.658	9,66	2,05	0,04	7,17	0,69	0,21	1.486,34
18	42.246	12,89	2,73	0,05	9,57	0,92	0,29	1.983,45
19	45.485	13,87	2,94	0,05	10,31	0,99	0,31	2.135,52
20	45.787	13,97	2,96	0,05	10,38	0,99	0,31	2.149,70
21	46.437	14,16	3,00	0,05	10,52	1,01	0,31	2.180,22
22	47.485	14,48	3,07	0,05	10,76	1,03	0,32	2.229,42
23	38.450	11,73	2,49	0,04	8,71	0,83	0,26	1.805,23
24	32.394	9,88	2,10	0,04	7,34	0,70	0,22	1.520,90
25	44.445	13,56	2,88	0,05	10,07	0,96	0,30	2.086,69
26	42.306	12,90	2,74	0,05	9,59	0,92	0,29	1.986,27
27	45.137	13,77	2,92	0,05	10,23	0,98	0,31	2.119,18
28	45.965	14,02	2,97	0,05	10,42	1,00	0,31	2.158,06
29	45.310	13,82	2,93	0,05	10,27	0,98	0,31	2.127,30
30	38.949	11,88	2,52	0,04	8,83	0,85	0,26	1.828,66
31	30.082	9,18	1,95	0,03	6,82	0,65	0,20	1.412,35
Outubro	1.270.256	387,43	82,19	1,45	287,84	27,56	8,60	59.638,52

Fonte: Autores (2023).

No tocante às emissões diárias dos poluentes (Tabela 7), pode-se observar que a quantidade de cada poluente variou diariamente ao longo do mês de outubro. Essa variação seguiu um padrão pela quantidade de veículos automotores circulantes que passaram pela lombada, quanto mais veículos, mais poluição. Os domingos (3,10, 17, 24 e 31), por exemplo, foram os dias da semana com os menores índices de poluição, já a maioria dos dias com as

taxas mais altas de poluição foram as sextas-feiras (1, 8, 15, 22). Na média diária dos dias de semana e dos finais de semana (Tabela 8), verificou-se que houve uma redução de 21% de emissões de poluentes. Além disso, a via é totalmente urbana, não possui medidas de restrições a circulações de veículos, como rodízios de veículos e pedágios.

Tabela 8 - Taxas médias de emissões de poluentes no mês de outubro.

DIAS DA SEMANA	CO (kg)	No _x (kg)	RCHO (kg)	NMHC (kg)	CH ₄ (Kg)	MP (kg)	CO ₂ (kg)
Segunda a sexta	13,49	2,86	0,05	10,02	0,96	0,30	2076,65
Sábado e domingo	10,64	2,26	0,04	7,91	0,76	0,24	1637,99
Diminuição em:	21%						

Fonte: Autores (2023).

Com base nisso, realizou-se, também, a média da quantidade de veículos referentes aos dias de semana e aos dias dos finais de semana (Figura 6). Os resultados ratificam que a contribuição maior de emissões de poluição acontece nos dias de semana, tendo uma diminuição expressiva de veículos nos fins de semana. Em média, nos dias de semana, passam 44.231 veículos. Já nos finais de semana são 34.888 veículos. A diferença representa 21,12% de carros que trafegam na semana, dado que se reflete também nas médias das emissões. Outro ponto que corrobora esses dados é o resultado do fluxo veicular no feriado do dia 12 de outubro. Na semana em que ocorreu o feriado, foi registrada a menor média de fluxo de veículos (Figura 6).

Exemplo parecido com esse, diz respeito ao impacto positivo que o isolamento e a diminuição de veículos nas ruas trouxeram a nível nacional, quando do efeito da menor circulação em razão da pandemia de COVID-19. Isso foi mostrado pelo inventário de emissões veiculares feito no período de janeiro a maio de 2020, o qual mostra uma redução de 14% nos níveis de poluente causadores do efeito estufa provocados pelos veículos, exceto os caminhões e semipesados (LOBATO et al., 2020).

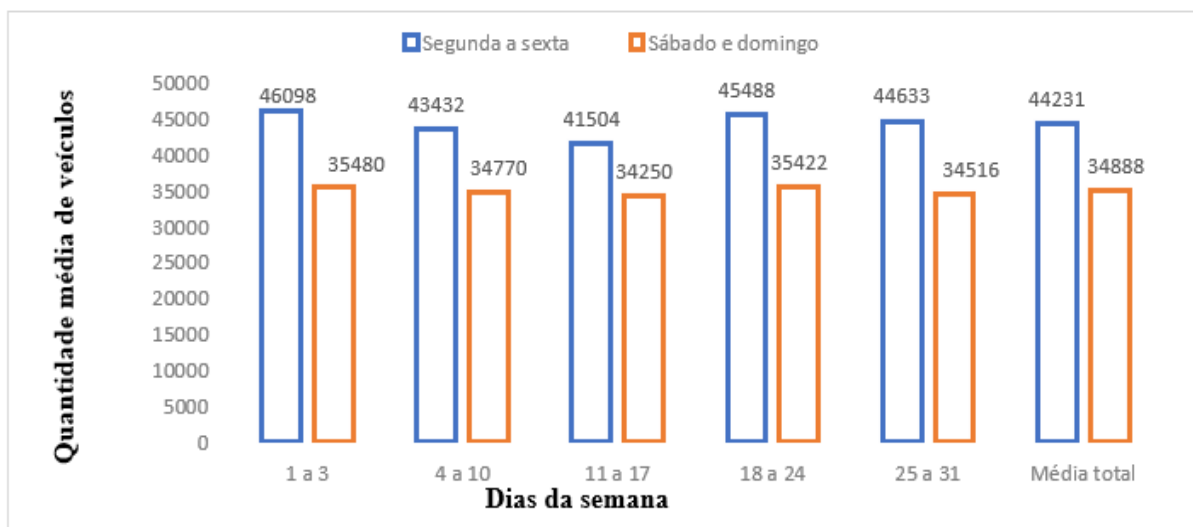


Figura 6 – Fluxo médio veicular da semana (segunda a sexta) e finais de semana (sábado e domingo).
Fonte: Autores (2023).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No Estado de Pernambuco, existem seis estações de monitoramento da qualidade do ar. Quatro delas estão localizadas no Município de Ipojuca, outras duas no Cabo de Santo Agostinho. Nesse último caso, uma delas está desativada desde 2020. Cabe frisar, pois, que nenhuma delas se localiza no Município do Recife, capital do Estado.

Nessa perspectiva, e a partir do levantamento de dados de natureza pública, foi possível organizar as informações necessárias para a realização do inventário das emissões de CO (monóxido de carbono), NO_x (óxidos de nitrogênio), RCHO (aldeídos), NMHC (hidrocarbonetos não metano), CH₄ (metano), MP (material particulado) e CO₂ (dióxido de carbono) dos veículos em circulação da Av. Agamenon Magalhães, na cidade de Recife – PE, calculadas com base na metodologia proposta por Cancelli e Dias (2014).

A pesquisa considerou como emissões somente o escapamento veicular, desconsiderando qualquer outra fonte poluidora. Para isso, usou-se a abordagem *bottom-up*, a qual usa o total de emissões inventariadas e quantificadas a partir do somatório das emissões típicas de cada categoria de veículo, ou seja, considera-se o perfil da frota e a distância percorrida, que também pode ser mensurada pela intensidade de uso do veículo. No entanto, por falta de dados locais mais precisos, a intensidade de uso da frota não foi considerada, levando-se em conta apenas o espaço percorrido no local indicado, nesse caso, o de maior fluxo veicular, com vistas a calcular as taxas de emissões dos seguintes poluentes: CO, NO_x, RCHO, NMHC, CH₄, MP e CO₂.

O foco foi na quantificação de poluentes atmosféricos. Especificamente, verificou-se como ocorre a contribuição das diferentes classes de veículos automotores na poluição do ar, além de todas juntas, em um trecho de grande movimento.

Na cidade de Recife, registrou-se um crescimento de 212% de 1991 a 2021 na quantidade de veículos. Esse aumento propiciou maiores liberações de emissões de diversos poluentes, tanto diários quanto mensais e anuais. No ano de 2021, a contribuição de CO (monóxido de carbono) e CO₂ (dióxido de carbono) foram as maiores. Porém, quando se observa a partir de cada uma das classes, a dos automóveis foi responsável majoritariamente pelas emissões de poluentes atmosféricos. Isso se justifica pela quantidade da frota dessa categoria, que representa 57,12% do total.

O mês de maior poluição em 2021 foi outubro, responsável por 10% de toda emissão. Os dias 8 e 31 foram os dias com mais e menos poluição, respectivamente. Além disso, nos dados médios desse mês, constatou-se que os dias de semana são os que mais poluem, e os de finais de semanas apresentam redução da poluição. Isso se dá pelo fato de haver uma redução da quantidade de veículos circulando, diminuindo substancialmente em 21% a emissão na quantidade de poluentes.

O objetivo de produzir um inventário em uma dada região de grande movimento veicular, no ano de 2021, foi atingido. Ressalta-se, porém, que, apesar da quantidade de variáveis empregadas (quantidade de veículos, distância percorrida e fatores de emissão investigados), os resultados apresentam relevância por mostrarem a configuração da emissão de poluentes em determinada área de estudo. O cálculo do inventário poderia estar melhor contextualizado se, para o trecho selecionado para análise, houvesse literatura com reflexões e cálculos semelhantes, para fins de melhor comparação.

Pode-se concluir que esse inventário de emissões veiculares gerou subsídio à compreensão dos índices de poluição do trecho observado. É um tipo de investigação ágil que contribuiu para o preenchimento desta lacuna na base de referências da área de poluição do ar na Região de Recife. Esses dados podem servir como base de comparação para futuros trabalhos com abordagens de diferentes métodos, além de fornecerem informações úteis para possíveis implementações de políticas públicas que visem à proteção da comunidade urbana, tanto no quesito monitoramento quanto no controle da qualidade do ar.

AGRADECIMENTO

À Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE), pelo apoio

financeiro.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental – PPAMB/PE pelo suporte à pesquisa.

Ao Departamento Estadual de Trânsito de Pernambuco (DETRAN - PE) e à Prefeitura da Cidade do Recife (RECIFE - PE) pela disponibilidade dos dados, essenciais para a realização deste estudo.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, A. M. F.; DE ALBUQUERQUE, É. L. Inventário de emissões veiculares da Região Metropolitana de Salvador para o ano de 2010. **XII Safety, Health and Environment World Congress (SHEWC)**. 22 – 25 julho, São Paulo, Brasil. p. 408 – 412, 2012,

ANTP. Associação Nacional de Transportes Públicos. **Sistema de Informações da Mobilidade Urbana da ANTP**. Dezembro/2012. Série relatórios. São Paulo, 2011.

ANDRADE, M. De F., KUMAR, P., DE FREITAS, E. D., YNOUE, R. Y., MARTINS, J., MARTINS, L. D. & ZHANG, Y. Air quality in the megacity of São Paulo: Evolution over the last 30 years and future perspectives. **Atmospheric environment**, v. 159, p. 66-82, 2017.

BRANDÃO, P. V. R. **Estudo da dispersão atmosférica de poluentes originários da frota veicular em Salvador–BA**. 190 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – UFBA, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2021.

CANCELLI, D. M.; DIAS, N. L. BRevê: uma metodologia objetiva de cálculo de emissões para a frota brasileira de veículos. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 19, p. 13-20, 2014.

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Inventário de emissão veicular: metodologia de cálculo**. São Paulo, 1994.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar. Resolução n.491, de 19 de novembro de 2018. **Diário Oficial da União**, nº223, de 21/ 11/ 2018, Seção 01, P.155-156.

CPRH - Agência Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. **Qualidade do Ar - rede de monitoramento**. Pernambuco. 2023. Disponível em: <http://www2.cprh.pe.gov.br/monitoramento-ambiental/qualidade-do-ar-2/rede-de-monitoramento/> . Acesso em: 20 mai. 2023.

DETRAN. Departamento Estadual de Trânsito de Pernambuco. **Serviço de Informações ao Cidadão do Departamento Estadual de Trânsito de Pernambuco (SIC/DETRAN-PE)**, [Pernambuco]: DETRAN, [2021]. Disponível em: <https://www.detran.pe.gov.br/institucional-detran/portal-da-transparencia>. Acesso em: 10 fev. 2022.

GOOGLE. **Google Earth website**. <http://earth.google.com/> , 2023. Acesso em: 02 fev. 2023.

GUIMARÃES, P. R. B. **Estudo sobre as relações entre as doenças respiratórias e a poluição atmosférica, variáveis climáticas e áreas verdes, na Cidade de Curitiba, Paraná, Brasil.** 2011. (Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, PR, BR, 2011.

HOINASKI, L.; VASQUES, T. V.; MEOTTI, B.; WILL, R.; RIBEIRO, C. B.; DOS SANTOS, O. N.; RODELLA, F. H.; PLACIDO, J.; CHIMINELLI, R. **Avaliação do impacto das emissões veiculares, queimadas, industriais e naturais na qualidade do ar em Santa Catarina.** Série relatórios. Santa Catarina, 2021.

HOINASKI, L.; VASQUES, T. V.; RIBEIRO, C. B.; MEOTTI, B. Multispecies and high-spatiotemporal-resolution database of vehicular emissions in Brazil. **Earth System Science Data**, v. 14, n. 6, p. 2939-2949, 2022.

HUNG, L. J., CHAN, T. F., WU, C. H., CHIU, H. F., & YANG, C. Y. Traffic air pollution and risk of death from ovarian cancer in Taiwan: fine particulate matter (PM_{2.5}) as a proxy marker. **Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A**, 75(3), 174-182, 2012.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades e Estados, **Estimativa populacional do Recife em 2021.** Brasil, Pernambuco, Recife. 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pe/recife.html> Acesso em: 05 set. 2021.

IEMA. Instituto de Energia e Meio Ambiente. Plataforma da qualidade do ar. **Downloads dos dados, Pernambuco.** Brasil, Pernambuco, 2023. Disponível em: <https://energiaeambiente.org.br/qualidadedoar/> . Acesso em: 29 mai. 2023.

INEA. Instituto Estadual do Ambiente (RJ). **Inventário de emissões de fontes veiculares: região metropolitana do Rio de Janeiro** / Instituto Estadual do Ambiente (RJ), [autores: Luciana Maria Baptista Ventura; Felipe de Oliveira Pinto]. – Rio de Janeiro: INEA, 2016.

KÖPPEN, W. **Das geographische System der Klimate.** In: KÖPPEN, W., GEIGER, R. *Handbuch der Klimatologie.* Berlin: Gebrüder Borntraeger, 1936. p. 44.

LACEY, M. E. Q.; DE MELO LISBOA, H. Estudo em túnel viário para realização do inventário de emissões de poluentes atmosféricos por fonte veicular. In: **24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental.** 2007, Belo Horizonte/MG. Anais em forma de CompactDisc, 2007.

LANDRIGAN, P; FULLER, R.; ACOSTA, N. J. R.; ADEYI, O.; ARNOLD, R.; BASU, N.; BALDÉ, A. B.; BERTOLLINI, R.; BOSE-O'REILLY, S.; BOUFFORD, J. I.; BREYSSE, P. N.; CHILES, T.; MAHIDOL, C.; COLL-SECK, A. M.; CROPPER, M. L.; FOBIL, J.; FUSTER, V.; GREENSTONE, M.; HAINES, A.; HANRAHAN, D.; HUNTER, D.; KHARE, M.; KRUPNICK, A.; LANPHEAR, B.; LOHANI, B.; MARTIN, K.; MATHIASSEN, K. V.; MCTEER, M. A.; MURRAY, C. J. L.; NDAHIMANANJARA, J. D.; PERERA, F.; POTOČNIK, J.; PREKER, A. S.; RAMESH, J.; ROCKSTRÖM, J.; SALINAS, C.; SAMSON, L. D.; SANDILYA, K.; SLY, P. D.; SMITH, K. R.; STEINER, A.; STEWART, R. B.; SUK, W. A.; SCHAYCK, O. C. P. V.; YADAMA, G. N.; YUMKELLA, K.; ZHONG, M. The Lancet Commission on pollution and health. **The lancet**, v. 391, n. 10119, p. 462-512, 2018.

LOBATO, M. F.; RODRIGUES, B. M. M.; SANTOS, A. G. Impacto da pandemia de COVID-19 nas emissões veiculares no Brasil no período de janeiro a maio de 2020. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 26, p. 829-836, 2021.

LOUREIRO, L. N. **Panorâmica sobre emissões atmosféricas: estudo de caso: avaliação do inventário emissões 75 atmosféricas da Região Metropolitana do Rio de Janeiro para fontes móveis**. 2005. 171 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

MAES, S. A.; HOINASKI, L.; MEIRELLES, T. B.; CARLSON, R. C. A methodology for high resolution vehicular emissions inventories in metropolitan areas: Evaluating the effect of automotive technologies improvement. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, 2019.

MAIA, J. L. M.; M NETTO, V.; COSTA, B. L. G. da. Forma urbana e poluição atmosférica: impactos na cidade do Rio de Janeiro. urbe. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 11, 2019.

MORENO, A. M.; TAVARES, M. S.; RODRIGUES, C. T.; MAGALHÃES, E. M. M.; DIAS, L. A.; SILVA, K. L.; MENEZES, S. L. S. de; PIRES, G. D.; MOURA, P. H. Poluição do ar, uma grave ameaça para a saúde e a qualidade de vida da população: Uma proposta em educação ambiental. **Seven Editora**, [S. l.], p. 410–420, 2023.

OMS. **Organização Mundial da Saúde**, 2021. Disponível em: https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_1. Acesso em: 18 fev. 2022.

PINHEIRO, C. L.; DA ROCHA, K. L. S.; DOS SANTOS, D. G. Inventário de Emissões Veiculares do Município de Manaus. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, 3(4), 0647-0655. 2017.

RECIFE. Autarquia de Trânsito Urbano do Recife (CTTU). **Velocidade das Vias – Quantitativo por Velocidade Média (2021)**. Recife, 2021. Disponível em: <http://dados.recife.pe.gov.br/dataset/velocidade-das-vias-quantitativo-por-velocidade-media-2021> . Acesso em: 10 jan. 2021.

SOTO BACA, J. E. **Captura de dióxido de carbono (CO₂) de especies forestales como mecanismo de compensación ambiental en una vía de alta presión vehicular (Avenida Separadora Industrial) - Lima**. [Tesis de Licenciatura, Universidad Cesar Vallejo]. Repositorio institucional de la Universidad Cesar Vallejo. 2017.

SOUZA, W.M., AZEVEDO, P.V. Avaliação de tendências das temperaturas em Recife-PE: Mudanças climáticas ou variabilidade?. **Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia** 6, 462-472. 2009.

VORMITTAG, E. D. M., DE ARAÚJO, P. A., CIRQUEIRA, S. S. R., WICHER NETO, H.; SALDIVA, P. H. N. Análise do monitoramento da qualidade do ar no Brasil. **Estudos Avançados**, v. 35, p. 7-30, 2021.

U.S.EPA (U.S. Environmental Protection Agency) **Introduction to stationary point source emission inventory development**. 2001.

WHO. World Health Organization. Ambient Air Pollutins: a Global Assessment of Exposure Burden. **World Health Organization**, 2016. Disponível em: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/250141/9789241511353-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y> .Acesso em: 16 dez. 2022.

CAPÍTULO 2

AVALIAÇÃO DA DISPERSÃO DE MONÓXIDO DE CARBONO (CO) PROVENIENTE DE FONTES MÓVEIS EM UMA REGIÃO METROPOLITANA DE ALTO FLUXO VEICULAR

EVALUATION OF CARBON MONOXIDE (CO) DISPERSION FROM MOBILE SOURCES IN A METROPOLITAN REGION OF HIGH VEHICULAR FLOW

RESUMO

A poluição do ar é uma ameaça global à saúde pública. Ela resulta de uma grande variedade de fontes, incluindo combustão de matrizes fósseis que, em ambiente urbano, tem os veículos motorizados como um dos principais emissores de poluentes. O CO (monóxido de carbono), produzido pela queima incompleta de combustíveis fósseis, inclui-se no rol de substâncias dispersadas. A presença do CO na atmosfera é inodora, incolor, insípida e pode produzir efeitos desastrosos na saúde humana e no meio ambiente. Caso as substâncias nocivas transmitidas pelo ar não sejam detectadas, os resultados podem ser desastrosos, pois pessoas expostas a níveis elevados de CO podem desenvolver sintomas de envenenamento, que vão desde dores de cabeça, náuseas, tonturas, perda de consciência e até riscos de morte. Nesse sentido, o presente trabalho teve como objetivo investigar, por meio de simulações com o modelo HYSPLIT, a dispersão das emissões veiculares de CO e as trajetórias (*forward trajectories*) do vento em um trecho urbano de alto fluxo veicular em Recife no mês de outubro de 2021. Os resultados indicam que altas concentrações de CO ocorreram próximas ao local investigado, principalmente, no período da madrugada, de 0h às 8h. Nesse horário, foi menor a dispersão, contudo todas as simulações mostraram-se dentro do limite estabelecido pelo Conama 491/2018. Além disso, observou-se que 83% dos ventos possuem direção predominante de sudeste e contribuíram para uma dispersão maior no horário diurno, ocasionando maiores áreas atingidas pelo poluente.

Palavras-chave: Poluição do ar; Emissões veiculares; HYSPLIT; Ambiente urbano.

ABSTRACT

Air pollution is a global threat to public health, resulting from a wide range of sources, including the combustion of fossil fuels, with motor vehicles being one of the main emitters of pollutants in urban environments. Carbon monoxide (CO), produced by incomplete combustion of fossil fuels, is among the dispersed substances. The presence of CO in the atmosphere is odorless, colorless, tasteless, and can have disastrous effects on human health and the environment. If harmful substances transmitted through the air are not detected, the results can be catastrophic, as individuals exposed to high levels of CO can develop symptoms of poisoning, ranging from headaches, nausea, dizziness, loss of consciousness, and even death. In this regard, this study aimed to investigate, through simulations using the HYSPLIT model, the dispersion of vehicle CO emissions and wind trajectories (*forward*) in a high-traffic urban section in Recife during October 2021. The results indicate that high CO concentrations occurred near the investigated location, mainly during the early morning period from 0h to 8h. During this time, the dispersion was lower, but all simulations remained within the limits established by CONAMA 491/2018. Additionally, it was observed that 83% of the winds have a predominant southeast direction, which contributed to a greater dispersion during the daytime, resulting in larger areas affected by the pollutant.

Keywords: Air pollution; Vehicle emissions; HYSPLIT; Urban environment.

1. INTRODUÇÃO

A poluição do ar é um assunto de relevância global devido aos impactos adversos que pode causar nos receptores, seres humanos, ecossistemas, fauna, flora etc. (CERATTI et al., 2018). Dessa forma, com a urbanização das cidades, as emissões veiculares tornaram-se uma fonte crítica de poluição do ar nas áreas metropolitanas. Além disso, as emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x), monóxido de carbono (CO) e compostos orgânicos voláteis dos veículos são reconhecidas como os principais precursores do ozônio e dos aerossóis orgânicos secundários em áreas metropolitanas (Tsai et al., 2021).

Dentre os poluentes atmosféricos mais estudados, destaca-se o monóxido de carbono (CO), que possui origem tanto pelas fontes naturais, como atividades vulcânicas e emissões de gás natural, quanto por fontes antropogênicas, como resultado da queima incompleta de combustíveis fósseis, emissões veiculares e industriais, queima de biomassa e tabaco (cigarro) (CETESB, 2022). Esse poluente é tóxico para os seres humanos porque sua molécula é relativamente pequena e facilmente disposta a entrar nos sistemas respiratórios, forçando o oxigênio fora dos glóbulos vermelhos e impedir a oxigenação dos tecidos (REICHERT, 2017).

A exposição prolongada a altos níveis de concentração de CO pode causar problemas respiratórios e cardíacos, disfunção cerebral e até a morte (REICHERT, 2017). Assim, o monóxido de carbono também é um poluente que pode ser tanto nocivo para o meio ambiente quanto para a saúde pública, pois sua presença pode afetar a qualidade do ar e agravar os casos de doenças respiratórias.

O monitoramento das concentrações das emissões atmosféricas de poluentes, principalmente de fonte veicular, é imprescindível, pois coleta e gera informações das concentrações dos poluentes atmosféricos, além de habilitar tomadas de decisões e planejamento de ações, fornece informações para propostas de políticas públicas voltadas à melhoria da qualidade do ar (WHO, 2016).

Segundo Vormittag et al (2021), o Brasil tem 430 estações de monitoramento. Dessas, apenas 371 estão em atividade. Nos Estados Unidos, contudo, a quantificação do Sistema de Qualidade do Ar chega ao número de 5.000 estações ativas (EPA, 2020). Isso representa 1247% de estações de monitoramento a mais em comparação com a realidade brasileira. Além disso, a grande maioria das estações brasileiras se concentra na Região Sudeste (80,3%), e a menor

parte na Região Nordeste (1,1%) (VORMITTAG et al, 2021).

No Estado de Pernambuco, em 2023, existem listadas seis estações de monitoramento da qualidade do ar, e nenhuma delas se localiza no Município do Recife, capital do Estado. Além disso, dessas seis estações de monitoramento existentes, somente cinco estão atualmente ativas, quatro delas instaladas no Município de Ipojuca (estações de Ipojuca, Ed. Cupe, SUAPE, IFPE), e uma no Município de Cabo de Santo Agostinho (Estação CPRH) (CPRH, 2023).

Ainda em Pernambuco, mais precisamente em sua capital, Recife, de acordo com o Departamento Estadual de Trânsito de Pernambuco - DETRAN-PE (2021), a frota veicular passou de 199.398 veículos em 1990 para 717.619 em 2021, resultando em 518.221 veículos a mais na cidade no período de 31 anos, um aumento de 259,89%. Assim, de acordo com Nascimento-Silva e Souza (2019), o aumento anual de veículos acarreta aumento nas concentrações de poluentes, contribuindo para a injeção de gases tóxicos na cidade e acarretando no comprometimento da qualidade do ar da região.

Diante disso, surge a problemática da busca por determinar os níveis de poluição, principalmente quando há ausência de estação de monitoramento de qualidade do ar. Nesse aspecto, uma das alternativas que podem ser usadas, para investigar se a concentração de poluentes está dentro dos limites permitidos por lei, é a modelagem da dispersão atmosférica, ferramenta amplamente utilizada na gestão de efluentes gasosos e de qualidade do ar. O seu uso tem sido muito útil para avaliar a forma como as emissões afetam a qualidade do ar, a fim de se determinar se mais medidas de controle devem ser implementadas, notabilizando-se como uma ferramenta importante para as entidades reguladoras e constituindo-se como uma das melhores técnicas de avaliação da qualidade do ar (SILVA, 2013).

A modelagem é um mecanismo amplamente utilizado na elaboração de Estudos de Impacto Ambiental (EIA) e nos Relatórios de Impacto de Ambiental (RIMA), conforme prevê a legislação ambiental brasileira (DERISIO, 2016).

O modelo HYSPLIT (*Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory*) é um sistema de modelagem de cálculo em tempo real e análise de fontes de transporte em relação a uma variedade de poluentes físicos atmosféricos. É um modelo capaz de calcular trajetórias simples, bem como simulações complexas de transporte, dispersão, transformação química e deposição de poluentes atmosféricos, podendo tratar simultaneamente processos múltiplos de transportes atmosféricos e físicos, campos de entrada meteorológicos variados e fontes de emissão com diferentes categorias (MA et al., 2021).

Algumas das aplicações do HYSPLIT incluem análise de trajetória para determinar a origem das massas de ar e estabelecer relações fonte-receptor. Ele lida também com

rastreamento e previsão da liberação de material radioativo, fumaça de incêndio florestal, poeira soprada pelo vento, poluentes de várias fontes de emissão estacionárias e móveis, alérgenos e cinzas vulcânicas (CHEOL et al., 2020).

Iriart e Fisch (2016), por exemplo, usaram o HYSPLIT para simular a dispersão do monóxido de carbono (CO) de um Veículo Lançador de Satélite (VLS), emitido do Centro de Lançamento de Alcântara (CLA) no Estado do Maranhão. Os resultados mostraram que as concentrações eram mais intensas próximas das localidades da fonte simulada e, assim, concluíram que o funcionamento desse veículo deveria ocorrer em períodos com maiores intensidades de ventos, para uma maior eficácia da dispersão dos poluentes. Outra observação da pesquisa diz respeito ao fato de que nos períodos noturno e chuvoso a dispersão demorava mais em comparação ao período diurno e seco.

Chulde Llive (2019) também fez uso do HYSPLIT para dispersão do monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênios (NO_x) e material particulado (MP) na cidade de San Gabriel, Província de Carchi, Equador. A fonte das emissões foram veículos automotores investigados em zonas, como norte, centro e sul da cidade. Através das simulações foi possível observar a diminuição da concentração dos poluentes com o distanciamento da fonte de emissão. Outra parte dessa pesquisa inquiriu pessoas que sofrem com possíveis doenças ocasionadas pela poluição, correlacionando os resultados encontrados à população atingida pelas plumas dos poluentes. Assim, nesses grupos pesquisados, dentro dos limites da área total investigada, 18% das pessoas são acometidas por faringite, 33% por pneumonia, 41% por amigdalite e 8% não sofrem de nenhuma doença.

Desse modo, devido à diversidade de utilização e constante atualização, o HYSPLIT foi o modelo de dispersão de transporte atmosférico empregado nesta pesquisa, que teve como o objetivo de analisar, por meio de simulações, a dispersão das emissões veiculares de CO (monóxido de carbono) e a trajetória (*forward trajectories*) do vento em um ponto de alto tráfego veicular, na Avenida Agamenon Magalhães, região urbana na cidade do Recife. Para isso, além do uso do modelo HYSPLIT, foram utilizados dados meteorológicos do INMET (2021), do inventário de emissões veiculares e dos padrões estabelecido pelo CONAMA nº 491 (2018).

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

Recife está localizada na latitude $8^{\circ}03'19''$ sul e na longitude $34^{\circ}52'15''$ oeste, com altitude média de 7 metros em relação ao nível do mar (NASCIMENTO et al., 2013). De acordo com dados obtidos do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (2021), da estação automática (código - A301), a média anual de 2021 para a precipitação, a velocidade do vento e a temperatura foram, respectivamente, de 221,58 mm, 1,37 m/s e $25,67^{\circ}\text{C}$.

O local adotado na simulação das emissões do monóxido de carbono (CO) fica no trecho de alto fluxo veicular na Avenida Agamenon Magalhães, latitude $8^{\circ}02'35,47''$ sul, e na longitude $34^{\circ}53'9,13''$ oeste (Figura 1). Essa avenida urbana é uma das mais importantes da cidade, já que serve de eixo de ligação entre os bairros do Recife e a cidade de Olinda, facilitando o acesso para o aeroporto da cidade (CABRAL et al., 2021). Além disso, os dados quantitativos de veículos circulantes monitorados pelos radares eletrônicos na Avenida Agamenon Magalhães mostram ser esse o trecho com maior fluxo veicular da via, pois transitaram 12.859.103 veículos no ano de 2021 (DETRAN, 2021).



Figura 1- Localização do trecho de estudo.

Fonte: Adaptada de NE 10 (2018) apud Cabral et al. (2021); Google Earth (2023).

2.2. Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos foram obtidos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) de 2021 e utilizados para dois momentos. O primeiro, com vistas a observar os meses de 2021 (Tabela 1), mais favoráveis à concentração da poluição. O segundo, para análise das condições do tempo durante as simulações e também como comparativo das simulações da

dispersão no HYSPLIT.

Tabela 1- Precipitação, velocidade média do vento e temperatura média (mensais em 2021).

Mês (do ano 2021)	Precipitação total (mm)	Velocidade média (vento)(m/s)	Temperatura média (°C)
Janeiro	54,80	1,72	27,16
Fevereiro	119,80	1,58	27,32
Março	222,20	1,31	26,69
Abril	420,00	1,08	26,03
Maio	535,40	1,08	25,11
Junho	193,80	1,08	24,22
Julho	264,60	1,19	24,13
Agosto	309,00	1,52	24,02
Setembro	50,00	1,56	25,48
Outubro	46,20	1,55	26,55
Novembro	Null ¹	Null ¹	Null ¹
Dezembro	Null ¹	Null ¹	Null ¹
Média anual ²	221,58	1,37	25,67

Fonte: Adaptado de INMET (2021). ¹sem dados disponíveis. ²A média anual foi calculada excluindo os meses que não tiveram dados.

No primeiro momento, a escolha do mês de outubro para as simulações realizadas ocorreu em razão de possuir maior fluxo de veículos (Figura 2) e ter a situação meteorológica que contribui para o aumento das concentrações, como no caso, menor precipitação total mensal e temperatura média acima da média anual (Tabela 1), ou seja, o período mais seco.

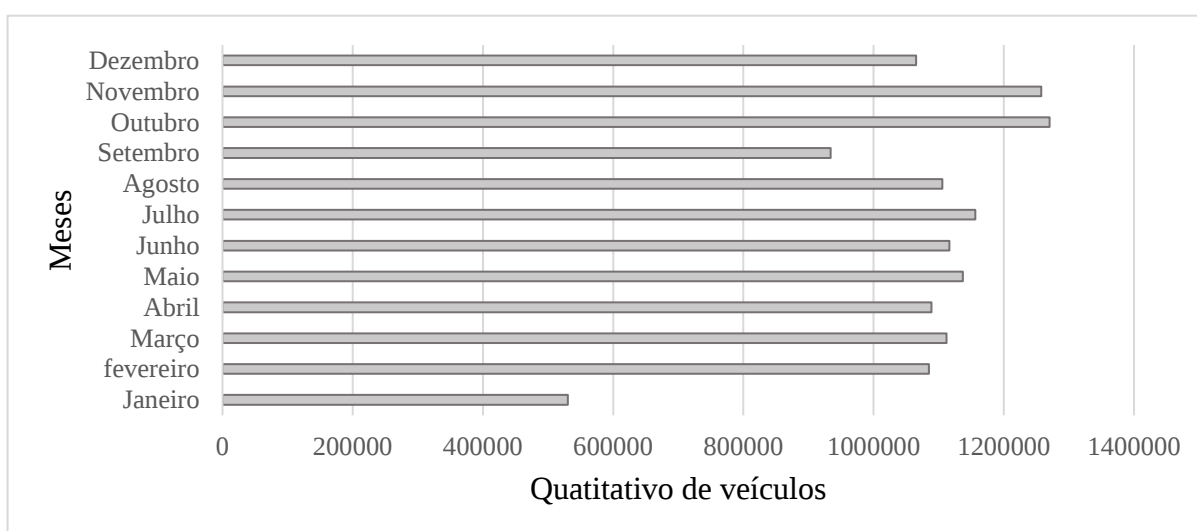


Figura 2 - Total de veículos circulante na Av. Agamenon Magalhães no sentido Olinda - 2021.

Fonte: Autores (2023).

Já no segundo momento, para efeito de comparativo com o modelo HYSPLIT, elaborou-se a rosa dos ventos com auxílios da base meteorológica do INMET e do software WRPLOT. Os dados meteorológicos necessários para a construção da rosa dos ventos tiveram como parâmetros velocidade (m.s^{-1}) e direção do vento ($^{\circ}$), no período do mês de outubro 2021. Esses dados foram fornecidos pela estação meteorológica automática de Recife (A301), que se encontra a uma latitude de $-8^{\circ} 03' 32,93''$ Sul, longitude $-34^{\circ} 57' 32,97''$ Oeste, com altitude de 11,3 metros e cerca de 8,3 km de distância em linha reta do ponto investigado. Para esse estudo, foram utilizados cálculos de medição horária para cada parâmetro meteorológicos INMET (2021).

No mais, os dados velocidade (m.s^{-1}) e direção do vento ($^{\circ}$) foram aplicados no programa WRPLOT, o qual resultou na rosa dos ventos e o histograma das velocidades do vento.

2.3. Estimativas das emissões veiculares

Para a estimativa das emissões veiculares, usou-se o trabalho do inventário de emissões veiculares realizado por Costa et al. (2023). Nesse trabalho estimou-se o quantitativo de alguns poluentes emitidos por veículos que circularam no ponto de alto tráfego veicular da Avenida Agamenon Magalhães em Recife -PE. A metodologia empregada foi a do tipo *bottom-up*, a qual se utilizou da quantidade da frota veicular (distribuída por categorias), distância percorrida e fatores de emissões dos veículos.

A estimativa da quantidade de poluentes emitidos, conforme equação (1) foi obtida utilizando informações locais, que requereu dados específicos, como frotas registradas de veículos no Departamento Estadual de Trânsito de Pernambuco (DETRAN, 2021) e dados de radares eletrônicos (RECIFE, 2021), com vistas à obtenção da quantidade de carros circulantes, distância percorrida no local do estudo (GOOGLE, 2023) e fatores de emissões (CANCELLI; DIAS, 2014). Dessa forma, de posse dos dados, foi possível aplicá-los matematicamente e gerar os resultados da quantidade de poluentes emitidos, conforme a equação (2) abaixo:

$$E_{linha,i} = Fr,j \times (Fe,i/1000) \times L. \quad (2)$$

Ademais, $E_{linha,i}$: representa a emissão veicular do trecho de interesse para o poluente i . Fe,i : fator de emissão do poluente i (g.km^{-1}); Fr,j : número total de veículos da classe j que

circulam na via de interesse durante um período de tempo t ; L : comprimento total da via (km) e 1000 corresponde ao fator de conversão de g para kg.

2.4. Modelo HYSPLIT

O modelo HYSPLIT (*Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory*) foi utilizado para simular as dispersões de emissões veiculares e as trajetórias dos ventos. Esse modelo é um dos mais utilizados e citados em ciências atmosféricas (STEIN et al., 2015). Conforme Zhou et al. (2017), o modelo funciona como cálculo em tempo real e faz uma análise razoável de fontes de transporte relativas a uma variedade de poluentes físicos na atmosfera que, no caso da pesquisa, centrou-se no monóxido de carbono (CO). O HYSPLIT (*Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory*) foi desenvolvido pela NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) em conjunto com a *Australia Weather Bureau* (DRAXLER e HESS, 1998; MARIANO, 2006; DUARTE, 2016 e MA et al., 2021).

Para a simulação da dispersão do poluente (CO), usou-se a versão *online*, acessada em <https://www.ready.noaa.gov/hypub-bin/dispasrc.pl>. Já para as trajetórias, utilizou-se a versão disponibilizada para *download*, que melhor se aplicou para demonstrar o resultado das simulações com os agrupamentos proporcional das trajetórias dos ventos. Contudo, a versão *online*, segundo Stein et al. (2015), só diferem da disponibilizada para *download* em relação as interfaces disponíveis, os executáveis são os mesmos.

2.4.1. Dispersão de emissões veiculares

Para as simulações de dispersão do monóxido de carbono (CO) no ponto da via da Agamenon Magalhães com intenso fluxo veicular, nos dados de entrada, para o tipo de lançamento, utilizou-se a opção (massa genérica menor de 24h), já que as simulações da dispersão foram desenvolvidas de forma diária. Nesse sentido, a quantidade de emissões inventariada (em massa) foi acrescentada diariamente ao modelo. Já para a meteorologia, usou-se os dados globais (GFS), com resolução de 0,25 grau para o mês de outubro de 2021.

No que confere aos locais de partida das emissões, usou-se as coordenadas do local de alto fluxo veicular da Av. Agamenon Magalhães, certificadas devido a existência de radar de aferição de velocidades de veículos circulantes (latitude 8°02'35,47" sul e longitude 34°53'9,13" oeste).

Para o detalhamento das execuções do HYSPLIT, os parâmetros, utilizados de forma

igual em todas as simulações a serem inseridos no programa (termo de origem), são: direção da dispersão (para frente); intervalo de emissão dos poluentes (na parte inferior, adotou-se a medida de 7m que, de acordo Nascimento et al. (2013), correspondente a altitude média de Recife em relação ao nível do mar. Na parte superior de lançamento, somou-se essa altitude média com 2,3m, que é a altura média dos carros (Brandão, 2021), totalizando 9,3m); duração de lançamento (foi de 24h, ou seja, observou-se diariamente as emissões).

Ainda no que se refere à execução, a duração total foi de 24h (simulada diariamente), subdivididas em 3 períodos de 8 horas de intervalo de saída (de 0:00 h até 8:00h, de 8h até 16h e de 16h até 0h) para cada um dos 31 dias de outubro. A partir desse intervalo, foi possível comparar os resultados com padrões, para a média de 8h do CONAMA nº 491 (2018). Nesse sentido, a resolução nº 491 (2018) estabelece o padrão final para o CO que, numa análise média de 8h, não pode exceder concentração de 9 ppm (partes por milhão) por mais de uma vez no período máximo de um ano, sendo esta equivalente a 10,31 mg/m³.

Além disso, para o topo da camada média, utilizou-se o padrão sugerido pelo HYSPLIT (100 metros). Ademais, as horas no modelo HYSPLIT seguem o sistema UTC (*Coordinated Universal Time*) que, no caso das simulações em Recife, para a conversão do horário local, precisou-se diminuir 3h do horário no modelo.

Já com relação aos parâmetros utilizados para cada uma modelagem, ou seja, variáveis dos dados a serem inseridos no HYSPLIT, foram arquivos meteorológicos (de 01 a 31 de outubro de 2021); e a quantidade de liberação (dados das estimativas de emissões veiculares de CO em quilograma).

2.4.2. Trajetórias do vento

As simulações realizadas para verificação da trajetória dos ventos foram feitas com simulações de trajetórias para frente (*forward trajectories*). O local das simulações foi o das coordenadas: latitude -8,043186 sul, longitude -34,885869 oeste e altitude de 9,3 metros.

Ademais, foram utilizados os dados meteorológicos globais (GDAS) do mês de outubro de 2021, com resolução de 1 grau. Esses arquivos meteorológicos dispõem de dados em formato semanal, que vão do ano de 2005 até os dias mais recentes. Além disso, para o modelo das trajetórias utilizou-se o tempo de execução de 4h a partir da hora simulada. O agrupamento dos dados de trajetória a cada 4 horas foi obtido para identificação das principais áreas afetadas pela dispersão a partir do ponto analisado.

Com o intuito de facilitar a análise das trajetórias do fluxo aéreo, fez-se uma análise de todas as faixas que afetam o local, agrupando-as e dividindo-as em 5 categorias únicas (*cluster*). Assim, essas cinco trajetórias (*cluster*) funcionam como vetores resultantes das direções dos ventos.

De acordo com Tian et al. (2020), nas simulações, as trajetórias com maior similaridade espacial são fundidas conforme a direção de transmissão e a velocidade de cada fluxo de ar. Assim, a escolha desses parâmetros de agrupamentos para as simulações foi feita a fim de facilitar a análise da trajetória dos ventos, de modo a não causar a saturação visual pela sobreposição de trajetórias.

3. RESULTADOS

3.1. Inventário do monóxido de carbono (CO)

Os dados do inventário de Costa et al. (2023) (submetido à publicação) mostraram que a quantidade de emissões no ano de 2021, no trecho analisado, foi de cerca de 3.922,03 kg de CO, 831,98 kg de NO_x, 14,66kg de RCHO, 2.913,87 kg de NMHC, 279,04 kg de CH₄, 87,06kg de MP e de 603.743,89 kg de CO₂. Contudo, o mês de outubro foi o mês com maiores emissões veiculares no trecho de maior fluxo veicular da Av. Agamenon Magalhães (via urbana), com valores próximos a 387,43 kg de CO, 82,12 kg de NO_x, 1,45 kg de RCHO, 287,84 kg de NMHC, 27,56 kg de CH₄, 8,60 kg de MP e de 59.638,52 kg de CO₂.

Dentre esses poluentes, o monóxido de carbono (CO), objeto da investigação, é um dos importantes precursores do *smog* fotoquímico, quando em condições meteorológicas favoráveis, como maiores radiações solares e temperatura. No mais, ele é um dos poluentes principais em ambiente urbano, gerado por combustão incompleta de veículos automotores (MA et al., 2021).

Os resultados do inventário de emissões veiculares pelos veículos automotores para o ano de 2021 mostraram ainda que o monóxido de carbono foi um dos poluentes mais emitidos. Esse resultado converge para os dados divulgados pela CETESB (2021), os quais afirmam que os veículos na Região Metropolitana de São Paulo foram responsáveis por 95% das emissões de monóxido de carbono (CO).

Nesse sentido, os dados quantitativos das emissões de monóxido de carbono (CO) nas modelagens das dispersões foram os diários do mês de outubro de 2021, conforme Figura 3.

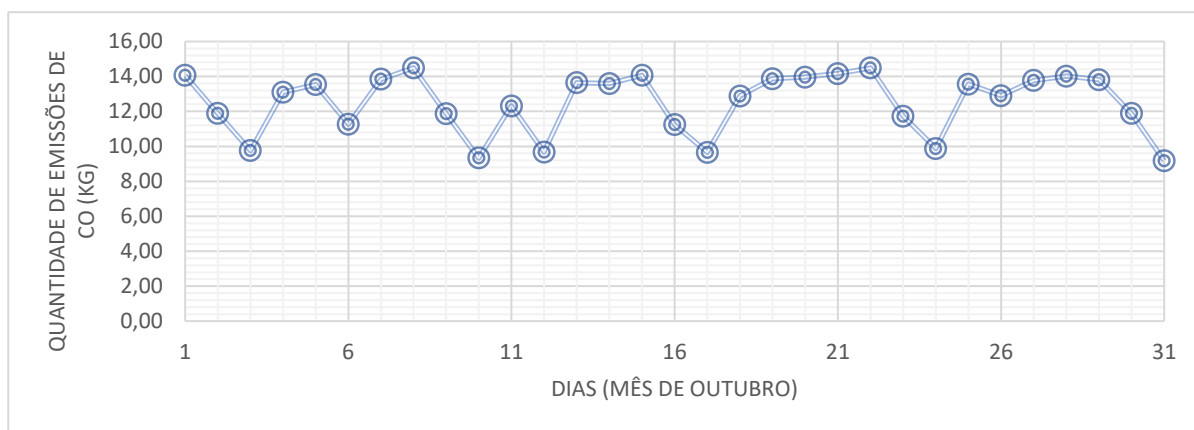


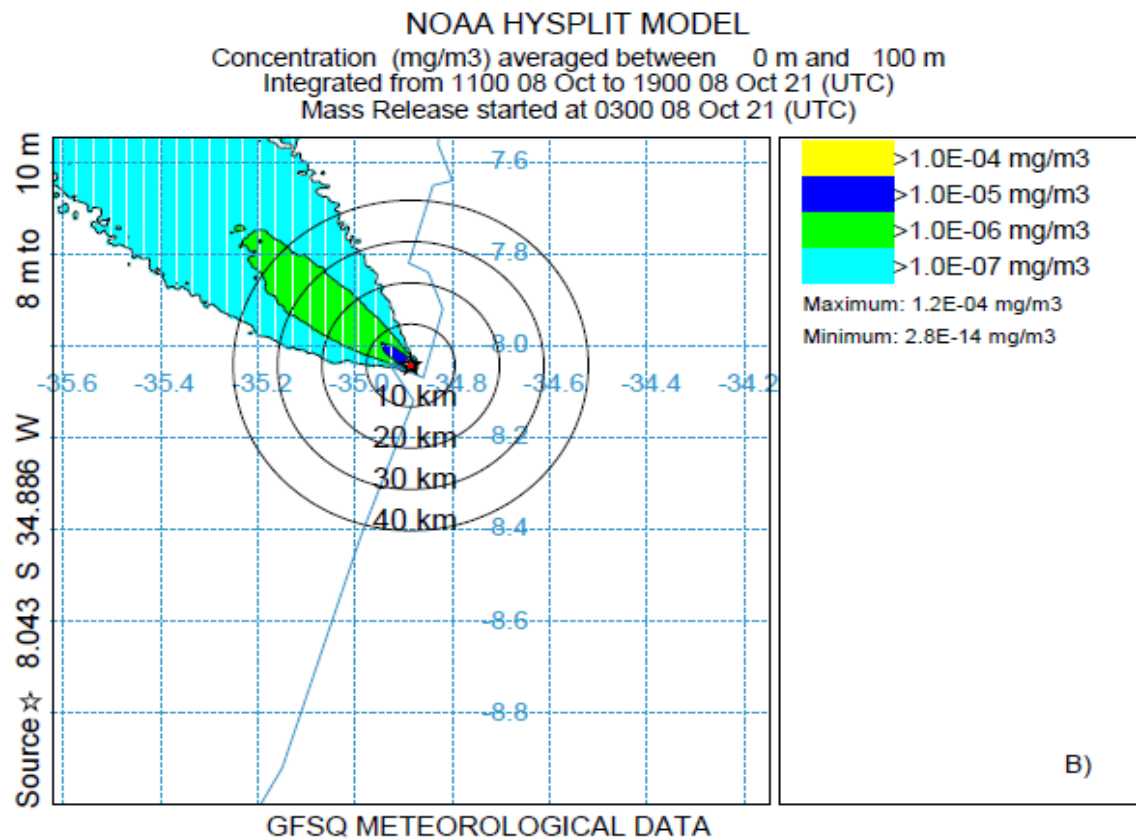
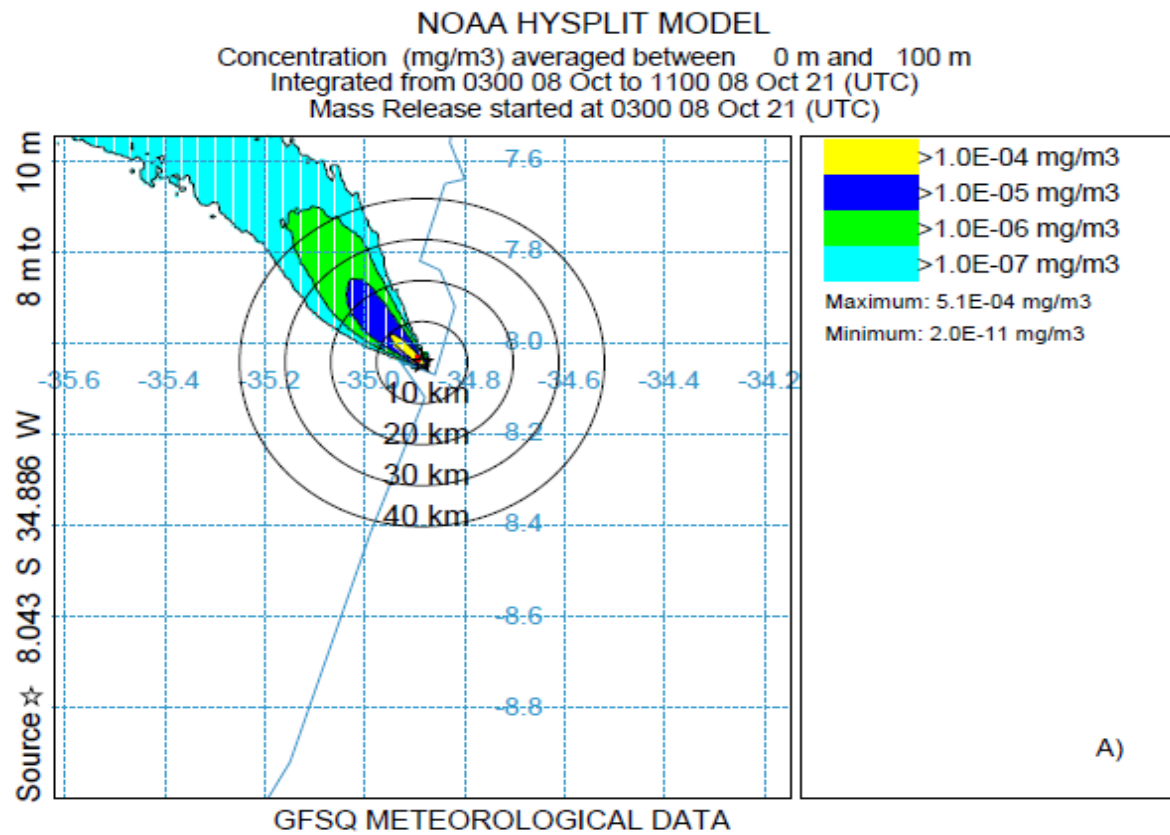
Figura 3 – Quantidades de emissões veiculares inventariada de monóxido de carbono (CO) no trecho de alto fluxo veicular em outubro de 2021.

Fonte: Autores (2023).

3.2. Modelagem da dispersão do monóxido de carbono

As simulações realizadas para verificação das dispersões do monóxido de carbono que são emitidas do ponto de alto tráfego veicular na Av. Agamenon Magalhães foram realizadas diariamente para outubro de 2021. A partir das informações geradas, foi possível depreender que, em relações as plumas, as áreas com maiores concentrações podem ser visualizadas a partir da figura 4, na região a noroeste do ponto selecionado como fonte de emissão. As concentrações máximas obtidas, conforme a legenda das figuras apresentadas, podem ser visualizadas sempre como plumas amarelas. O pico ocorreu no dia 08 (Figura 4a), em que a máxima concentração para essa pluma foi de $5,1 \times 10^{-4} \text{ mg/m}^3$, observado no período de referência de 0h às 8h.

Já as plumas azuis mostram uma dispersão maior da poluição em comparação às amarelas. Com isso, os valores da poluição tendem a diminuir de concentração. Nesse sentido, no dia 08, nas 24h, as concentrações demonstraram valores próximos a $1,0 \times 10^{-5} \text{ mg/m}^3$. Consequentemente, as demais plumas (verde e azul-claro) sofreram o mesmo processo de dispersão e diminuição das concentrações. Nesse aspecto, a menor concentração foi observada nas plumas azul-claro, ocorridas no período das 8h às 16h.



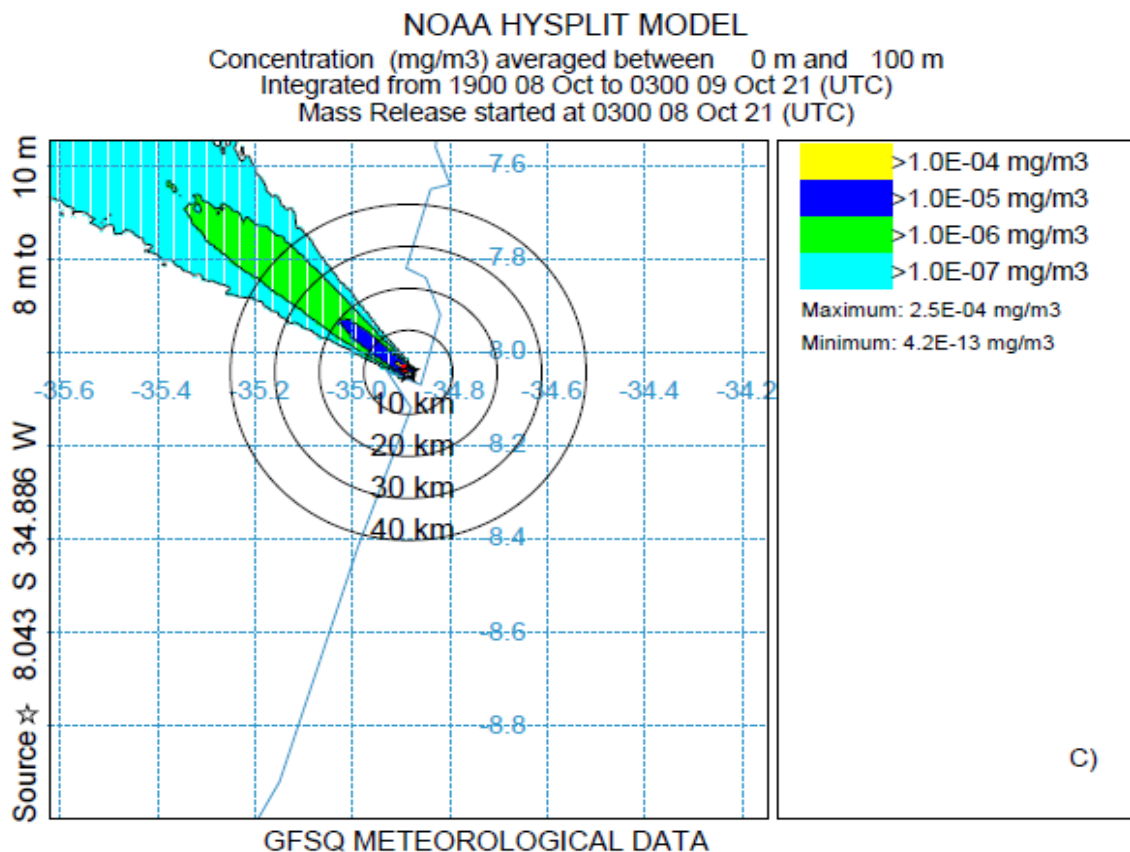


Figura 4 – Simulação da dispersão/concentração num período de 24h, dia (08-10-2021), pelo modelo HYSPLIT do monóxido de carbono (CO) em mg/m³ dividido em três períodos de 8h. a) período de 3 à 11 UTC (0h - 8h); b) período de 11 à 19 UTC (8h -16h); c) período de 19 à 3 UTC (16h -0h).

Fonte: Autores (2023).

Ainda no que confere ao caso das plumas, é importante salientar que as amarelas, indicativas de maiores concentrações de poluentes, tiveram seus maiores alcances sempre abaixo ou igual ao raio de 10 km de distância da emissão nos períodos de 0h às 8h. Elas chegaram a atingir bairros, como Brejo da Guabiraba, Macaxeira, entre outros bairros mais próximos da fonte de emissão (Figura5).

No que se refere ao alcance das plumas azuis, que indicam concentrações intermediárias entre a amarela e a verde, a maior parte ficou abaixo de 30km independente do horário. No entanto, nos dias 6 e 17, elas atingiram mais de 40km, tanto no período de 0h às 8h quanto de 8h às 16h. O alcance maior dessas plumas chega a ultrapassar cidades da Região Metropolitana, como Camaragibe, São Lourenço da Mata e perpassaram pelos interiores da Zona da Mata pernambucana, como é o caso dos municípios de Itaquitinga e Aliança (Figura 5).

No caso das plumas verdes, que apresentam as menores concentrações de poluentes, quase a sua totalidade do seu alcance ficou acima de 40km, acompanhando as mesmas dispersões das plumas azuis, porém com distâncias ainda maiores.

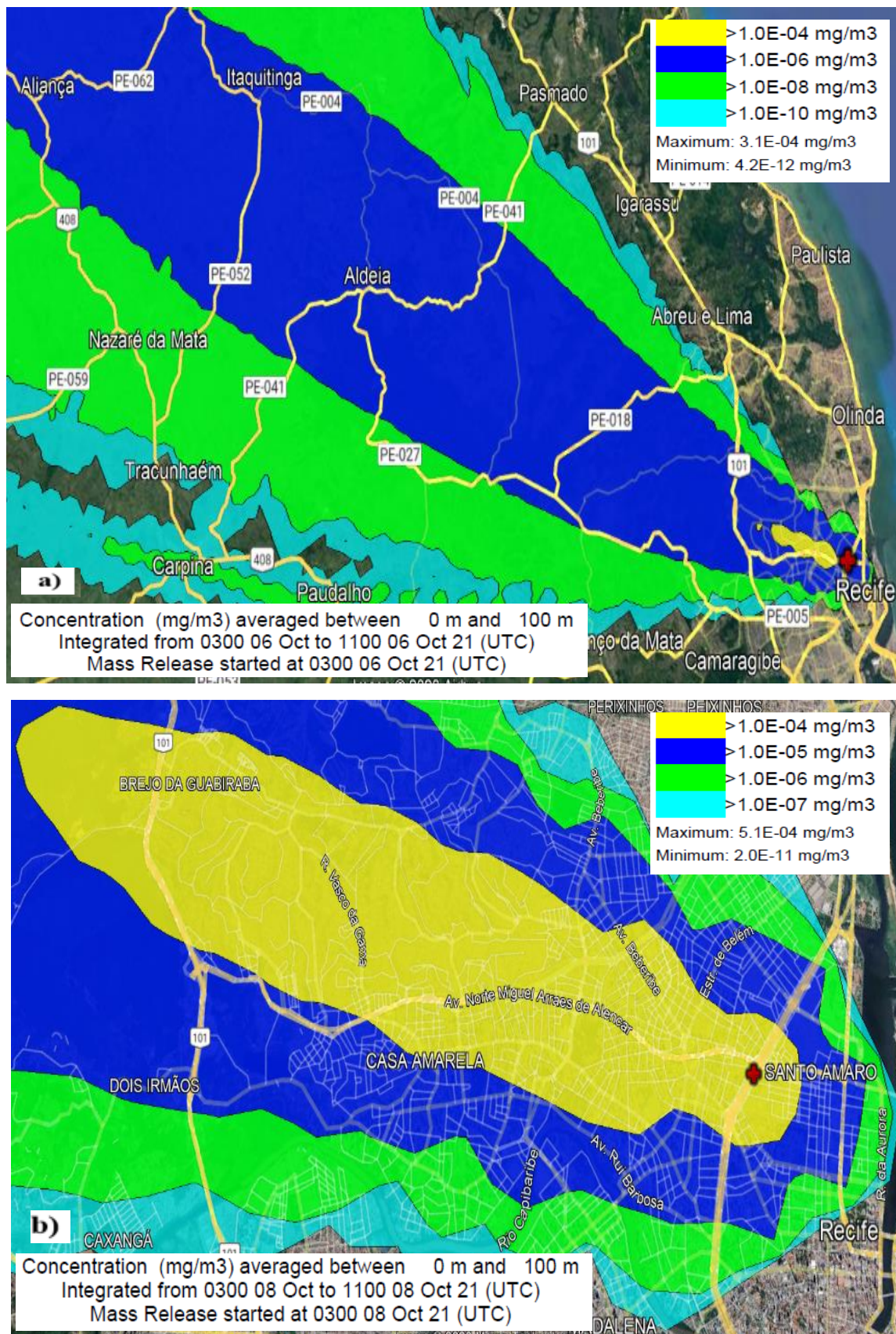


Figura 5 – Simulação do monóxido de carbono (CO) e observação do alcance das plumas (outubro de 2021). a) maior alcance da pluma azul - dia 06. b) maior alcance da pluma amarela - dia 08.
Fonte: Autores (2023).

Ademais, no que confere às máximas concentrações do monóxido de carbono (CO) da modelagem da dispersão obtidas no mês de outubro, para fins de comparação da qualidade do ar, utilizou-se os padrões estabelecidos pelo CONAMA nº 491 (2018).

Nesse sentido, o CONAMA nº 491 (2018) estabelece como padrão final para o monóxido de carbono (CO) nove partes por milhão (9 ppm) de (CO), o que equivale a aproximadamente 10,31 miligramas por metro cúbico (mg/m³). É relevante destacar que em outras regiões, como a União Europeia, a Argentina e os Estados Unidos, também adotam esse mesmo valor como referência para a média de concentração ao longo de 8 horas (EU, 2008; AMARAL; 2021; SILVA, 2021). Sobre o padrão final do CO, a CETESB (2021) acrescenta que ele é definido por estudo científico, visando à preservação da saúde da sociedade em associação aos possíveis transtornos causados pela poluição do ar.

Nesse viés, a Figura 6 apresenta as concentrações máximas das simuladas do poluente CO em mg/m³ nos dias do mês de outubro (ano 2021) e agrupadas em três períodos do dia (de 8 horas cada). Portanto, os dias com picos maiores de concentrações aconteceram nos dias 01, 08 e 22 de 0 às 8h. No caso do horário das 8 às 16h, ocorreu um pico divergente dos demais somente no dia 13. Já no horário das 16 às 0h, as concentrações maiores ocorreram nos dias 5 e 8. Contudo, em nenhum momento simulado, o CO apresentou concentrações acima do máximo permitido. Todas elas ficaram abaixo dos padrões 10,31 mg/m³, ou seja, quando analisado isoladamente os padrões de CO, a qualidade do ar pode ser classificada como boa.

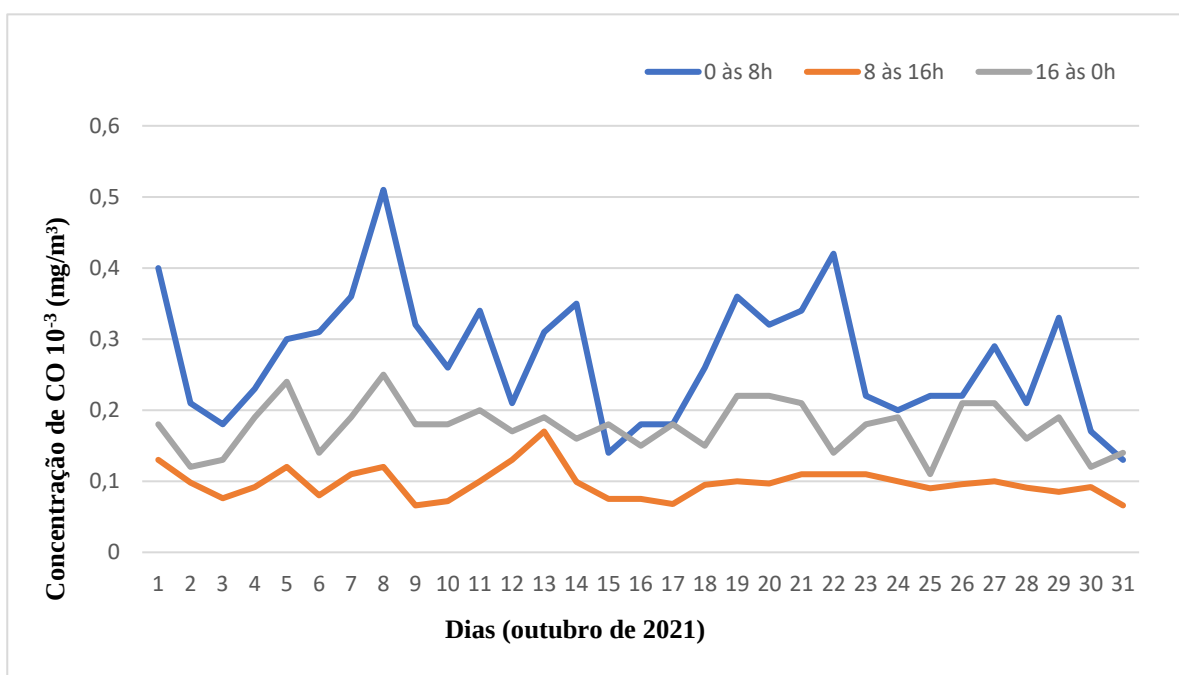


Figura 6 – Concentrações máximas de monóxido de carbono (CO) observada nas simulações de dispersão do HYSPLIT para o mês de outubro (dividido em três períodos do dia).

Fonte: Autores (2023).

Isso pode ser explicado, em parte, pelo uso de melhores tecnologias automotivas e pela velocidade de tráfego na via. Desde 1975, o Governo tem incentivado a adoção de tecnologias mais limpas, como a implantação do Programa Nacional do Etanol, chamado de “Proálcool”, que fez diminuir o composto monóxido de carbono (CO) pelos veículos. Esse programa buscou estimular o uso do etanol como combustível, obrigando a sua mistura à gasolina. Assim, criou-se o “gasohol” e, a partir dessas medidas, foi possível observar mudanças consideráveis ao longo do tempo (ANDRADE et al., 2017). A CETESB (2021) também faz observação parecida em relação ao avanço da tecnologia e a incorporação de controle de emissões para a diminuição das concentrações desse poluente.

Outra explicação para esse resultado pode derivar-se da redução da velocidade das vias, decorrentes do uso de lombadas eletrônicas. A diminuição das rotações veiculares acontece, geralmente, quando se tem redução das velocidades por meio desses radares de sinalização eletrônica. O estudo de Nascimento-Silva e Souza (2019), por exemplo, mostra que o monóxido de carbono apresenta menores emissões para baixas rotações. Eles afirmam que menores velocidades acarretam menores emissões.

3.3. Modelagem da trajetória dos ventos

O agrupamento das trajetórias simuladas a partir das emissões na Av. Agamenon Magalhães (via urbana), para o mês de outubro (2021), pode ser visualizado na figura 7, indicando as cinco trajetórias médias (5 grupos) preferenciais a partir do ponto de emissão. Essa figura apresenta também a porcentagem correspondente de trajetórias de cada grupo.

Esse agrupamento foi compilado por meio de 187 dados de trajetórias simuladas, tendo como trajetórias resultantes 5 *cluster*. Assim, para Tian et al. (2020), um fluxo de ar agrupado com uma porcentagem maior da trajetória total tem uma grande influência na qualidade do ar.

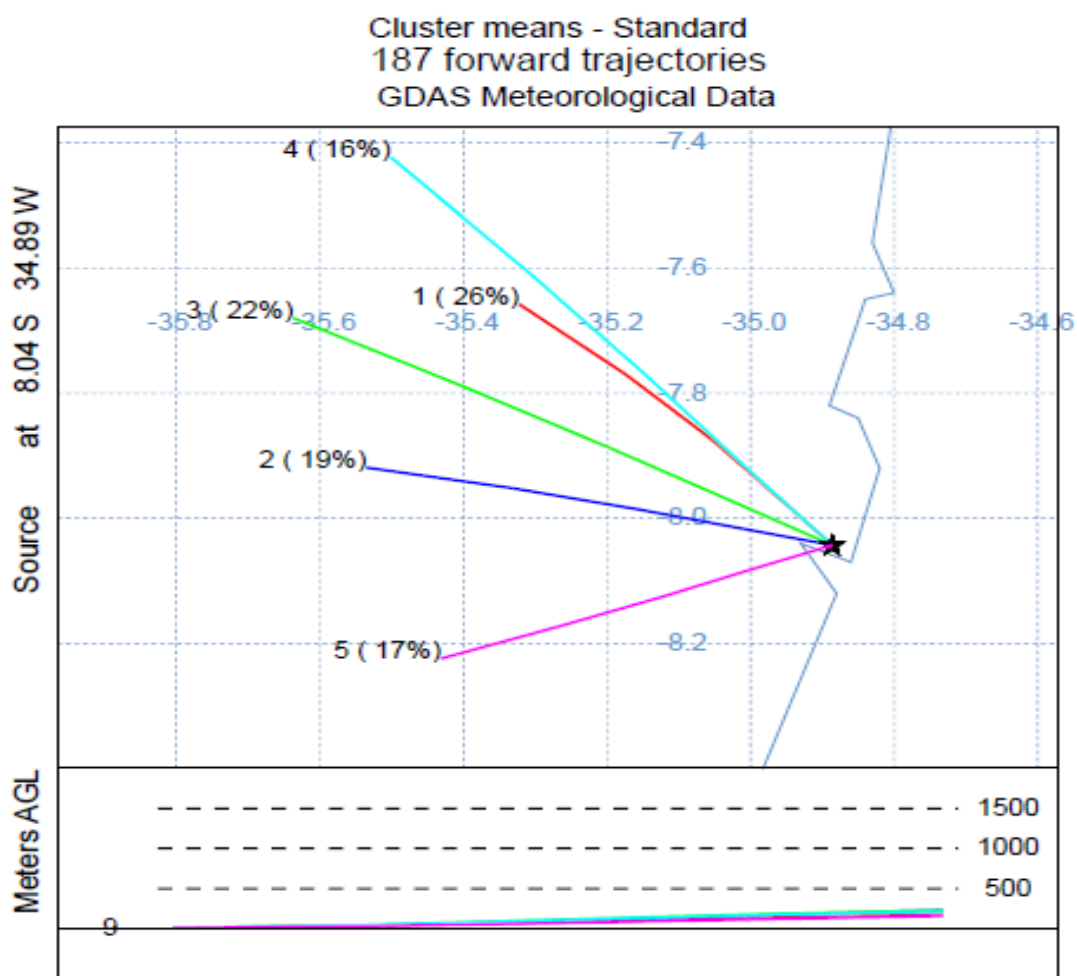


Figura 7 – Simulação das trajetórias dos ventos e agrupamento em 5 cluster forward trajectories (trajetórias para frente).

Fonte: Autores (2023).

A Figura 7 mostra ainda que as trajetórias médias das massas de ar indicam diferentes zonas urbanas atingidas a partir da simulação da liberação dos poluentes do referente ponto da via escolhido, com a correspondente proporção da trajetória de transporte de 26%, 19%, 22%, 16% e 17%, respectivamente. As trajetórias médias dos grupos 1,2,3 e 4 indicam direção predominante do vento de Sudeste e juntos somaram em proporção 83% das trajetórias. Contudo, somente 17% das trajetórias dos ventos são de Nordeste. Isso mostra que as possíveis áreas mais afetadas pelas emissões de poluição, no trecho de alto fluxo veicular, encontram-se a Noroeste do ponto investigado.

Ademais, a fim de comprovar a modelagem do HYSPLIT em relação as trajetórias simuladas, fez a comparação com dados provenientes da estação do INMET, apresentadas na figura 8. Dessa forma, os dados utilizados foram relativos a 744 horas totais, dos 31 dias de outubro. Desses dados, foram aproveitadas 741 horas totais, ou seja, 99,6%, sendo que as 3

horas não aproveitadas foi devido à ausência de dado. Com isso, os resultados mostraram que a velocidade média do vento foi de 1,53m/s, com 57 registros de calmaria (7,66%).

Assim, a análise do regime de vento mostrou direção predominante do vento de Sudeste, seguido pelo vento de Nordeste, como direção secundária (Figura 8). O resultado da direção dos ventos foi similar aos observados no HYSPLIT (Figura 7).

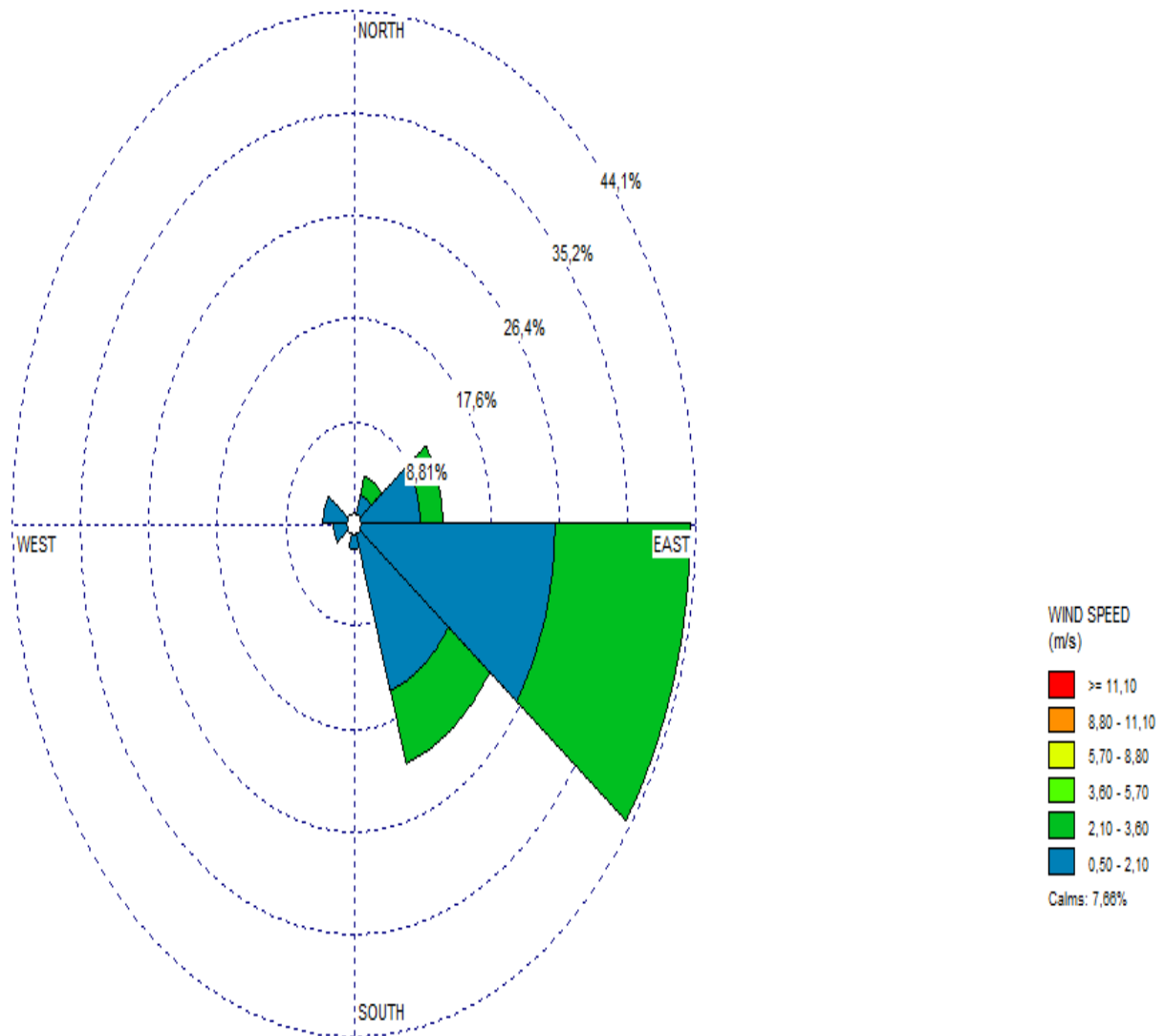


Figura 8 – Direção e velocidade do vento para (outubro de 2021).

Fonte: Autores (2023).

Pode-se observar que as maiores velocidades do vento ficaram entre 2,10 m/s a 3,6 m/s, valores esses que, de acordo com a escala de Beaufort, são classificados entre brisa leve (0,3m/s a 1,5m/s) e brisa suave (1,6m/s a 3,3m/s). Contudo, as maiores frequências de velocidade, ou seja, 192 dados de velocidades aconteceram com as classes de vento de 0,5m/s a 2,1 m/s (Figura 9).

Segundo Ceratti et al. (2018) as brisas leves podem dificultar as dispersões dos poluentes, possibilitando o acúmulo de poluente na atmosfera. Além disso, advertem sobre a possível contribuição para a formação do ozônio em conjunto com nitrogênio e monóxido de carbono das emissões veiculares.

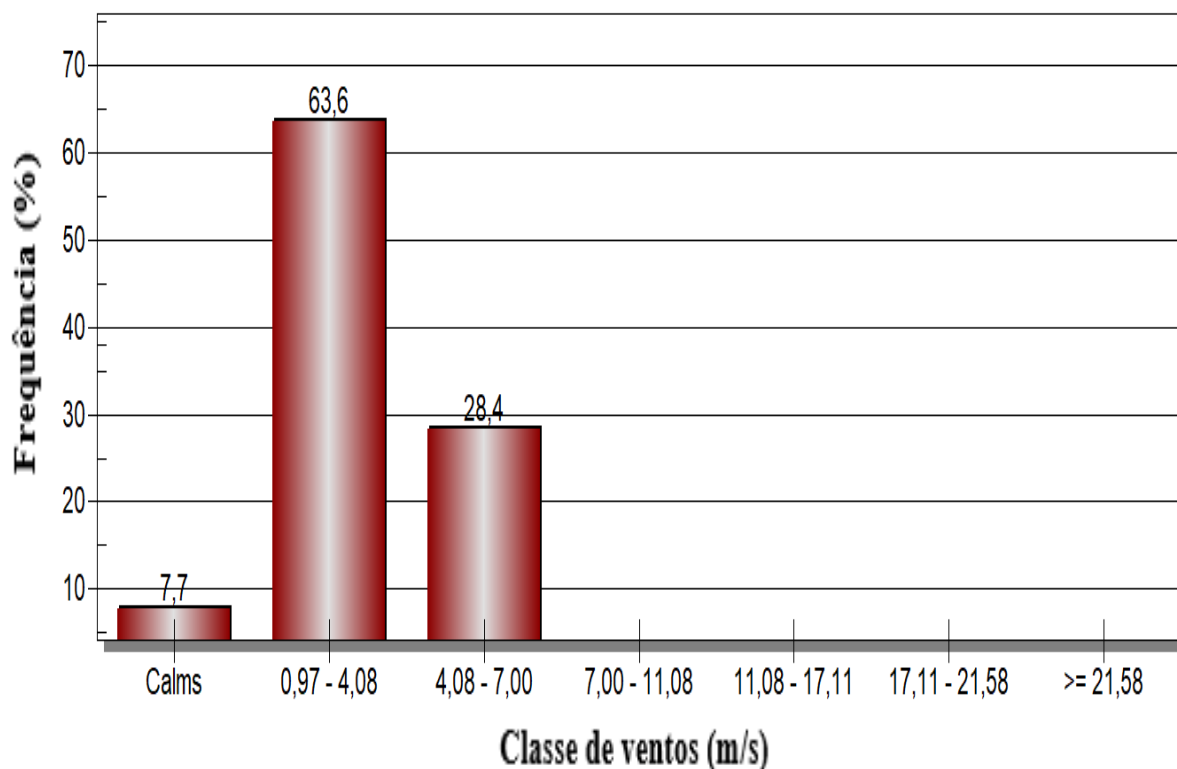


Figura 9 – Distribuição das frequências das classes dos ventos (outubro de 2021).

Fonte: Autores (2023).

Além disso, com os dados do INMET (2021), pode-se observar, conforme a Figura 10, a frequência diária das velocidades dos ventos em Recife no mês de outubro de 2021 de forma acumulada, resultando no período com menor velocidade do vento de 7 UTC a 9 UTC (ou seja, de 4h às 6h). Ademais, levando em consideração que a dispersão do poluente no HYSPLIT foi dividida em três partes, de 8 em 8 horas e, ao investigar os períodos simulados e a velocidade do INMET, percebeu-se que o período com velocidades mínimas do vento ocorreu de 0 às 8h (intervalo UTC de 3 a 11). Já as velocidades máximas do vento ocorreram no intervalo de 8h às 16h (11UTC a 19 UTC).

Isso mostra que a velocidade do vento se torna maior durante o dia e menor no período noturno (Costa, 2022). Em paralelo, observou-se que as concentrações maiores de monóxido de carbono (CO) se deram no período de 0h às 8h e as menores no período de 8h às 16h (Figura 6). Assim, as velocidades dos ventos foram em quase sua totalidade mais baixas nos períodos

da madrugada e início da manhã, possibilitando a baixa dispersão de poluentes atmosféricos e concentrações mais acentuadas dos poluentes.

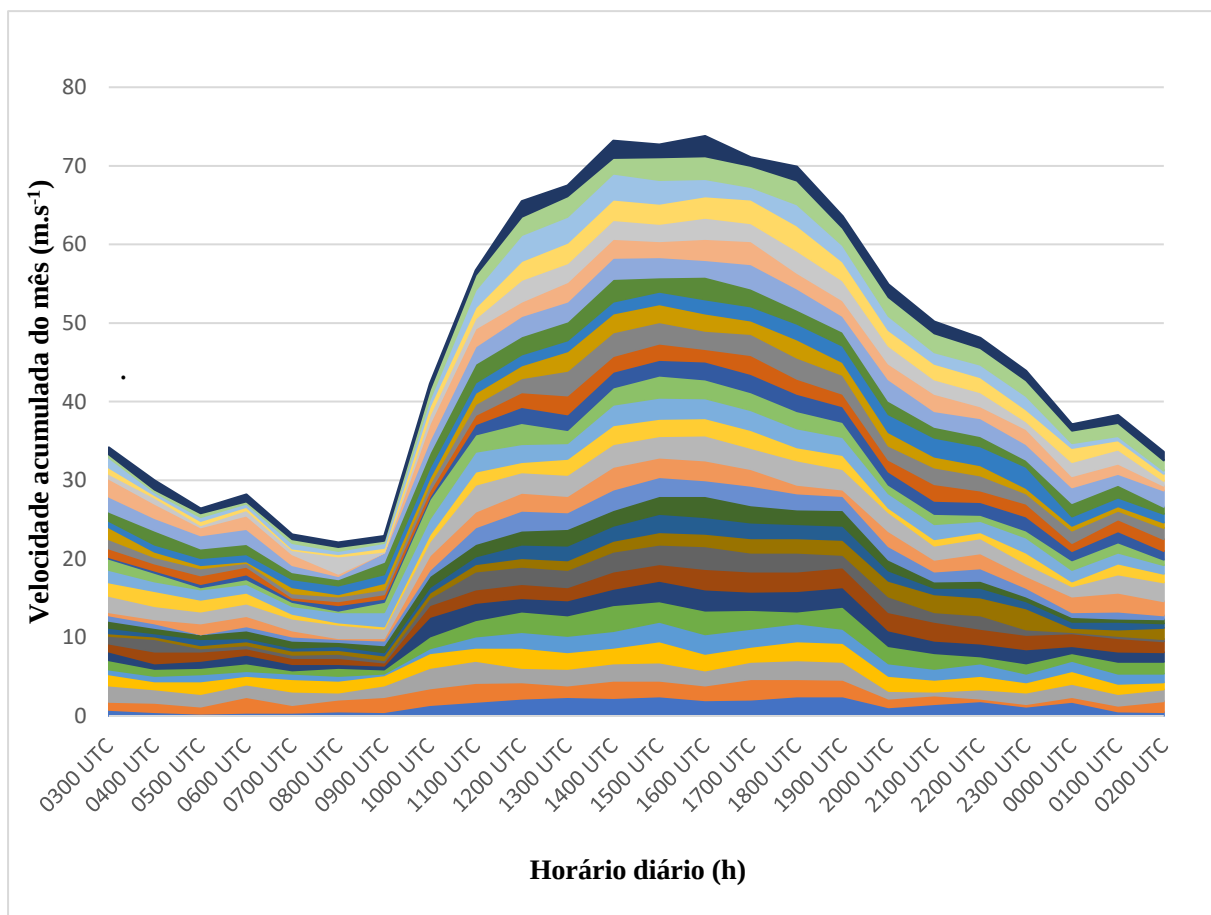


Figura 10 – Frequência acumulada da velocidade vento distribuída por hora (mês de outubro - 2021).
Fonte: Adaptado dos dados do INMET (2021).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados do inventário de emissões veiculares na Av. Agamenon Magalhães (via urbana), sentido Olinda, para o ano de 2021, demonstraram que o monóxido de carbono foi um dos poluentes mais emitidos no trecho de alto fluxo veicular no mês de outubro.

Nesse sentido, ao analisar a dispersão nesse trecho, verificou-se que a concentração máxima da simulação aconteceu no dia 08 e teve $5,1 \times 10^{-4} \text{ mg/m}^3$, no período de 0h às 8h. Ademais, as simulações foram divididas em três períodos de 8 horas, esses períodos foram de 0h - 8h, 8h - 16h e 16h - 0h. Com isso, observou-se que os horários de maiores concentrações e consequente poluição aconteceram nos períodos predominantes da madrugada (0h-8h), seguido pelo período da noite (16h-0h) e, por último, da manhã (8h-16h).

Além disso, o poluente CO atingiu maiores concentrações até a distância máxima de

10 km a partir da fonte de emissão. Assim, tiveram como receptores da poluição diversos bairros de Recife e, preponderantemente, aqueles que se localizam na direção noroeste, como Espinheiro, Jaqueira, Encruzilhada, Rosarinho, Tamarineira, Alto José Bonifácio, Vasco da Gama, Macaxeira, Córrego do Jenipapo, Nova descoberta e Brejo da Guabiraba. No caso das plumas de concentração intermediária, em dois casos elas ultrapassaram mais de 40 km de raio, chegando a atingir alguns interiores da Mata Norte do Estado de Pernambuco, como Itaquitinga, Nazaré da Mata, Aliança e Vicência.

Contudo, caracterizou-se como limpa a qualidade do ar nessas regiões, já que os limites ficaram abaixo daqueles impostos pelo padrão estabelecido pelo CONAMA Nº 491 (2018). Há de se observar ainda que o produto das modelagens correspondeu apenas às emissões veiculares do trecho de alto fluxo veicular. Nesse sentido, para futuros trabalhos, aconselha-se a quantificação de outras fontes possíveis de poluição do ar, como as fixas (industriais) e as móveis (de navios, avião, entre outras), assim como, a inclusão de outros tipos de poluentes, como NO_2 , MP, O_3 etc., e locais distintos, como no porto de Suape.

O uso do modelo computacional de simulação de trajetórias de dispersão permitiu verificar as direções preferenciais de dispersão dos poluentes emitidos no ponto selecionado da via urbana. Nesse viés, no trecho simulado, 83% das trajetórias estão relacionadas com ventos saindo de Sudeste e apenas 17% de sentido Nordeste. Ademais, pôde-se comprovar o modelo HYSPLIT com os resultados obtidos através de dados medidos em estação meteorológica próxima ao local da simulação. Foi possível também demonstrar que no período investigado só ocorreram brisas leves a suaves. Nesse sentido, estes resultados possibilitam, também, a reflexão acerca de onde seria mais adequada uma possível localização para a estação de monitoramento da qualidade do ar futuramente em Recife.

Além disso, com essa investigação foi possível compreender a íntima relação entre a poluição atmosférica e a qualidade do ar, assim como é factível vislumbrar os meios para minimizar ou estabilizar o problema da poluição atmosférica. Por isso, sugere-se a adoção de medidas mais sustentáveis, como o programa “Proálcool”, para o uso dos veículos automotores; a limitação do uso de veículos com tecnologias mais antigas; os incentivos monetários (fiscais ou não fiscais) na ampliação do consumo de carros elétricos; o melhoramento do combustível usado nos veículos e a ampliação das regiões que monitoram a qualidade do ar.

AGRADECIMENTO

À Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE), pelo apoio

financeiro. Ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) pela disponibilidade dos dados. À Administração Oceânica e Atmosférica Nacional (NOOA) pelo molelo HYSPLIT, essencial para a realização deste estudo. À Universidade Federal Rural de Pernambuco e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental – PPAMB/PE pelo suporte à pesquisa.

REFERÊNCIAS

AMARAL, C. H. C. **Poluição atmosférica em comunidades residentes em áreas próximas a estabelecimentos industriais: um indicativo de injustiça ambiental**. 2021. 100 f. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Medicina da Bahia, Universidade de Federal da Bahia, Bahia, 2021.

ANDRADE, M. De F., KUMAR, P., DE FREITAS, E. D., YNOUE, R. Y., MARTINS, J., MARTINS, L. D.; ZHANG, Y. Air quality in the megacity of São Paulo: Evolution over the last 30 years and future perspectives. **Atmospheric environment**, v. 159, p. 66-82, 2017.

BRANDÃO, P. V. R. **Estudo da dispersão atmosférica de poluentes originários da frota veicular em Salvador–BA**. 190 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – UFBA, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2021.

CANCELLI, D. M.; DIAS, N. L. BRevê: uma metodologia objetiva de cálculo de emissões para a frota brasileira de veículos. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 19, p. 13-20, 2014.

CABRAL, J. J. S. P.; GUSMÃO, A. D.; DA SILVA JUNIOR, M. A. B.; BARROS, E. N. MUDANÇAS CLIMÁTICAS E SUBSIDÊNCIA DO TERRENO COMO DIFICULDADES PARA A GESTÃO URBANA DE UMA AVENIDA MARGINAL DE CURSO D'ÁGUA EM CIDADE COSTEIRA. **Revista de Geografia (Recife)**, v. 38, n. 2, 2021.

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Ficha de Informação Toxicológica, monóxido de carbono**. 2022. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2022/02/Monoxido-de-Carbono.pdf>. Acesso em: 01 jun. 2023.

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Relatório de Qualidade do Ar no estado de São Paulo**. São Paulo: Governo do Estado de São Paulo/Secretaria do Meio Ambiente/Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. 2021. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/wp-content/uploads/sites/28/2022/10/Relatorio-de-Qualidade-do-Ar-no-Estado-de-Sao-Paulo-2021.pdf>. Acesso em: 08 mai. 2023

CHEOL, H. K.; CHAI, T.; STEIN, A.; KONDRAGUNTA, S. Modelagem inversa de emissões de incêndio restritas pelo transporte de pluma de fumaça usando modelo de dispersão HYSPLIT e observações geoestacionárias de satélite. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 20, issue 17, p. 10259–10277, 2020.

CHULDE LLIVE, D. F. **Evaluación de la contaminación del aire causada por las emisiones de gases producida por la circulación vehicular, en la ciudad de San Gabriel, provincia del Carchi**. 157 f. Tese de Doutorado. Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Ibarra, 2019.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar. Resolução n.491, de 19 de novembro de 2018. **Diário Oficial da União**, nº223, de 21/ 11/ 2018, Seção 01, P.155-156.

COSTA, P. C. de S. **Tendências e ciclos médios da velocidade do vento e complementaridade energética em regiões próximas a empreendimentos eólicos no Nordeste do Brasil**. 2022. 69f. Dissertação (Mestrado em Ciências Climáticas) - Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022.

COSTA, F. L N; CARVALHO, M. N; MARIANO, G. L.; DA SILVA, A. J. G. LIMA, R. C. Avaliação das emissões veiculares em uma região metropolitana de alto fluxo veicular. **ACTA Geográfica**. No prelo 2023.

CPRH - Agência Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. **Qualidade do Ar - rede de monitoramento**. Pernambuco. 2023. Disponível em: <http://www2.cprh.pe.gov.br/monitoramento-ambiental/qualidade-do-ar-2/rede-de-monitoramento/> . Acesso em: 20 mai. 2023.

DERISIO, J. C. Introdução ao controle de poluição ambiental. **Oficina de textos**, 2016.

DETRAN. Departamento Estadual de Trânsito de Pernambuco. **Serviço de Informações ao Cidadão do Departamento Estadual de Trânsito de Pernambuco (SIC/DETRAN-PE)**, [Pernambuco]: DETRAN, [2021]. Disponível em: <https://www.detran.pe.gov.br/institucional-detran/portal-da-transparencia>. Acesso em: 10 fev. 2022.

DRAXLER, R.R.; HESS G.D. An overview of the Hysplit_4 modelling system for trajectories, dispersion, and deposition, **Australian Meteorological Magazine**, 47, 295-308. 1998.

DUARTE, E. S. F. **Análise e caracterização do material particulado atmosférico fino em uma região metropolitana de Natal-RN**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil, 2016.

EPA. Environmental Protection Agency. (2020). **Air Quality System (AQS)**. Disponível em: <<https://www.epa.gov/aqs>>. Acesso em: 30 maio 2022.

GOOGLE. **Google Earth website**. <http://earth.google.com/> , 2023. Acesso em: 02 fev. 2023.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa - BDMEP. Rede de Estações Meteorológicas Automáticas. **Downloads dos dados [2021]**. Recife, PE, Brasil, 2021. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em: 29 mai. 2023.

IRIART, P. G.; FISCH, G. Uso do Modelo WRF-CHEM para a Simulação da Dispersão de Gases no Centro de Lançamento de Alcântara. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, p. 610-625, 2016.

MA, Y.; WANG, M.; WANG, S.; WANG, Y.; FENG, L.; WU, K. Air pollutant emission characteristics and HYSPLIT model analysis during heating period in Shenyang, China. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 193, p. 1- 14, 2021.

CERATTI, A. M.; ALVES, D. D.; MEINCKE, L.; RABELO, F. L.; OSÓRIO, D. M. M. Relação do monitoramento atmosférico de NO₂, CO e O₃ obtidos pela estação de monitoramento automática da qualidade do ar da universidade FEEVALE/RS com variáveis meteorológicas. **Revista Conhecimento Online**, 2018, vol. 3, p. 57-78.

MARIANO, G. L. **Simulação numérica da dispersão dos poluentes H₂S e NH₃ provenientes do lixão de Maceió-AL nas épocas seca e chuvosa: estudo de casos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Alagoas, Brasil, 2006.

NASCIMENTO-SILVA, A. V. do; SOUZA, W. M. de. Evolução das emissões dos gases automotivos de veículos do ciclo Otto em Recife (Pernambuco). **Revista Geama**, [S. l.], v. 5, n. 2, p. 20–29, 2019. Disponível em: <https://journals.ufrpe.br/index.php/geama/article/view/2543>. Acesso em: 25 jun. 2023.

NASCIMENTO, R. C.; SILVA, J. B. S. ; FRANCA, R. S. ; VASCONCELOS, T. L. . Estudo microclimático da Praça do Derby e entorno, Recife-PE. In: Arminda Saconi Messias. (Org.). **Gestão da Água: água, meio ambiente e saúde**. 1ed.Recife: , 2013, v. 7, p. 1179-1186.

RECIFE. Autarquia de Trânsito Urbano do Recife (CTTU). **Velocidade das Vias – Quantitativo por Velocidade Média (2021)**. Recife, 2021. Disponível em: <http://dados.recife.pe.gov.br/dataset/velocidade-das-vias-quantitativo-por-velocidade-media-2021> . Acesso em: 10 jan. 2021.

REICHERT, J. Tabagismo passivo–implicações genéticas em gerações. **Associação médica do Paraná**, v. 75, n. 1, p. 103, 2017.

SILVA, C. **Modelagem Lagrangeana Da Dispersão Atmosférica De Radionuclídeos E Sistemas De Informação Geográfica Como Ferramentas De Suporte Ao Planejamento De Emergência Na Área De Influência Do Complexo Nuclear De Angra Dos Reis – Rj**. Tese Submetida Ao Corpo Docente Do Instituto Alberto Luiz Coimbra De Pós-Graduação E Pesquisa De Engenharia (Coppe) Da Universidade Federal Do Rio De Janeiro Como Parte Dos Requisitos Necessários Para A Obtenção Do Grau De Doutor Em Ciências Em Engenharia Civil - 2013.

SILVA, M. L. B. **Estimativa da qualidade do ar nas principais áreas metropolitanas de nordeste brasileiro**. 2022. 61 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto de Ciências Atmosféricas, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2021.

STEIN, A. F. DRAXLER, R. R.; ROLPH, G. D.; STUNDER, B. J. B.; COHEN, M. D.; NGAN, F. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 96, n. 12, p. 2059-2077, 2015.

TIAN, J.; FANG, C.; QIU, J.; WANG, J. Analysis of pollution characteristics and influencing factors of main pollutants in the atmosphere of Shenyang city. **Atmosphere**, v. 11, n. 7, p. 766, 2020.

TSAI, I-C.; LEE, C. Y.; LUNG, S. C. C.; SU, C.W. Characterization of the vehicle emissions in the Greater Taipei Area through vision-based traffic analysis system and its impacts on urban air quality. **Science of the Total Environment**, 2021, vol. 782, p. 146571.

UE. Directive 2008/50/Ec Of The European Parliament And Of The Council Of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe. Official Journal of the European Union. Brussels, 2008. Disponível em: https://ec.europa.eu/environment/air/pdf/clean_air_for_all.pdf. Acesso em: 17 fev. 2022

VORMITTAG, E. D. M.; DE ARAÚJO, P. A.; CIRQUEIRA, S. S. R.; WICHER NETO, H.; SALDIVA, P. H. N. Análise do monitoramento da qualidade do ar no Brasil. **Estudos Avançados**, 2021, vol. 35, p. 7-30.

ZHOU, S.; LIU, N.; LIU, C. S. Identification for potential sources for haze events in Shanghai from 2013 to 2015. **Acta Scientiae Circumstantiae**, v. 37, n. 05, p. 1835-1842, 2017.

WHO. World Health Organization. Ambient Air Pollutins: a Global Assessment of Exposure Burden. **World Health Organization**, 2016. Disponível em: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/250141/9789241511353-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 16 dez. 2022.

5- CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a urbanização, a população vem crescendo significativamente e, em paralelo, o quantitativo de veículos automotivos também cresce. Dessa forma, os desafios trazidos por esses aumentos tendem a se tornar um problema urgente. É preciso, pois, pensar em formas para mitigar problemas de saúde e destruição do meio ambiente ocasionados pela poluição do ar.

Nesse sentido, uma das formas de gerir esse problema, é a efetivação do monitoramento da qualidade do ar, já que em Pernambuco há poucas estações de monitoramento da qualidade do ar, sendo que nenhuma se encontra na capita do Estado (Recife).

Assim sendo, para o inventário de emissões veiculares, realizou-se a mensuração dos seguintes poluentes CO, NO_x, RCHO, NMHC, CH₄, MP e CO₂, no ponto de alto tráfego veicular da Avenida Agamenon Magalhães em Recife – PE.

Para as estimativas das emissões veiculares, utilizou-se a abordagem metodológica *bottom-up*. Com esse método foi possível gerar dados de forma anual e também mensal e diária (outubro), mês com maior emissão de poluentes.

Ainda no que se refere ao mês de maior poluição em 2021, outubro, o fluxo veicular foi o mais alto, confluindo para a ideia de que quanto mais veículos, maior a quantidade de poluição.

Ademais, ao observar os dias (de semana e fins de semana) no mês de outubro, os dados médios mostram que os dias da semana são os dias que mais emitem poluição, e os de finais de semanas apresentam redução da poluição. A diferença representada foi uma redução de 21%.

Com essas informações, foi possível fazer comparativos com outros tipos de estudo, além de servir como base para se investigar a dispersão e as trajetórias do ar para o mesmo ponto da via de alto fluxo veicular do inventário.

Nesse sentido, nos resultados observados, para o ano de 2021, verificou-se que o CO (monóxido de carbono) e o CO₂ (dióxido de carbono), dentre os poluentes analisados, foram os que tiveram as maiores emissões no geral. Além disso, a classe dos automóveis foi responsável majoritariamente pelas emissões desses poluentes.

Já no que confere as simulações, estas foram realizadas com o modelo HYSPLIT para o mês de outubro, levando em conta um dos poluentes mais emitidos em 2021, no caso, o CO (monóxido de carbono). Aqui, a busca foi verificar as possíveis áreas afetadas e observar se a poluição do ar está nos padrões aceitáveis.

Os resultados mostraram que as maiores concentrações de poluição se deram no período da madrugada e, durante o dia, as menores concentrações. No caso das dispersões, a velocidade dos ventos foi relativamente maior durante o dia e menor na madrugada, confluindo para importância das observações das variáveis meteorológicas.

Ademais, as regiões que funcionam como receptoras das emissões veiculares ficam localizadas a Noroeste do ponto investigado. Em todos os dias analisados, as maiores concentrações não passaram do raio de 10 Km, ficando mais concentrados próximos à fonte. Contudo, concentrações menores adentraram outras regiões e perpassaram mais de 40 km, chegando à Região da Mata Norte do Estado de Pernambuco, como Itaquitinga, Nazaré da Mata, Aliança e Vicência. Dessas conclusões depreende-se, portanto, a reflexão sobre onde seria a localização ideal de uma possível estação de monitoramento na cidade do Recife e sobre a metodologia para se observar outras regiões e verificar a pertinência de instalação de monitoramento do ar.

No mais, foi possível fazer o comparativo com a legislação e, nesse sentido, as concentrações simuladas se mantiveram em padrões aceitáveis pelo CONAMA. Porém, sugere-se, para um próximo estudo, uma análise de contribuições externas de poluição, uma vez que aqui só foram levadas em conta as emissões de origem veicular.

Assim, em relação ao inventário, ressalta-se que o cálculo do inventário poderia estar melhor contextualizado se, para o trecho selecionado para análise, houvesse literatura com reflexões e cálculos semelhantes, para fins de melhor comparação. Sugere-se, então, para os

próximos estudos, a criação de inventários que abarquem mais fontes e formas metodológicas diferentes, além de maiores trechos para, assim, resultarem em investigações ainda mais precisas.

Por fim, cabe ressaltar que os objetivos de investigação das emissões veiculares geraram subsídios à compreensão dos índices de poluição do trecho observado, além de contribuírem para o preenchimento de lacunas na base de referência da área de poluição do ar na Região de Recife. Esses dados poderão servir como base de comparação para futuros trabalhos, além de fornecerem informações úteis para possíveis implementações de políticas públicas que visem à proteção da comunidade urbana, tanto no quesito monitoramento quanto controle da qualidade do ar.

ANEXO A - Aplicação do cálculo para o inventário – exemplo prático (CAPÍTULO 1).

Para ilustrar o procedimento de estimativa de emissões de poluentes provenientes de veículos em um trecho de grande tráfego, tomemos como caso a Avenida Agamenon Magalhães, localizada no município de Recife, durante o dia 08. Utilizaremos a equação $E_{linha,i} = Fr_{j} \times (Fe_{i}/1000) \times L$, onde para a estimativas das emissões precisaremos dos seguintes dados de entrada:

Fr_{j} : Fator de emissão para a classe de veículos 'j' e o tipo específico de poluente (O fator de emissão por categoria e tipo de poluente (Tabela 5)).

L : Extensão da via analisada (0,2 km) (Figura 2).

Fe_{i} : Frota estimada para a classe de veículos 'i'. (Que nesse caso precisa-se da contagem de veículos realizada pelo radar, que é apresentada na Tabela 4 e a frota registrada no DETRAN, que é apresentada na Tabela 3, então aplica-se a ponderação e obtém-se o Fe_{i}).

Passo a passo:

Ponderação:

Para a classe de automóveis, a contagem de veículos realizada pelo radar foi de 47.518. O fator de ponderação de 57,1% implica que 0,571 da frota de automóveis é representada por esta contagem. Assim, o produto do total aferido no radar pelo fator de ponderação resulta na estimativa para esta classe de 27.085 veículos.

Cálculo das Emissões:

Utilizando a equação $E_{linha,i} = Fr_{j} \times (Fe_{i}/1000) \times L$:

Para a classe de automóveis:

Fator de emissão (Fr_{j}): 1,2 (Tabela 5)

Frota estimada (Fe_{i}): 27.085 veículos automóveis.

Extensão da via (L): 0,2 km (Figura 2).

Portanto, as emissões de monóxido de carbono (CO) para a classe de automóveis no dia 08, no trecho de 200 metros, são estimadas em 6,5 kg.

Repete-se o mesmo procedimento para as outras classes, poluentes e dias subsequentes.

ANEXO B – Descritivos para a simulação no modelo HYSPLIT (CAPÍTULO 2).

Dispersão: para usar um modelo de dispersão como o HYSPLIT (versão online) para simular a dispersão do monóxido de carbono (CO), foram utilizados os seguintes dados de entrada:

Inicialmente precisou-se de três dados: tipo de lançamento, meteorologia e local de partida.

- Tipo de lançamento foi utilizado: material desconhecido (massa genérica, < 24 horas).
- Meteorologia: GSF (0,25 °, global, 06/2019 até o presente).
- Local de origem: latitude 8°02'35,47" sul e longitude 34°53'9,13" oeste.

Em seguida, na página de arquivos de meteorologia e outras informações.

- Utilizou-se do banco de dados de arquivos meteorológicos, para cada dia do mês de outubro de 2021. Ou seja, foi utilizado do 2021.1001_gfs0p25 até 2021.1031_gfs0p25.
- Deposição e opções avançadas: marcou a opção não.

Na etapa de detalhes de execução do modelo, é dividida em três partes: parâmetros do termo de origem, parâmetros de tempo de execução, opções de exibição.

Parâmetros do termo de origem:

- Direção da dispersão (para frente ou retroceder): a opção foi para frente.
- Horário de início do lançamento (UTC): precisa do ano, mês, dia, hora e minuto. Nesse caso, como os dados são diários, para cada dia precisou-se alterar esses dados, colocando dia 01, 02...até dia 31. Observação para o horário, começando às 3h00min, pois aqui é em UTC.
- Latitude e longitude: já vão está preenchidos, pois já foi indicado anteriormente.
- Lançamento superior: 9,3. (altura da av. mais altura do escapamento médio dos veículos)
- Liberação parte inferior: 8.
- Quantidade liberada: usou-se a quantidade em kg dos resultados do inventário do CO para cada dia. Ou seja, do dia 01 até 31 de outubro de 2021.
- Duração do lançamento: 24h.

Parâmetros de tempo de execução:

- Duração total: 24h.

- Período médio/ intervalo de saída: observou-se a duração de 8h em 8h. Gerando 3 mapas de saída para cada dia.
- Topo da camada média: 100 (o adotado pelo programa).
- Calcule a trajetória do centro de massa: opção adotada - não.

Opções de exibição:

- Saída de contornos GIS: google Earth (kmz).
- Resolução do gráfico (dpi): 120.
- Fator zoom: 50.
- Sobreposição de círculo de distância 4 círculos espaçados a 10km.
- Fronteiras dos condados dos EUA: não.
- Arquivo pós-escritos: não
- Criar arquivos PDF de gráficos: sim.

Trajatória: a versão utilizada foi a 5.2.1 não registrada para computador (https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT_hytrial.php), disponibilizada pelo sistema READY (Real-time Environmental Applications and Display System) do Laboratório de Recursos do Ar (ARL) da Administração Nacional Oceânica e Atmosférica (NOAA).

O menu é dividido em 4 partes, meteorologia, trajetória, concentração e avançado.

Para executar, primeiro definiu-se os dados meteorológicos: FTP de dados ARL; arquivos.

- Utilizou-se da base de dados meteorológicos global GDAS (*Global Data Assimilation System*) com resolução espacial de 1.0° e informações disponíveis desde o ano de 2005 através de arquivos semanais.
- Selecionou-se o mês (outubro), o dia e hora.
- Baixou-se os arquivos meteorológicos de 6 semanas para contemplar todos os dias do mês de outubro - 2021. (gdas1.out21.w1; gdas1.out21.w2; gdas1.out21.w3; gdas1.out21.w4; gdas1.out21.w5; gdas1.nov21.w1).

Na execução do modelo de trajetória – menu trajetória - execução de configuração.

- Início do tempo (ano; mês; dia e hora): 21;09;30;20 (repectivamente).
- Número de locais de partidas: (1- uma) – localização: latitude -8.043186 sul, longitude -34.885869 oeste e altitude de 9.3 metros.
- Tempo total de execução 4h; direção: para frente; parte superior do modelo: 10000.

- Método de movimento vertical: “0 = *input model data*”.
- Adicionar os arquivos meteorológicos (gdas1.out21.w1;gdas1.out21.w2; gdas1.out21.w3; gdas1.out21.w4; gdas1.out21.w5; gdas1.nov21.w1). Salvar.

Na execução do modelo de trajetória – menu trajetória – executar modelo.

Na execução do modelo de trajetória – menu trajetória – “*Special Runs*” - Diário.

- 4 horas; 31 dias; início 20horas.
- Executar *script*.

Na execução do modelo de trajetória – menu trajetória – “*Special Runs*” – Agrupamento - Padrão.

Etapa 1:

- Horas do *cluster*: 4horas.
- Intervalo de tempo: 4 horas.
- Salto da trajetória: 1.
- Pasta de terminais: “local dos arquivos gerados pelo “*Special Runs*” – Diário.”
- Pasta de trabalho: “não foi alterado”.
- Pasta de arquivo: “não foi alterado”
- Projeção (para “executar *cluster*”): auto.

Etapa 2:

- Executar a análise do *cluster*.

Etapa 3:

- Número de *clusters*: 5.
- Atribuir trajetórias do *clusters*: visualizar; rodar.
- Meios de exibição – “ajustes a depender dos dados que se quer de saída” – Executar exibição.