



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES**

NAYARA DE OLIVEIRA GURJÃO

**ESTUDO SOBRE A CONTRIBUIÇÃO DO TRÁFEGO E DE FATORES URBANOS
NA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA DE FORTALEZA/CE UTILIZANDO UM
EQUIPAMENTO DE BAIXO CUSTO**

FORTALEZA

2024

NAYARA DE OLIVEIRA GURJÃO

**ESTUDO SOBRE A CONTRIBUIÇÃO DO TRÁFEGO E DE FATORES URBANOS
NA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA DE FORTALEZA/CE UTILIZANDO UM
EQUIPAMENTO DE BAIXO CUSTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.

Orientador: Prof. Jorge Barbosa Soares, Ph.D.
Coorientador: Prof. Dr. Jorge Luiz Oliveira Lucas Júnior.

FORTALEZA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

G986e Gurjão, Nayara de Oliveira.

Estudo sobre a contribuição do tráfego e de fatores urbanos na poluição atmosférica de Fortaleza/CE utilizando um equipamento de baixo custo / Nayara de Oliveira Gurjão. – 2024
144 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2024.
Orientação: Prof. Jorge Barbosa Soares, Ph.D.
Coorientação: Prof. Dr. Jorge Luiz Oliveira Lucas Júnior.

1. Espaço urbano. 2. Poluição atmosférica. 3. Emissão veicular. 4. Sensores de baixo custo. I. Título.
CDD 388

NAYARA DE OLIVEIRA GURJÃO

**ESTUDO SOBRE A CONTRIBUIÇÃO DO TRÁFEGO E DE FATORES URBANOS
NA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA DE FORTALEZA/CE UTILIZANDO UM
EQUIPAMENTO DE BAIXO CUSTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.

Aprovada em: 24/05/2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Jorge Barbosa Soares, Ph.D. (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Jorge Luiz Oliveira Lucas Júnior (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Lara Sucupira Furtado, Ph.D.
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Iuri Sidney Bessa
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Benjamin Shane Underwood, Ph.D.
Universidade Estadual da Carolina do Norte (NCSU)

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Neuma Mattos de Oliveira Gurjão e Francisco William Gurjão Bezerra, por apoiarem e confiarem na escolha profissional que fiz. Agradeço à minha irmã, Natália de Oliveira Gurjão, por ser grande inspiração e exemplo no meio pessoal, profissional e acadêmico. Agradeço à minha tia Nadja, pelos encontros diários com café da tarde, horário de descontração e união. Aos demais familiares que me ajudaram de alguma forma nessa jornada.

Agradeço ao meu noivo, Roger Lima da Silva, por estar presente em todos os momentos, aconselhar, apoiar, acreditar, ter paciência e me dar forças, quem acompanhou cada desafio e superação neste caminho difícil.

Agradeço por grandes amigos que a vida me deu. Taynah Lima e Tainá Ferreira, que estão sempre ao meu lado, oferecendo apoio e torcendo por meu sucesso em cada etapa. Iran e Camila, com quem posso contar e compartilhar os melhores e piores momentos.

Ao meu orientador, Jorge Barbosa Soares, deixo meus agradecimentos por todas as oportunidades e por acreditar em mim para assumir grandes responsabilidades. Agradeço por lutar junto comigo e por mim, fazendo eu me sentir inteiramente parte do grupo. Ele é O Jorge.

Ao meu coorientador, Jorge Lucas Júnior, que foi um apoio essencial para fazer essa pesquisa acontecer, agradeço as inúmeras correções, revisões, reuniões, compreensão com os prazos apertados, paciência e os momentos de apoio e de encorajamento. Obrigada por ingressar neste desafio comigo.

À professora Lara Sucupira Furtado, minha coorientadora informal e membro da banca avaliadora, agradeço a parceria, os ensinamentos e por se tornar um grande exemplo para mim. Foi incrível conhecê-la, aprender e trabalhar ao seu lado.

Ao professor Iuri Sidney Bessa, membro da banca e atual colega de artigos, por suas correções, conselhos e incentivos à parte desta pesquisa. À professora Juceline Bastos, quem tenho grande admiração, por sua ajuda e encorajamento pelo trabalho e tema escolhido. Ao professor Shane Underwood, membro da banca, que veio de tão longe para abrilhantar meu trabalho com suas correções, é um prazer tê-lo conosco. Aos membros da banca, agradeço a disponibilidade, a atenção e o cuidado com a correção do meu trabalho e orientações para prosseguir.

Ao grupo LMP, agradeço a parceria e apoio, é uma honra fazer parte de uma equipe incrível como essa, em especial gostaria de citar Annie, Iolanda e Hermano, pela ajuda em tantos processos e ensaios de campo. Cito ainda colegas e exemplos que tive no mestrado como

Karol, Sasaki, Thiago, Wemenson, Otávio e Andressa, que hoje são mestres de grande sucesso.

Agradeço ao Labomar, especialmente professor Rivelino e Rafael, pela ajuda com ensaios em campo e disponibilidade de equipamento. Agradeço ao Lesc, especialmente professor Jarbas e Edilson, pelo trabalho com os sensores, e Nicolas, pelo atual trabalho com os dados.

Agradeço ao financiamento recebido pela CAPES e enfatizo que parte dos resultados apresentados neste trabalho foram obtidos através do projeto “CENTRO DE EXCELÊNCIA EM INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL – AI4WELLNESS”, financiado pela Samsung Eletrônica da Amazônia Ltda., no âmbito da Lei de informática Nº 8.248/91. Este último me proporcionou uma grande experiência com incríveis profissionais das mais diversas áreas, possibilitando aplicar os conhecimentos nos temas de ciências de dados e computação.

Por último, e principal reconhecimento, registro meus agradecimentos à Deus por essa conquista que me ensinou a ser mais paciente, ter fé e acreditar que os acontecimentos têm propósitos, mesmo em meio às grandes dificuldades enfrentadas. O mestrado era um grande sonho após a graduação, e cada etapa alimentou minha vontade de ser professora e pesquisadora. Novos sonhos surgiram nesse percurso e seguem fortes no meu coração, torço para que possam ser realizados. Espero que com esse título novas portas se abram e que meu caminho seja construído de acordo com o que Deus planejou para mim.

RESUMO

A crescente preocupação com a qualidade do ar em áreas urbanas tem impulsionado estudos sobre poluição atmosférica, suas origens e efeitos na saúde humana e no meio ambiente, sendo especialmente destacada a influência do tráfego de veículos e da infraestrutura urbana na emissão e no comportamento da poluição no ambiente. Este trabalho focou no desafio de entender as variações da poluição do ar em certas áreas de Fortaleza/CE, e seus efeitos no tecido urbano, aproveitando a inovação de um equipamento financeiramente acessível construído para a coleta de dados essenciais. A investigação consistiu na coleta e análise de informações sobre poluentes atmosféricos, dados climáticos e tráfego em 12 locais distintos da cidade, considerando também elementos urbanos como a altura dos edifícios e a classificação das vias a partir de uma análise espacial. Os dados coletados e analisados por modelos de regressão multilinear indicam que a poluição não está diretamente ligada ao volume de tráfego, estando mais associada a aspectos urbanos, meteorológicos e da vegetação local, que podem limitar a circulação do ar e afetar a dispersão de poluentes. Observou-se que a presença de partículas finas (material particulado de até $2,5\mu\text{m}$) foi menos influenciada por características urbanas em comparação aos valores de dióxido de carbono (CO_2), tendo mais influência de variáveis meteorológicas. Também foi estabelecida uma conexão entre os níveis de poluição do ar e regiões com alta presença de cânions urbanos, destacando a importância do planejamento urbano na mitigação da poluição. Por fim, embora o uso de um equipamento de baixo custo tenha se mostrado eficaz na medição da poluição atmosférica e dados meteorológicos, investigar uma maior área geográfica, com mais dispositivos conectados e coleta de outras variáveis, como velocidade e direção do vento e características da qualidade das vias, é necessário para um entendimento mais robusto deste fenômeno complexo.

Palavras-Chave: espaço urbano; poluição atmosférica; emissão veicular; sensor de baixo custo.

ABSTRACT

The growing concern about air quality in urban areas has driven studies on atmospheric pollution, its origins, and its effects on human health and the environment, with a particular emphasis on the influence of vehicle traffic and urban infrastructure on the emission and behavior of pollution in the environment. This work focused on the challenge of understanding air pollution variations in certain areas of Fortaleza/CE, and their effects on the urban fabric, leveraging the innovation of a financially accessible device built for the collection of essential data. The investigation consisted of collecting and analyzing information on atmospheric pollutants, climate data, and traffic in 12 different locations in the city, also considering urban elements such as building heights and road classifications based on spatial analysis. The data collected and analyzed through multilinear regression models indicate that pollution is not directly linked to traffic volume but is more associated with urban, meteorological, and local vegetation aspects that can limit air circulation and affect pollutant dispersion. It was observed that the presence of fine particles (particulate matter up to $2.5\mu\text{m}$) was less influenced by urban characteristics compared to carbon dioxide (CO₂) levels, having more influence from meteorological variables. A connection was also established between air pollution levels and regions with a high presence of urban canyons, highlighting the importance of urban planning in mitigating pollution. Finally, although the use of low-cost equipment proved effective in measuring atmospheric pollution and meteorological data, investigating a larger geographical area, with more connected devices and collection of other variables, such as wind speed and direction and road quality characteristics, is necessary for a more robust understanding of this complex phenomenon.

Keywords: urban space; atmospheric pollution; vehicular emissions; low-cost sensor.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Objetivos de desenvolvimento sustentáveis – ODS	19
Figura 2 – Processo de coleta de dados, transporte e visualização dos dados pelos usuários ..	24
Figura 3 – Monitoramento da qualidade do ar - SEMACE	34
Figura 4 – Monitoramento realizado pela SEUMA.....	35
Figura 5 – Fatores climáticos que afetam a performance do pavimento flexível.....	39
Figura 6 – Perfil de emissões de CO durante a partida a frio (a) e marcha-lenta (b) para os veículos/combustíveis testados.....	41
Figura 7 – Concentração média horária de (a) MP10 e (b) NO ₂	44
Figura 8 – Distribuição espacial de concentrações médias de poluentes	45
Figura 9 – Proporções de cônions no meio urbano.....	46
Figura 10 – Representação da ventilação e dispersão de poluentes no cânion urbano	47
Figura 11 – Identificação de cônions a partir da concentração de poluentes	49
Figura 12 – Valores médios diários de NO ₂ durante os dois períodos de amostragem.....	51
Figura 13 – Esboço do monitoramento da qualidade do ar em grande escala.....	59
Figura 14 – Visualização de dados de dispositivos móveis	62
Figura 15 – Esquema das etapas metodológicas	64
Figura 16 – Figura esquemática	65
Figura 17 – <i>Sensenet</i> 3.0.....	66
Figura 18 – Evolução do <i>Sensenet</i>	68
Figura 19 – <i>Dashboard</i> para visualização de dados do <i>Sensenet</i>	69
Figura 20 – <i>Sensenet</i> versão 3.0	71
Figura 21 – Casella Cel-712 Microdust Pro	72
Figura 22 – Amostrador de ar de grande volume – Hi-Vol 3000.....	72
Figura 23 – Estação meteorológica móvel – <i>Davis</i>	73
Figura 24 – Estrutura de medição.....	74
Figura 25 – Planta de situação	75
Figura 26 – Estimativa de vínculos empregatícios ativos nos bairros Meireles e Aldeota	76
Figura 27 – Distribuição dos pontos de medição na área de estudo.....	77
Figura 28 – Endereço e características físicas dos pontos de coleta	79
Figura 29 – Análise de MP2,5 por hora de medição – <i>Sensenet</i> 2.0	86
Figura 30 – Nível de MP2,5 por ponto com faixa limite permitida	90
Figura 31 – Variação dos níveis de MP2,5 no decorrer do dia – <i>Sensenet</i> 3.0	92
Figura 32 – Nível de CO ₂ por ponto com faixa limite permitida	94
Figura 33 – Variação dos níveis de CO ₂ corrigidos no decorrer do dia – <i>Sensenet</i> 3.0	95
Figura 34 – Influência do tráfego na concentração de MP2,5 – Rodada 1	96
Figura 35 – Influência do tráfego na concentração de MP2,5 por dia de coleta	97
Figura 36 – Mapa para representação das médias de tráfego por ponto.	99
Figura 37 – Análise da temperatura e umidade por ponto de medição – <i>Sensenet</i> 2.0	100
Figura 38 – Análise dos índices de temperatura e umidade por ponto – <i>Sensenet</i> 3.0.....	102
Figura 39 – Análise entre concentração de MP2,5 e volume de tráfego por ponto.....	103
Figura 40 – Análise detalhada de MP2,5 e tráfego dos pontos 1, 4 e 12 no decorrer do dia ..	104
Figura 41 – Variabilidade entre concentração de MP2,5 e volume de tráfego	105
Figura 42 – Análise entre a concentração de CO ₂ e volume de tráfego por ponto	105
Figura 43 – Análise detalhada de CO ₂ e tráfego dos pontos 2,5 e 7 no decorrer do dia	106

Figura 44 – Variabilidade entre CO ₂ e volume de tráfego	107
Figura 45 – Visualização 3D das características urbanas, estrutura de cânions e localização dos pontos de coleta.....	108
Figura 46 – Matriz de correlação – Dados meteorológicos e poluentes.....	111
Figura 47 – Mapa de concentração de MP2,5 por hora de coleta	116
Figura 48 – Mapas com Interpolação IDW para MP2,5, CO ₂ , temperatura e umidade	118
Figura 49 – Mapas com representação 3D da poluição atmosférica – Variáveis MP2,5 e CO ₂	119
Figura B-1 – Comportamento real e ajustado pelo modelo do MP2,5 no decorrer do dia.....	136
Figura C-1 – Comportamento real e ajustado pelo modelo do CO ₂ no decorrer do dia.....	137
Figura D-1 – Mapas mundial de monitoramento da qualidade do ar.....	138
Figura D-2 – Exemplos de sistemas de apoio a decisão.....	139
Figura D-3 – Apresentação dos dados por meio de um dashboard.....	140

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Objetivos e Metas estabelecidos pela ONU com vinculação ao trabalho em questão	20
Tabela 2 – Relação com número de estações de monitoramento no mundo	28
Tabela 3 – Valores-guia de qualidade do ar e metas intermediárias recomendadas pela OMS29	
Tabela 4 – Índice de Qualidade do Ar baseado na Resolução CONAMA 491	31
Tabela 5 – Características, fontes e efeitos de alguns poluentes na atmosfera	36
Tabela 6 – Estudos relacionados à poluição atmosférica no Ceará	36
Tabela 7 – Concentrações de material particulado com base no tipo de transporte	40
Tabela 8 – Especificação dos componentes do <i>Sensenet</i>	67
Tabela 9 – Protocolo de medição da Rodada 1 – Dias e horários de coleta.	80
Tabela 10 – Protocolo de medição da Rodada 2 – Dias e horários de coleta.	81
Tabela 11 – Valores médios de MP2,5 em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ – <i>Sensenet</i> 2.0	87
Tabela 12 – Representação estatística de MP2,5 em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ por ponto – <i>Sensenet</i> 3.0	88
Tabela 13 – Representação estatística de CO ₂ em ppm por ponto – <i>Sensenet</i> 3.0	93
Tabela 14 – Valores médios de MP2,5, CO ₂ e Tráfego por ponto	97
Tabela 15 – Representação estatística de Temperatura e de Umidade por ponto – <i>Sensenet</i> 3.0	101
Tabela 16 – Resumo com média por ponto – <i>Sensenet</i> 3.0	109
Tabela 17 – Regressão multilinear tendo MP2,5 como variável dependente	113
Tabela 18 – Regressão multilinear tendo CO ₂ como variável dependente	114
Tabela A-1 – Detalhamento dos pontos de coleta com endereço, coordenadas e descrição...	135

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ABVE - Associação Brasileira de Veículos Elétricos
- AMC - Autarquia Municipal de Trânsito e Cidadania
- ANPET - Associação Nacional de Ensino e Pesquisa em Transportes
- ANVISA - Agência Nacional de Vigilância Sanitária
- APV - Amostradores de Pequeno Volume
- AQI - Plataforma de monitoramento da qualidade do ar (Índia)
- CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
- CILA - Congresso Ibero-Latino-Americano de Asfaltos
- CIPP - Estação Ecológica do Complexo Industrial e Portuário do Pecém
- CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente
- COVT - Compostos Orgânicos Voláteis Totais
- CPA - Camada Porosa de Atrito
- EMF - estação de monitoramento fixa
- ENCE - Etiqueta Nacional de Conservação de Energia
- EPA - *Environmental Protection Agency*
- FEEMA - Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente
- FEPAM - Fundação Estadual de Proteção Ambiental
- FFV - Veículos Flex-Fuel
- GDF - Governo do Distrito Federal
- GEE - Gases do Efeito Estufa
- HPAs - Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos
- HTP - Hidrocarbonetos Totais de Petróleo
- IA - Inteligência Artificial
- IBM - *International Business Machines Corporation*
- IDH - Índice de Desenvolvimento Humano
- IDW - *Inverse Distance Weighting*
- IEA - *International Energy Agency*
- IEMA - Instituto de Energia e Meio Ambiente
- IFCE - Instituto Federal do Estado do Ceará

INEA - Instituto Estadual do Ambiente

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

Inovar-Auto - Inovação Tecnológica e Adensamento da Cadeia Produtiva de Veículos Automotores

IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

IPECE - Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará

IQAr - Índice de Qualidade do Ar

IRI - Índice de Rugosidade Internacional

LABOMAR - Instituto de Ciências do Mar

LZE - Zonas de Baixa Emissão

MMA - Ministério do Meio Ambiente

MP - Material particulado

MP1,0 - Material particulado de tamanho até 0,1 micrônmetro

MP2,5 - Material particulado de tamanho entre 0,1 e 2,5 micrônmetros

MP10 - Material particulado de tamanho até 10 micrônmetros

ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

OECD - *Organization for Economic Co-Operation and Development*

OMS - Organização Mundial da Saúde

ONU - Organização das Nações Unidas

PBE-V - Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular

PEMS - *Portable Emissions Measurement System*

PNQA - Plano Nacional de Qualidade do Ar

PTS - Partículas Totais em Suspensão

SEEG - Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa

SEMACE - Superintendência Estadual do Meio Ambiente do Estado do Ceará

SEUMA - Secretaria de Urbanismo e Meio Ambiente

SISAM - Sistema de Informações Ambientais Integrado a Saúde

SMAC - Secretaria Municipal de Meio Ambiente da Cidade

UECE - Universidade Estadual do Ceará

UFC - Universidade Federal do Ceará

ULEZ - Zonas de Emissões Ultrabaixas

UM - Unidade de Monitoramento

VA - Veículos a álcool

VD - Veículos a diesel

VG - Veículos a gasolina

VOCs - Compostos Orgânicos Voláteis

WAQI - *World Air Quality Index*

LISTA DE SÍMBOLOS

% - Porcentagem

°C - Graus Celsius

CO - Monóxido de carbono

CO₂ - Dióxido de carbono

Cu - Cobre

Fe - Ferro

NH₃ - Amônia

NO₂ - Dióxido de nitrogênio

NO_x - Óxidos de nitrogênio

O₃ - Ozônio

Pb - Chumbo

ppm - Partes por milhão

SO₂ - Dióxido de enxofre

tCO₂e/pessoa - Toneladas de CO₂ equivalente por pessoa

Zn - Zinco

µg/m³ - Microgramas por metro cúbico

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Questões de Pesquisa	22
1.2 Objetivos.....	22
1.2.1 <i>Objetivo Geral</i>.....	22
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i>	22
1.3 Estrutura do trabalho	23
1.4 Projeto Samsung	23
1.5 Produções oriundas da dissertação	25
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1 Contexto global da poluição atmosférica	27
2.1.1 <i>Monitoramento da qualidade do ar no Brasil</i>	30
2.1.2 <i>Monitoramento da poluição atmosférica no Ceará</i>.....	33
2.2 Impacto do setor de transportes na emissão de poluentes	37
2.2.1 <i>Condição superficial ou qualitativa da via</i>	38
2.2.2 <i>Tipos de veículos e combustíveis utilizados</i>	39
2.2.3 <i>Influência do volume de tráfego</i>	42
2.3 Influência da infraestrutura urbana e das condições meteorológicas na poluição atmosférica	46
2.3.1 <i>Características do espaço urbano</i>	46
2.3.2 <i>Variáveis meteorológicas</i>.....	52
2.4 Modelos e ferramentas de análise de poluição atmosférica	53
2.4.1 <i>Modelagem e estratégias de análise de dados para previsão de poluição</i>	55
2.4.2 <i>Coleta de dados em campo</i>	58
2.4.3 <i>Uso da conectividade e inovação como contribuição para o Desenvolvimento Urbano Sustentável</i>	61
2.5 Considerações finais sobre a revisão de literatura	63
3 MATERIAIS E MÉTODOS	64
3.1 Obtenção de componentes para montagem do equipamento	66
3.2 Evolução da construção do <i>Sensenet</i>.....	67
3.3 Descrição dos equipamentos utilizados e estrutura de medição	70
3.4 Seleção e Detalhamento dos Locais de Coleta.....	74
3.5 Protocolo de coleta de dados.....	80
3.6 Tratamento e Preparação dos dados	82

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	85
4.1 Análise de poluentes atmosféricos.....	85
4.1.1 <i>Resultados obtidos na Rodada 1 – Valores de MP2,5 do Sensenet 2.0</i>	85
4.1.2 <i>Resultados obtidos na Rodada 2 – Valores de MP2,5 do Sensenet 3.0</i>	88
4.1.3 <i>Resultados obtidos na Rodada 2 – Valores de CO₂ do Sensenet 3.0.....</i>	92
4.2 Análise do volume de tráfego.....	95
4.2.1 <i>Resultados obtidos na Rodada 1 – Valores de Tráfego</i>	95
4.2.2 <i>Resultados obtidos na Rodada 2 – Valores de Tráfego</i>	97
4.3 Análise de dados meteorológicos	99
4.3.1 <i>Resultados obtidos na Rodada 1 – Dados Meteorológicos do Sensenet 2.0</i>	99
4.3.2 <i>Resultados obtidos na Rodada 2 – Dados Meteorológicos do Sensenet 3.0</i>	101
4.4 Relação entre volume de tráfego e poluentes	102
4.5 Relação entre variáveis	107
4.5.1 <i>Análises de correlação.....</i>	110
4.5.2 <i>Rregressão multilinear.....</i>	112
4.6 Mapas georreferenciados e comparação entre pontos	115
4.6.1 <i>Resultados obtidos na Rodada 1 – Mapas de calor com dados do Sensenet 2.0.....</i>	116
4.6.2 <i>Resultados obtidos na Rodada 2 – Mapas de calor com dados do Sensenet 3.0.....</i>	117
5 CONCLUSÕES.....	120
5.1 Sugestões para trabalhos futuros	121
REFERÊNCIAS	123
APÊNDICE A – DETALHAMENTO DOS PONTOS DE COLETA	137
APÊNDICE B – RESULTADOS DO MODELO 6 PARA MP2,5	138
APÊNDICE C – RESULTADOS DO MODELO 2 PARA CO₂.....	139
APÊNDICE D – PROPOSTAS PARA GESTORES PÚBLICOS	140

1 INTRODUÇÃO

Os efeitos da poluição atmosférica no meio ambiente têm recebido grande atenção e sido alvo de intensas negociações entre diversas nações do mundo. Isso têm resultado em acordos que estabelecem limites máximos para a emissão de Gases do Efeito Estufa (GEE), tornando-se este um dos principais temas relacionados às mudanças climáticas globais (Organização Mundial da Saúde – OMS, 2021a).

As consequências da poluição abrangem o aumento da temperatura, a ocorrência de chuvas com precipitação acima das médias históricas, a escassez de recursos hídricos e problemas de saúde, como doenças respiratórias e cardíacas, que têm um impacto negativo significativo na qualidade de vida humana (Jaworski, Mądzie e Lejda, 2019; IPECE, 2021; Li *et al.*, 2022).

De acordo com o relatório do Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG), elaborado por Potenza *et al.* (2021), as emissões de GEE no Brasil são provenientes da agropecuária, da geração de eletricidade, bem como de processos industriais, uso do solo e dos meios de transportes, estando estes últimos também associados aos ambientes urbanos.

Um estudo conduzido pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) em 2011 estimou que o setor de transportes é responsável por aproximadamente 20% das emissões globais de dióxido de carbono (CO₂), além de outros poluentes prejudiciais ao meio ambiente e à saúde (Carvalho, 2011). De acordo com o boletim do Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará (IPECE, 2021), o estado do Ceará ocupa a 19^a posição entre os estados brasileiros (incluindo os 26 estados e o Distrito Federal) com maior produção bruta de GEE, sobretudo nos grandes centros urbanos.

Em ambientes urbanos a geração de poluentes tem o tráfego de veículos como uma das principais fontes. No entanto, outros fatores são relevantes para compreender como a poluição se comporta no ambiente, entre eles têm-se as condições meteorológicas e climáticas (ambiente úmido ou seco, velocidade e direção dos ventos, variações de temperatura e umidade) e a geometria e características da infraestrutura urbana (altura das edificações, classificação e dimensão das vias, áreas pavimentadas e impermeabilizadas).

A concentração da poluição ou o tipo de poluente também está associada a ambientes com altas temperaturas, baixa umidade e pouca ventilação. Em geral, essas características climáticas têm relação com o ambiente construído. Jardim (2011) afirma em sua revisão, e comprova em seus resultados, que elevadas temperaturas reduzem a pressão

atmosférica e causam concentração de material particulado e de massas úmidas, cenário intensificado quando há ausência de ventilação nesses ambientes.

Para exemplificar as variáveis mencionadas, estudos que analisam a relação entre vias de alto volume de tráfego e a concentração da poluição indicaram que os índices próximos às estradas podem ultrapassar o padrão permitido, principalmente quando influenciados por cânions profundos e contínuos (Seaton *et al.*, 2022; Che *et al.*, 2023) ou mesmo pela presença de veículos pesados (Silva e Mendes, 2006).

Além disso, Wang, Bosch e Kuffer (2008), Tong *et al.* (2016) e Cetin (2019), estudaram as formas urbanas indicando que a concentração de poluentes pode ser maior quando a região apresenta edifícios mais altos, que funcionam como barreiras para o fluxo de vento, ou vias de larguras menores, que reduzem o espaço para ventilação do ambiente.

Esse perfil da cidade pode ser definido a partir da presença de cânions urbanos, obtidos basicamente pela relação entre altura das edificações e largura entre estas. Vale ressaltar que o fator cânion é de grande relevância nas trocas de energias térmicas entre as superfícies do ambiente, sendo imprescindível considerá-lo nas estratégias de desenho e planejamento urbano (Vardoulakis *et al.*, 2003; Nakata-Osaki, Souza e Rodrigues, 2016).

Esse tópico está vinculado à influência da pavimentação nas trocas e absorção de calor do ambiente urbano. Underwood *et al.* (2017) e Gulzar, Goenaga e Underwood (2021) apresentaram como foco as mudanças climáticas e o aumento da temperatura como influentes no desempenho da infraestrutura urbana e nos custos de manutenção de estradas, a partir da seleção incorreta de materiais que não foram mensurados para tais eventos climáticos. Underwood *et al.* (2017) estimaram um acréscimo de US\$ 19 bilhões ao custo com manutenção do pavimento até 2040 com o melhor cenário previsto, e US\$ 26 bilhões para o pior cenário.

Estratégias urbanas envolvendo telhados e pavimentos de cores claras e refletivos, além de áreas verdes e corpos d'água, podem mitigar o efeito das ilhas de calor, diminuir a poluição e o consumo de energia elétrica. Estudos de Akbari *et al.* (2001, 2015) comprovam a eficácia dessas abordagens na melhoria do microclima urbano. Um estudo realizado pela Universidade de São Paulo (Dornelles, 2019) indica temperaturas entre 82 e 91°C em superfícies pintadas de azul ou preto, enquanto superfícies pintadas de branco e amarelo apresentaram entre 40 e 55°C.

A estratégia de redução da temperatura dos pavimentos asfálticos tem sido chamada na literatura de “pavimento frio”. Kousis e Pisello (2023), por meio de uma revisão de literatura, alertaram para a necessidade de testes em campo e uso do pavimento como material reflexivo, permeável e com função de armazenamento de energia térmica. Dos 60 artigos revisados a

maioria indica que aplicações dessa estrutura foram realizadas em ambientes acadêmicos, com 4 trabalhos na área industrial e apenas 2 implementações por órgãos públicos.

De acordo com plataformas de notícias, a estratégia de pintar o pavimento asfáltico de branco foi aplicada em Los Angeles, Califórnia, no ano de 2017, obtendo-se redução de até 15°C na temperatura do pavimento (Díez, 2017). Em São Paulo, no Brasil, mesma ação foi aplicada em 2019, gerando uma redução de até 8°C, desta vez com a coloração azul, para evitar a maior luminosidade causada pela cor branca e possíveis transtornos visuais (Exame, 2019).

Portanto, nota-se que o tema da poluição atmosférica em grandes centros é relevante no que toca ao planejamento e a inovação de uma infraestrutura urbana, sendo mais especificamente a infraestrutura de transportes capaz de minimizar e/ou reduzir esta poluição. A urgência da situação atual requer uma compreensão abrangente da extensão da poluição atmosférica, com fundamental participação de empresas e órgãos públicos na busca por tecnologias que otimizem essa captação, seleção, análise e divulgação dos dados para os interessados.

Nesse sentido, pesquisas relacionadas à ciência de dados trazem análises detalhadas com uso da modelagem e simulação, em casos de insuficiência de dados. Entretanto, a coleta dos dados em campo desempenha um papel essencial para a compreensão do nível de poluição nas cidades, e o uso de equipamentos eficientes e de baixo custo pode contribuir para pesquisas e ações públicas nesse sentido. Existem diversas fontes de poluição, no entanto, seu comportamento é relativamente desconhecido, principalmente no meio urbano. Isso se deve à ausência de monitoramento da qualidade do ar ao longo do tempo, além de um elevado custo para obtenção e manutenção da estação de coleta, o que prejudica o direcionamento para tomada de decisão a longo prazo (Li *et al.*, 2023).

A análise da qualidade do ar na cidade de Fortaleza/CE enfrenta esses desafios devido à escassez de medidores e à falta de dados em tempo real, demandando estudos com modelos de previsão de poluentes e medição manual com equipamentos diversos (Aguiar *et al.*, 2017; Santos, 2018; Dias, 2019; Tella e Balogun, 2022).

Segundo dados do Censo Demográfico de 2022, Fortaleza é a cidade mais populosa do Nordeste e a quarta do Brasil, com 2.428.678 habitantes, que ocupam cerca de 81% da área da cidade (total de 313,8km²). A capital cearense atingiu a marca de 1.182.684 veículos na frota total, somando veículos como carros, motos e motonetas, sendo a maior do Nordeste brasileiro (IBGE, 2022); tornando o estudo dos efeitos do tráfego e da infraestrutura na poluição atmosférica muito importantes para a qualidade de vida de seus habitantes.

Pesquisas sobre sensores de baixo custo e realocáveis estão crescendo, visando a implementação inicial em pequenas áreas para validar dados e permitir futuras aplicações em larga escala (Miranda, 2015; Liu *et al.*, 2020). Como efeito comparativo, o custo para aquisição de sensores como o amostrador de partículas Casella, o amostrador de ar de grande volume Hi-Vol 3000 e a estação compacta de monitoramento Kunak, está em torno de R\$21.000,00, R\$90.000,00 e R\$160.000,00, respectivamente. Em muitos casos esses custos inviabilizam a coleta de dados de poluição, tornando assim mais relevante o desenvolvimento de sensores de baixo custo.

Assim, o objetivo desta pesquisa foi coletar dados de qualidade do ar em áreas urbanas da cidade de Fortaleza/CE por meio de um sensor de baixo custo desenvolvido no âmbito de um projeto de pesquisa em parceria com a Samsung Eletrônica da Amazônia Ltda. Buscou-se verificar a existência de relação entre a concentração de poluentes e o volume de tráfego, além de compreender a influência da infraestrutura como a presença de cânions e as áreas críticas em relação a altas temperaturas e baixas umidades.

O presente trabalho está alinhado com sete Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU, 2023), a saber: ODS (3) Saúde e bem-estar, (7) Energia limpa e acessível, (9) Indústria, inovação e infraestrutura, (11) Cidades e comunidades sustentáveis, (13) Ação contra a mudança global do clima, (15) Vida terrestre e (17) Parcerias e meios de implementação, conforme destacado na Figura 1.

Figura 1 – Objetivos de desenvolvimento sustentável – ODS



Fonte: ONU, 2023.

Para tal, algumas metas relacionadas aos ODS que podem ter relação com o trabalho realizado são apresentadas na Tabela 1, e serão comentadas ao final da pesquisa para compreender o seu cumprimento.

Tabela 1 – Objetivos e Metas estabelecidos pela ONU com vinculação ao trabalho em questão

ODS	Metas relacionadas ao trabalho
(3) Saúde e bem-estar - Garantir o acesso à saúde de qualidade e promover o bem-estar para todos, em todas as idades	<p>3.4) Até 2030, reduzir em um terço a mortalidade prematura por doenças não transmissíveis via prevenção e tratamento, e promover a saúde mental e o bem-estar</p> <p>3.9) Até 2030, reduzir substancialmente o número de mortes e doenças por produtos químicos perigosos, contaminação e poluição do ar e água do solo</p>
(7) Energia limpa e acessível - Garantir o acesso a fontes de energia fiáveis, sustentáveis e modernas para todos	<p>7.3) Até 2030, dobrar a taxa global de melhoria da eficiência energética</p> <p>7.a) Até 2030, reforçar a cooperação internacional para facilitar o acesso a pesquisa e tecnologias de energia limpa, incluindo energias renováveis, eficiência energética e tecnologias de combustíveis fósseis avançadas e mais limpas, e promover o investimento em infraestrutura de energia e em tecnologias de energia limpa</p>
(9) Indústria, inovação e infraestrutura - Construir infraestruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável e fomentar a inovação	<p>9.1) Desenvolver infraestrutura de qualidade, confiável, sustentável e resiliente, incluindo infraestrutura regional e transfronteiriça, para apoiar o desenvolvimento econômico e o bem-estar humano, com foco no acesso equitativo e a preços acessíveis para todos</p> <p>9.4) Até 2030, modernizar a infraestrutura e reabilitar as indústrias para torná-las sustentáveis, com eficiência aumentada no uso de recursos e maior adoção de tecnologias e processos industriais limpos e ambientalmente corretos; com todos os países atuando de acordo com suas respectivas capacidades</p> <p>9.5) Fortalecer a pesquisa científica, melhorar as capacidades tecnológicas de setores industriais em todos os países, particularmente os países em desenvolvimento, inclusive, até 2030, incentivando a inovação e aumentando substancialmente o número de trabalhadores de pesquisa e desenvolvimento por milhão de pessoas e os gastos público e privado em pesquisa e desenvolvimento</p> <p>9.b) Apoiar o desenvolvimento tecnológico, a pesquisa e a inovação nacionais nos países em desenvolvimento, inclusive garantindo um ambiente político propício para, entre outras coisas, a diversificação industrial e a agregação de valor às commodities</p>
(11) Cidades e comunidades sustentáveis - Tornar as cidades e comunidades mais inclusivas, seguras, resilientes e sustentáveis	<p>11.6 Até 2030, reduzir o impacto ambiental negativo per capita das cidades, inclusive prestando especial atenção à qualidade do ar, gestão de resíduos municipais e outros</p>

	<p>11.7 Até 2030, proporcionar o acesso universal a espaços públicos seguros, inclusivos, acessíveis e verdes, particularmente para as mulheres e crianças, pessoas idosas e pessoas com deficiência</p> <p>11.a) Apoiar relações econômicas, sociais e ambientais positivas entre áreas urbanas, periurbanas e rurais, reforçando o planejamento nacional e regional de desenvolvimento</p> <p>11.b) Até 2020, aumentar substancialmente o número de cidades e assentamentos humanos adotando e implementando políticas e planos integrados para a inclusão, a eficiência dos recursos, mitigação e adaptação às mudanças climáticas, a resiliência a desastres; e desenvolver e implementar, de acordo com o Marco de Sendai para a Redução do Risco de Desastres 2015-2030, o gerenciamento holístico do risco de desastres em todos os níveis</p>
(13) Ação contra a mudança global do clima - Adotar medidas urgentes para combater as alterações climáticas e os seus impactos	<p>13.2) Integrar medidas da mudança do clima nas políticas, estratégias e planejamentos nacionais</p> <p>13.3) Melhorar a educação, aumentar a conscientização e a capacidade humana e institucional sobre mitigação, adaptação, redução de impacto e alerta precoce da mudança do clima</p> <p>13.b) Promover mecanismos para a criação de capacidades para o planejamento relacionado à mudança do clima e à gestão eficaz, nos países menos desenvolvidos, inclusive com foco em mulheres, jovens, comunidades locais e marginalizadas</p>
(15) Vida terrestre - Proteger, restaurar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres, gerir de forma sustentável as florestas, combater a desertificação, travar e reverter a degradação dos solos e travar a perda da biodiversidade	<p>15.9) Até 2020, integrar os valores dos ecossistemas e da biodiversidade ao planejamento nacional e local, nos processos de desenvolvimento, nas estratégias de redução da pobreza e nos sistemas de contas</p> <p>15.a) Mobilizar e aumentar significativamente, a partir de todas as fontes, os recursos financeiros para a conservação e o uso sustentável da biodiversidade e dos ecossistemas</p> <p>15.b) Mobilizar recursos significativos de todas as fontes e em todos os níveis para financiar o manejo florestal sustentável e proporcionar incentivos adequados aos países em desenvolvimento para promover o manejo florestal sustentável, inclusive para a conservação e o reflorestamento</p>
(17) Parcerias e meios de implementação - Reforçar os meios de implementação e revitalizar a parceria global para o desenvolvimento sustentável	<p>17.7) Promover o desenvolvimento, a transferência, a disseminação e a difusão de tecnologias ambientalmente corretas para os países em desenvolvimento, em condições favoráveis, inclusive em condições concessionais e preferenciais, conforme mutuamente acordado</p> <p>17.14) Aumentar a coerência das políticas para o desenvolvimento sustentável</p> <p>17.15) Respeitar o espaço político e a liderança de cada país para estabelecer e implementar políticas para a erradicação da pobreza e o desenvolvimento sustentável</p> <p>17.17) Incentivar e promover parcerias públicas, público-privadas e com a sociedade civil eficazes, a partir da experiência das estratégias de mobilização de recursos dessas parcerias</p>

Fonte: Adaptado de ONU (2023).

1.1 Questões de Pesquisa

Diante das considerações anteriormente colocadas nesta Introdução, as seguintes questões de pesquisa foram formuladas:

- i) O desenvolvimento de um equipamento de baixo custo pode ser uma alternativa viável para coleta de dados de poluentes na cidade de Fortaleza?
- ii) Qual a estratégia mais adequada para coleta de dados de poluição a fim de compreender sua relação com o ambiente urbano e o tráfego local?
- iii) Existe relação entre a concentração dos poluentes e o volume de tráfego na área de estudo escolhida?
- iv) Existe relação entre as áreas mais afetadas pela poluição atmosférica e aquelas com maior índice de cânions urbanos?
- v) A área de estudo analisada apresenta níveis de poluição compatíveis com os valores estabelecidos pelas normas nacionais?

1.2 Objetivos

1.2.1 *Objetivo Geral*

O objetivo geral deste trabalho foi entender a variação da concentração de poluentes e seus interferentes, sobretudo associados à infraestrutura e ao transporte urbano, identificando a melhor estratégia de coleta de dados em determinadas regiões de Fortaleza/CE, a partir da utilização de um equipamento de baixo custo construído para a coleta dos dados.

1.2.2 *Objetivos Específicos*

- a) Contribuir com o desenvolvimento de um equipamento de baixo custo para a medição de poluição atmosférica e de variáveis meteorológicas em ambiente urbano;
- b) Determinar uma estratégia de coleta de dados eficiente para medição das variáveis em ambiente urbano com o sensor construído;
- c) Investigar o efeito dos cânions urbanos (infraestrutura) e do tráfego (transportes) na poluição atmosférica da cidade de Fortaleza;
- d) Verificar se os níveis de poluição da área de estudo estão de acordo com os limites estabelecidos por órgãos nacionais.

1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho está dividido em 5 capítulos. O primeiro contém a presente introdução, que traz uma contextualização da temática estudada, as questões de pesquisa a serem resolvidas, os objetivos com base na metodologia proposta, a estrutura do trabalho e, por fim, as produções científicas oriundas desta dissertação de mestrado.

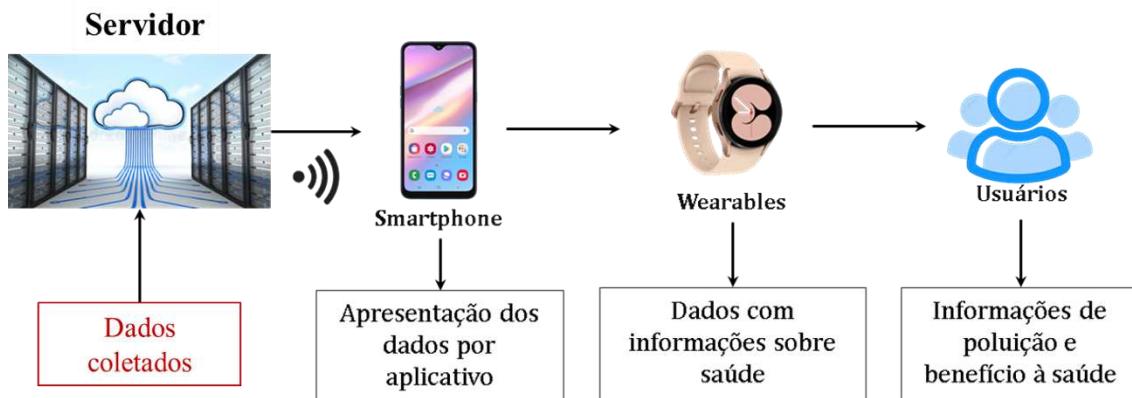
O capítulo 2, de revisão bibliográfica, buscou uma visão global do tema, enfatizando os principais estudos realizados no Brasil e em Fortaleza/Ceará. Buscou-se identificar as estratégias de coleta de dados, os tipos de ambientes estudados e as variáveis relevantes para compreensão dos fenômenos. O capítulo 3 trata dos materiais e métodos utilizados na pesquisa, descrevendo o equipamento para coleta de dados, as estratégias de medições em campo e a área de estudo.

O capítulo 4 contém os resultados e as discussões das análises de cada poluente e das correlações entre eles, finalizando com um tópico voltado para a elaboração e apresentação dos resultados por meio de mapa interativos, para visualizar o cenário de poluição da área de estudo no período analisado. Por fim, o capítulo 5 contém as principais conclusões e as sugestões de trabalhos futuros com base nos resultados obtidos nesta dissertação. Após as referências utilizadas na pesquisa o documento é finalizado com os apêndices, dando-se destaque para o Apêndice D que trata de propostas a serem estudadas/implementadas por gestores públicos.

1.4 Projeto Samsung

O Projeto AI4WELLNESS Samsung, uma cooperação entre a Universidade Federal do Ceará e a Samsung, fornece o financiamento para esta pesquisa. Trata-se de um aspecto de uma das linhas do projeto, que traz ainda uma análise da área da saúde, sobretudo por meio do uso dos vestíveis da empresa (*smartphones* e *smartwatches*), com vistas a melhorar a qualidade de vida do usuário. O principal objetivo do projeto é analisar a qualidade dos dados fornecidos por dispositivos vestíveis, combinados a dados secundários, para gerenciar riscos e predizer desfechos de saúde cardiovascular, respiratória e musculoesquelética, ou seja, alertar os usuários sobre crises de determinada doença antes de sua ocorrência, seguindo o protocolo resumido na Figura 2.

Figura 2 – Processo de coleta de dados, transporte e visualização dos dados pelos usuários



Fonte: Elaborada pela autora.

No projeto em questão, uma equipe multidisciplinar de médicos, fisioterapeutas, educadores físicos, advogados e engenheiros das mais diversas áreas, trabalham para desenvolver estratégias para coleta de dados de saúde de pacientes, visando a proteção de informações pessoais e o embasamento para melhorar o desempenho dos vestíveis.

O projeto é dividido em 4 linhas de pesquisa, sendo a linha a qual esta dissertação está vinculada a responsável pela construção do equipamento para coleta de dados de qualidade do ar e de características meteorológicas, medições em campo, escolha de pacientes para os testes iniciais com as características necessárias para tal, estudo de exacerbações asmáticas e cardíacas, entre outras atividades. Pretende-se obter informações de poluentes e variáveis climáticas, a partir da definição de metodologia de coleta em ambiente externo, trabalho em campo, análise dos dados e caracterização da área de estudo.

De forma a enfatizar a influência da poluição na saúde humana, alguns trabalhos são suscintamente citados a seguir, para, principalmente, demonstrar a relevância dos estudos voltados para a infraestrutura de transportes neste tópico:

- O documento produzido por Sant'anna *et al.* (2021) prioriza a interface da saúde enquanto trata o tema de qualidade do ar no Brasil. O estudo enfatiza o setor de transportes como o principal emissor local de poluentes, além de indicar a necessidade de estratégias de planejamento territorial e logístico para reduzir a dependência, especialmente dos veículos individuais, bem como investimento na tecnologia veicular, como exemplo o uso de carros elétricos e produtos com emissão zero de carbono (Bonsu, 2020; Leal e Consoni, 2021).
- Leite, Debone e Miraglia (2020) estudaram o efeito da emissão de GEE em São Paulo e os índices de mortalidade por doenças cardiovasculares e respiratórias, demonstrando que o setor de transportes é o principal responsável pela liberação de dióxido de carbono (CO₂) e

o aumento da concentração do poluente obteve grande correlação com os casos de mortalidade pelas doenças estudadas. Além disso, a poluição urbana pode estar relacionada à liberação de MP2,5 (material particulado de até 2,5 micrômetro), como causa de infartos e outras morbidades no coração (Oliveira-Fonoff *et al.*, 2017)

Essas referências enfatizam a importância da redução de pequenas quantidades de poluentes para se obter resultados em larga escala e o quanto a infraestrutura de transportes pode estar relacionada à problemas de saúde por conta da poluição, havendo, portanto, potencial para ajustes e construções de uma infraestrutura mais inteligente, que venha a mitigar o problema da poluição. Isso envolveria aplicações de melhorias em bairros, empresas, centros urbanos e cidades, com ações iniciadas pelas autoridades, empresas e comunidades.

1.5 Produções oriundas da dissertação

A partir desta dissertação já foram publicados e apresentados dois artigos em congressos nacional e internacional:

- “A avaliação da poluição atmosférica proveniente do tráfego de veículos no centro urbano de Fortaleza/CE”, apresentado no 37º Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes (ANPET 2023-Santos-Brasil);
- “Interconexões entre pavimentação, infraestrutura viária e emissões de CO₂: uma análise multidimensional”, apresentado no XXII Congresso Ibero-Latino-Americano de Asfaltos (CILA 2024-Granada-Espanha);

Outros três artigos foram submetidos a periódicos internacionais:

- “*Air Pollution Dynamics in Fortaleza, Brazil: Exploring the Interplay of Traffic and High-Rise Development*”, submetido ao periódico “*Urban Climate*”.
- “*A comprehensive review of variables used in air quality prediction models: a systematic analysis*”, submetido ao periódico “*Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*”;
- “*SENTINEL: Enhancing Trust and Transparency in IoT Networks through Data Collection Graph-based and Blockchain*”, submetido ao periódico *Institute of Electrical and Electronics Engineers – “IEEE Security & Privacy”*.

Cite-se, por fim, um terceiro artigo submetido à periódico que se considera paralelo à pesquisa, todavia com relação ao tema de sustentabilidade na infraestrutura:

- “*Integrating smart city technologies for sustainable pavement infrastructure*”, aceito para publicação no periódico “*Canadian Journal*”.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta os principais assuntos relacionados à qualidade do ar no meio urbano. O embasamento da pesquisa envolveu (i) o contexto global da poluição atmosférica, enfatizando contudo o monitoramento da qualidade do ar no Brasil e no Ceará, bem como as metodologias usadas para a obtenção dos dados; (ii) o impacto do setor de transportes na emissão de poluentes, com foco no fluxo de veículos e na estrutura do pavimento; (iii) a influência da estrutura urbana e das condições meteorológicas na poluição atmosférica, para compreensão das variáveis urbanas que mais afetam a concentração e a dissipação de poluentes; e (iv) os modelos e as ferramentas de análise da poluição atmosférica, na busca por estratégias de previsão de poluentes e melhor compreensão sobre a coleta de dados para investigar a correlação com os aspectos urbanos. Esses tópicos aprofundados podem auxiliar a elaboração de medidas governamentais com interesse na qualidade de vida e na preservação do meio ambiente.

2.1 Contexto global da poluição atmosférica

Acordos internacionais têm sido sancionados entre países em busca de estabelecer limites de emissão de GEE e mitigar seus efeitos para gerações futuras. Por este motivo, a Organização Mundial da Saúde (OMS, 2021a) desenvolveu diretrizes globais com dados de qualidade do ar, efeitos na saúde pública e orientações para mudanças legislativas nos Estados-Membros, entre eles o Brasil.

Atualmente, uma equipe de Pequim, na China, é responsável pelo projeto *World Air Quality Index* (WAQI, 2022) que fornece informações transparentes sobre a qualidade do ar para 130 países, com mais de 30.000 estações em 2.000 grandes cidades. Os dados são apresentados em formato de mapas, gráficos e *dashboards* com possibilidade de detalhar a pesquisa por país e estados, indicando ainda a localização da estação de monitoramento ativa no local.

Além do referido projeto, outras empresas fornecem informações relacionadas à qualidade do ar com compartilhamento de dados. A plataforma chamada AQI (2022) foi desenvolvida na Índia, pela *Purelogic Labs India Pvt Ltd*, empresa que busca educar as pessoas com soluções para contribuir com a redução do impacto da poluição. O site indica a conexão com 80 estações de monitoramento no Brasil e um IQAr bom de forma geral. Outra plataforma denominada IQAir (2023) indica que o Brasil possui 136 estações operadas por 61 colaboradores, entre cidadãos, organizações e governos, para monitoramento dos dados.

As duas plataformas oferecem mapas iterativos com informações em tempo real que podem ser atualizadas com frequência; disponibilizam ainda opções de sensores para medição de poluentes específicos e aplicativos para monitoramento em tempo real via *smartphone*.

Para obtenção de uma escala de evolução nas medições da qualidade do ar entre o Brasil e outros países, foi identificada a quantidade de estações por continente, em seguida a comparação com alguns países mais desenvolvidos nesta questão. De acordo com as informações disponíveis na plataforma *World's Air Pollution: Real-time Air Quality Index* (WAQI, 2024), a quantidade de estações conectadas por continente e a região com maior IQAr estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Relação com número de estações de monitoramento no mundo

Continente	Nº de estações conectadas	Região com maior média de poluição	IQAr	Classificação [EPA, 2016]
Ásia	125	Bayankhoshuu, Mongólia	801	Perigoso
Europa	160	Tuzla, Bósnia e Herzegovina	349	Perigoso
América do Norte	146	Las Pintas, México	207	Muito prejudicial
América do Sul	138	Coquimbo, Chile	179	Pouco saudável
África	96	Rosslyn, África do Sul	289	Muito prejudicial
Austrália, Oceania	168	Prospect, Austrália	94	Moderado

Fonte: Adaptada da plataforma *World's Air Pollution*, 2024.

Percebe-se que os índices são identificados de acordo com a classificação da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos – EPA, atualizada em 2016. Seus índices são semelhantes aqueles utilizados no Brasil (apresentados no tópico 2.1.1 a seguir), mas apresentam intervalos com valores menores para classificar o IQAr.

De acordo com as informações do *World Air Quality Index* (WAQI, 2024), regiões da Índia, Paquistão, Sérvia, Bangladesh e China, estavam nos 5 primeiros lugares do *ranking* com maiores índices de poluição atmosférica do mundo e IQAr igual a 448, 268, 243, 240 e 191, respectivamente. No Brasil, os maiores índices foram registrados em São Paulo, com IQAr de 46, considerado regular e tolerável quanto à saúde humana. Os demais estados do país com medições atualizadas foram Manaus, Curitiba e Porto Alegre, todos com boa qualidade do ar.

A poluição do ar pode ser alterada por fontes naturais, que surgem normalmente na natureza, e artificiais, criadas pela ação dos seres humanos. Os principais contribuintes para seu aumento são processos de combustão, geração de energia, funcionamento de indústrias, queima de biomassa e agricultura. A OMS (2022) estima que 7 milhões de mortes ocorrem por ano em decorrência da poluição atmosférica, e 99% da população mundial respira ar insalubre.

Estudos indicam que a poluição urbana pode estar relacionada à liberação de MP2,5, material particulado presente em aerossóis com tamanho de 0,1 até 2,5 micrômetro (μm), como causa de infartos e outras doenças cardíacas. Fontes de emissões de MP2,5 causaram o maior impacto na mortalidade global em 2010, a partir de emissões industriais, queima de biomassa e tráfego de veículos, no qual, este último foi responsável por aproximadamente 5% dos casos (Lelieveld *et al.*, 2015; Oliveira-Fonoff *et al.*, 2017).

Como parâmetro, na Tabela 3 são apresentados os padrões de emissões estabelecidos pela OMS (2021a), de acordo com as Diretrizes Globais de Qualidade do Ar, que divide o valor máximo permitido em períodos anuais e de 24 horas e apresenta metas intermediárias a fim de nortear os países até atingirem os valores-guia. Os poluentes apresentados pela OMS são os materiais particulados (MP2,5 e MP10), o dióxido de enxofre (SO_2), o dióxido de nitrogênio (NO_2), o monóxido de carbono (CO) e o ozônio (O_3). O MP10 é assim chamado por ter diâmetro aerodinâmico médio maior que $2,5\mu\text{m}$ e menor que $10\mu\text{m}$.

Tabela 3 – Valores-guia de qualidade do ar e metas intermediárias recomendadas pela OMS

Poluente	Período de referência	Período de referência				Valores-guia
		1	2	3	4	
MP2,5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Anual	35	25	15	10	5
	24 horas	75	50	37,5	25	15
MP10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Anual	70	50	30	20	15
	24 horas	150	100	75	50	45
O_3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Alta temporada	100	70	-	-	60
	8 horas	160	120	-	-	100
NO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Anual	40	30	20	-	10
	24 horas	120	50	-	-	25
SO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24 horas	125	50	-	-	40
CO (mg/m^3)	24 horas	7	-	-	-	4

Fonte: Adaptada de OMS, 2021a.

A OMS mencionou que um recorde de 6.000 cidades em 117 países realizavam o monitoramento da qualidade do ar até 2022. Ainda que existam informações sobre os índices de poluição, os residentes destes lugares ainda sofrem com o ar insalubre afetado principalmente por material particulado fino e dióxido de nitrogênio. Essas evidências incentivaram OMS (2022) a destacar a importância de reduzir o uso de combustíveis fósseis e aplicar medidas tangíveis, mesmo que iniciadas em bairros, comunidades e empresas, para diminuir a poluição emitida e gerar resultados consideráveis em larga escala.

2.1.1 Monitoramento da qualidade do ar no Brasil

Os poluentes mais comuns apresentados pela OMS são também estabelecidos pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA, na Resolução 491 (CONAMA, 2018). A criação do Índice de Qualidade do Ar (IQAr), de acordo com os padrões estabelecidos pelo CONAMA, visa facilitar a divulgação dos dados de monitoramento da qualidade do ar de curto prazo para a sociedade a partir de um valor calculado adimensional (como uma nota para a qualidade do ar com uma cor que indica sua severidade) frente às concentrações em microgramas por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), que varia de 0 a 400 (o intervalo de cada categoria está apresentado abaixo na Tabela 4). O cálculo é realizado a partir da Equação 1 apresentada no Guia técnico para monitoramento e avaliação da qualidade do ar, disponibilizado pelo Ministério do Meio Ambiente – MMA (Brasil, 2019).

$$IQAr = I_{ini} + \frac{I_{fin} - I_{ini}}{C_{fin} - C_{ini}} \times (C - C_{ini}) \quad (1)$$

Onde:

$IQAr$: índice de qualidade do ar;

I_{ini} : valor do índice que corresponde à concentração inicial da faixa;

I_{fin} : valor do índice que corresponde à concentração final da faixa;

C_{ini} : concentração inicial da faixa em que se localiza a concentração medida ($\mu\text{g}/\text{m}^3$);

C_{fin} : concentração final da faixa em que se localiza a concentração medida ($\mu\text{g}/\text{m}^3$);

C : concentração medida do poluente ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Desta forma, de acordo com a resolução do CONAMA 491 (2018), a Superintendência Estadual do Meio Ambiente do Estado do Ceará - SEMACE (2018) apresenta a Tabela 4 como base para caracterizar a qualidade do ar no meio externo, classificá-lo a partir do Índice de Qualidade do Ar, variando a qualidade de boa à crítica, e identificar seus riscos à saúde.

Tabela 4 – Índice de Qualidade do Ar baseado na Resolução CONAMA 491

Qualidade	IQAr	Níveis de cautela sobre a saúde	MP2,5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	MP10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	SO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	NO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	CO (ppm)	O ₃ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Boa	0-40	Seguro à saúde	0-25	0-50	0-20	0-200	0-9,0	0-100
Regular	41-100	Tolerável	26-60	51-120	21-125	201-260	****	101-140
Inadequada	101-199	Insalubre para grupos sensíveis	61-124	121-249	126-799	261-1129	9,1-14,9	141-199
Ruim	200-299	Muito insalubre (Nível de Atenção)	125-209	250-419	800-1599	1130-2259	15,0-29,9	200-399
Péssima	300-399	Perigoso (Nível de Alerta)	210-249	420-499	1600-2099	2260-2999	30,0-39,9	400-599
Crítica	400 ou maior	Muito Perigoso (Nível de Emergência)	≥ 250	≥ 500	≥ 2100	≥ 3000	≥ 40	≥ 600

Fonte: Adaptada de SEMACE, 2018.

Essa classificação é semelhante para a maioria dos estados no país, como exemplo, a Fundação Estadual de Proteção Ambiental (FEPAM, 2022), do Rio Grande do Sul, e o Governo do Distrito Federal – GDF (Brasília Ambiental, 2019) por meio da Secretaria de Saúde, que seguem os mesmos padrões indicados na Tabela 4. Por sua vez, a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2013) resume as classificações “Regular” e “Inadequada” em “Moderada” e seus intervalos são diferentes, com menores intervalos e o valor máximo de IQAr acima de 200. No entanto, os mesmos poluentes são apresentados e indicados por tempo de exposição, como também é especificado na Resolução.

De acordo com Vormittag *et al.* (2021), o Brasil possuía em 2021 aproximadamente 371 estações de monitoramento da qualidade do ar ativas, que representam 86,3% das estações existentes no país. A maioria do monitoramento é realizado nas regiões Sudeste (298), Norte (31) e Sul (29), e as regiões Centro-Oeste e Nordeste representam juntas 3,5% das medições, com 13 estações. Este trabalho usou entrevistas para buscar as informações, portanto, não se tem dados referentes à 2024 sobre as estações ativas e financiadas pelos estados.

Conforme dados da WAQI (2024), o Brasil conta com 118 estações em funcionamento com atualizações em tempo real neste ano. No entanto, esta plataforma fornece dados de Agências de Proteção Ambiental de todo o mundo, mas nem todas as agências existentes disponibilizam seus dados na plataforma. Neste caso, as estações citadas podem incluir equipamentos pessoais e individuais, instalados em residências, instituições de pesquisa ou estações de grande porte mantidas por órgãos estaduais.

A plataforma fornece uma longa lista de EPAs referenciadas pelo WAQI, na qual está inserida a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), única que se refere aos estados brasileiros. Isso indica que as demais medições apresentadas no país devem se tratar de equipamentos individuais instalados em residências ou instituições educacionais.

Acrescente-se que o Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA, 2022) fornece dados de monitoramento da qualidade do ar realizados por órgãos estaduais em 11 estados do Brasil, com intervalos diferentes de coleta para cada estado entre 2015 e 2022.

A preocupação com a gestão da qualidade do ar no Brasil foi incentivo para a criação da Política Nacional de Qualidade do Ar, Projeto de Lei nº3027, de 2022 (Brasil, 2024), com o objetivo de proteger o meio ambiente e a saúde humana dos efeitos da contaminação atmosférica.

A exploração do estado da arte da relação entre poluentes e as formas urbanas, realizada por Maia, Netto e Costa (2019), constatou que no Rio de Janeiro existem três órgãos públicos responsáveis pelo monitoramento meteorológico e aferição de poluentes, o Instituto Estadual do Ambiente (INEA), a Secretaria Municipal de Meio Ambiente da Cidade (SMAC) e o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), além do inventário de emissões confeccionado em 2004 pela Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente (FEEMA).

O estudo não cita a quantidade de medidores, mas aborda que as indústrias são as principais fontes de poluentes, sendo responsáveis por 88% das emissões de SO₂, enquanto os automóveis emitem 67% de NOx (óxidos de nitrogênio) e 98% de CO, além de citar a carência de estudos na área para a cidade do Rio de Janeiro.

Um estudo no estado de São Paulo por Vieira *et al.* (2023), considerou medições no inverno entre 2019 e 2020, período que englobou o auge da pandemia de Covid-19 e apresentou reduções drásticas de emissões de poluentes devido ao isolamento social. Com foco no MP2,5, foi identificado que no inverno a poluição se agrava devido às queimadas locais e distantes, elevando os níveis de partículas nocivas à saúde. A concentração média de MP2,5 foi de 18,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, e no período estudado excederam em 75 vezes o padrão de qualidade do ar da Organização Mundial de Saúde (15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ por períodos de 24 horas).

No caso do CO₂, como é percebido pela sua ausência nas tabelas anteriormente apresentadas, o gás não é considerado um poluente pelas normas brasileiras, no entanto, uma série de pesquisas é conduzida para investigar sua distribuição no meio e os impactos na saúde humana. O maior problema está na emissão exagerada do gás, que o torna um poluente altamente agressivo.

O CO₂ é um grande responsável pelo agravamento do efeito estufa. Sua emissão em larga escala influencia no equilíbrio do microclima no ambiente urbano, afetando negativamente o meio ambiente e a saúde da população (Gomes, Silva e Silva, 2019). Em 2020, o Brasil emitiu 1,47 milhões de toneladas de CO₂ (em tCO₂e/pessoa) no setor de transportes, correspondendo a 3,1% das emissões globais desse gás e tornando-se o 7º maior emissor do mundo, estando acima de nações como China (0,64 tCO₂e/pessoa), Indonésia (0,46 tCO₂e/pessoa) e Índia (0,23 tCO₂e/pessoa), conforme apresentado pela plataforma *Clima Watch Data*, com dados de 2023 (CLIMATEWATCH, 2023).

A Agência Nacional de Vigilância Sanitária - ANVISA define o limite máximo de exposição ao CO₂ em ambientes fechados em 1000 partes por milhão (ppm), servindo esse parâmetro como um guia para a necessidade de ventilação adequada do local (ANVISA, 2003). Portanto, esse valor é considerado na literatura para estudar as emissões também em ambientes externos.

Atualmente, existe uma discussão sobre a necessidade de reduzir os limites de emissão permitidos em todo o mundo, para forçar o controle dos poluentes na atmosfera. Segundo Beringui *et al.* (2021), a legislação brasileira foi atualizada durante três décadas para atender as recomendações da OMS. Entretanto, o autor afirma que alterações dos padrões de qualidade do ar não garantem que os poluentes serão reduzidos, porque é necessário que ocorra monitoramento atmosférico para verificar se as concentrações encontradas no ar se adequam à legislação.

2.1.2 Monitoramento da poluição atmosférica no Ceará

No Ceará, atualmente existem medições de qualidade do ar realizadas com uso de estação de monitoramento fixa e móvel. A estação fixa realiza medições de uma única localidade, limitando o entendimento da relação dos dados com as características urbanas, principalmente a nível de cidade. A estação móvel disponível no estado é deslocada para outras áreas após um determinado período de medição, permitindo obter informações da concentração do poluente em função das variáveis urbanas.

Desde abril de 2023 a Prefeitura de Fortaleza iniciou um projeto para criação de uma rede de monitoramento de qualidade do ar, com instalação de 30 monitores de baixo custo (Fortaleza, 2023a). O projeto é coordenado pela Fundação de Ciência, Tecnologia e Inovação (Citinova) e pela Secretaria de Urbanismo e Meio Ambiente (SEUMA), e desenvolvido em parceria com a Universidade Federal do Ceará (UFC). Os dados obtidos serão armazenados e analisados em uma rede criada e poderão ser disponibilizados também à comunidade.

As medições realizadas pela SEMACE (2020), como exemplo de monitoramento com estação fixa, ocorreram com duas estações de coleta, durante diferentes horários do dia entre os anos 2016 e 2020, como mostrado na Figura 3(a). Os pontos de coleta eram os seguintes: (i) Estação Ecológica do Complexo Industrial e Portuário do Pecém – CIPP e (ii) Unidade de Monitoramento (UM) de Alto Alegre, localizados respectivamente no município de São Gonçalo do Amarante e próximo à Maracanaú. Atualmente, a localização da UM foi atualizada, locada na Reitoria da UFC, no bairro Benfica, em Fortaleza, como apresentado na Figura 3(b). O monitoramento também avaliava os efeitos meteorológicos, como velocidade e direção dos ventos, pressão atmosférica e temperatura.

Figura 3 – Monitoramento da qualidade do ar - SEMACE



(a) Estação de monitoramento fixa

(b) Localização das estações de monitoramento da SEMACE

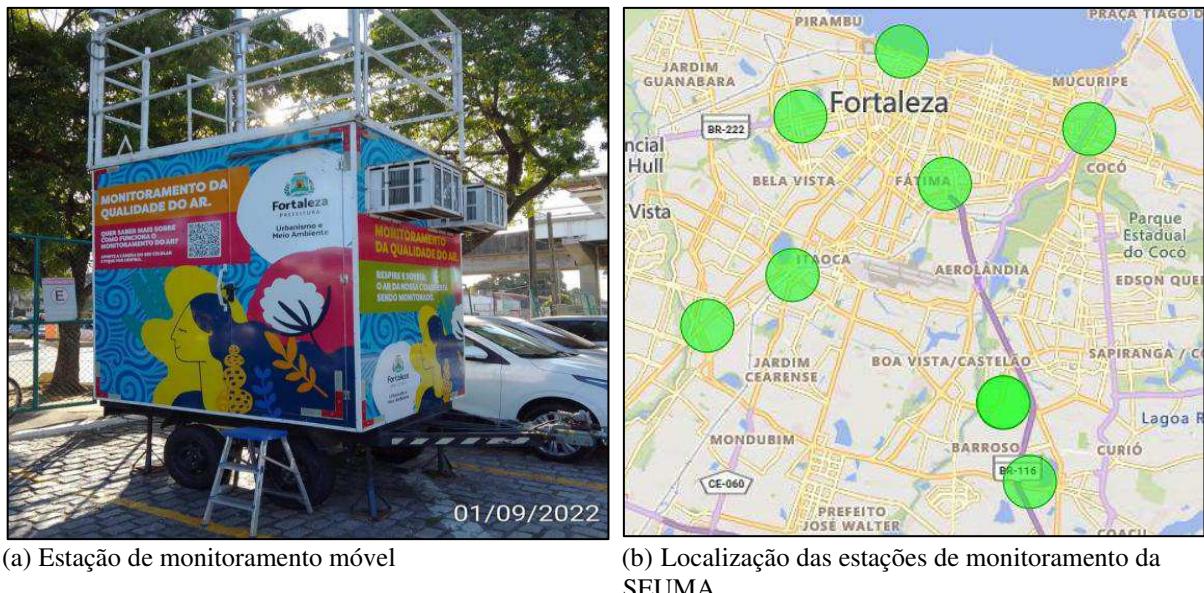
Fonte: Adaptada de SEMACE, 2024.

Os dados disponíveis da estação CIPP são fornecidos pela Plataforma de Qualidade do Ar do IEMA (2022), com informações até 2020. As informações de 2019 apresentam medições na UM Parque Alto Alegre, na UM UFC Reitoria (que, anteriormente, não era representada no mapa) e na CIPP, com informações adicionais sobre uma UM no Pecém (também não representada no mapa).

Em 2020, em estudo realizado por Lima *et al.* (2020), a estação de monitoramento fixa (EMF) próxima a Maracanaú, região metropolitana de Fortaleza, apresentou valores satisfatórios para poluentes como partículas totais em suspensão (PTS), NO₂, SO₂ e O₃. Para MP10, a média foi de 42,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, com 16,7% das amostras com valores acima daqueles recomendados pela OMS (entre 0 e 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), no caso, foram 5 coletas com média de 74,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

A estação móvel mostrada na Figura 4(a) é monitorada pela SEUMA (Fortaleza, 2023b) e disponibiliza dados coletados em Fortaleza por uma única estação. A medição foi realizada com o deslocamento da unidade para outras regiões, destacadas no mapa da Figura 4(b) após um determinado período de medição, na qual, seu histórico está registrado no canal de Urbanismo e Meio Ambiente, por meio de planilhas, relatórios mensais e gráficos com concentração de poluentes e IQAr.

Figura 4 – Monitoramento realizado pela SEUMA



(a) Estação de monitoramento móvel
Fonte: Canal Urbanismo e Meio Ambiente, 2024.

(b) Localização das estações de monitoramento da SEUMA

Percebe-se que os órgãos que realizam a medição da poluição atmosférica em Fortaleza utilizam equipamentos de grande porte, com pouca possibilidade de realocação, demandando mais tempo de medição para abranger uma grande área. No entanto, essa condição, aliada à existência de diversas fontes de poluentes não é a mais ideal para compreender o comportamento da poluição no ambiente urbano (Farrell *et al.*, 2015).

Por este motivo, os autores escolhem poluentes mais relevantes para a região ou que tenham a melhor viabilidade de coleta. Geralmente, as medições em campo são realizadas em curtos períodos, com duração de semanas, e exigem uma redução da área de estudo para viabilizar a coleta.

Os poluentes comumente estudados são os que possuem os valores permitidos de emissão normatizados pelo CONAMA (Tabela 4), além do CO₂ e das partículas totais de suspensão (PTS). Informações disponibilizadas pela FEPAM (2022), pelo Sistema de

Informações Ambientais Integrado a Saúde (SISAM, 2019) e estudadas por Leite, Debone e Miraglia (2020), mostram as fontes e efeitos dos principais poluentes, conforme Tabela 5.

Tabela 5 – Características, fontes e efeitos de alguns poluentes na atmosfera

Poluente	Característica	Fontes Antropogênicas	Efeitos na saúde
Partículas Totais de Suspensão (PTS)	Partículas na forma de poeira, fumaça e fuligem. Tamanho $\leq 100\text{micra}$	Processos industriais, veículos automotores e queima de biomassa	Doenças pulmonares, como asma e bronquite, ou intensificação das reações em pessoas que já possuem a doença
Material Particulado (MP1,0)	Partículas na forma de poeira, fumaça e fuligem. Tamanho $\leq 1\mu\text{m}$	Processos de combustão e ressuspensão de poeira e solo depositado	Doenças respiratórias, atingem mais profundamente no trato respiratório
Material Particulado (MP2,5)	Partículas na forma de poeira, fumaça e fuligem. Tamanho $\leq 2,5\mu\text{m}$	Processos de combustão e ressuspensão de poeira e solo depositado	Doenças respiratórias, atingem o trato respiratório
Material Particulado (MP10)	Partículas na forma de poeira, fumaça e fuligem. Tamanho $\leq 10\mu\text{m}$	Processos de combustão e aerossol secundário (formado na atmosfera)	Insuficiência respiratória, aumento de atendimentos hospitalares e mortes prematuras
Monóxido de Carbono (CO)	Gás incolor, inodoro e tóxico	Combustão incompleta, partir de qualquer queima (gás, óleo ou carvão)	Danos ao sistema nervoso central, com possíveis dores de cabeça e tontura
Dióxido de Carbono (CO2)	Gás incolor, inodoro e mais pesado que o ar (prejudicial em alta concentração)	Queima de combustíveis fósseis, queima de biomassa e processos industriais.	Poluição do ar, aumento na temperatura e chuva ácida (efeitos indiretos)

Fonte: Adaptada de SISAM (2019), Leite, Debone e Miraglia (2020) e FEPAM (2022).

Na Tabela 6 estão apresentados alguns trabalhos realizados no Ceará, bem como os resultados obtidos com valores de referência para a região, a fim de compreender a evolução do tema no estado e na cidade de Fortaleza, onde a maioria deles ocorreram.

Tabela 6 – Estudos relacionados à poluição atmosférica no Ceará

Autores e instituições	Área de estudo	Equipamento para coleta	Variáveis estudadas	Resultados encontrados
Cavalcante <i>et al.</i> , 2017 (UFC)	Fortaleza e região metropolitana	Filtros de fibra de quartzo utilizando amostragem de alto volume	Índices prediais e de arborização Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HPAs), no qual há relação com material particulado	Áreas com maior densidade de construção tendem a elevar os níveis de HPAs; Veículos leves são a fonte mais significativa do poluente
Gomes, Silva e Silva, 2019 (IFCE)	Avenida Treze de Maio, Fortaleza	Sensor HOBO data logger abrigado em uma miniestação de	CO ₂ , temperatura e umidade	Aumento proporcional entre CO ₂ [ppm] e Temperatura: 2012 = 664ppm e 31°C 2017 = 1069ppm e 34°C

		monitoramento automático		2018 = 1013ppm e 32°C 2019 = 972ppm e 36°C
Oliveira <i>et al.</i> , 2019 (UECE e IFCE)	Ambientes Urbanos Desportivos em Fortaleza	Amostradores de Pequeno Volume (APV)	Dias da semana e finais de semana NO ₂ , NH ₃ , SO ₂ e H ₂ S	Variação das concentrações: NO ₂ = 258 a 1848µg/m ³ SO ₂ = 018 a 336µg/m ³ NH ₃ = 278 a 1107µg/m ³ H ₂ S = 076 a 753µg/m ³
Ribeiro <i>et al.</i> , 2019 (UFC)	Fortaleza	Amostradores passivos com uso de filtros e pesagem de material	Entropia (diversidade do uso do solo) NO ₂	Concentração média mínima de 0,19µg/m ³ .h ⁻¹ e uma máxima de 2,42µg/m ³ .h ⁻¹
Rocha <i>et al.</i> , 2020 (UFC)	Fortaleza e região metropolitana	Equipamento com filtros de fibra de quartzo (Hi-Vol 3000)	Impactos na saúde (Modelo APHEKOM) Dados populacionais MP2,5 e MP10	Média diária: MP2,5 = 25,1µg/m ³ MP10 = 36,5µg/m ³
Oliveira, Bertoncini e Castelo Branco, 2022 (UFC)	Vias de Fortaleza e região metropolitana	Portable Emissions Measurement System (PEMS)	Índice de Irregularidade Longitudinal (IRI) CO ₂ , CO e NO _x	Médias apresentadas para pavimento asfáltico: CO ₂ = 2,93g/s CO = 1,10mg/s NO _x = 0,93mg/s
Neves <i>et al.</i> , 2023 (IFCE)	Campus IFCE, Fortaleza	Estação fixa	PTS, MP2,5, MP10, O ₃ , CO ₂ e compostos orgânicos voláteis totais (COVT)	Principais médias entre setembro e março: MP2,5 = 19,9µg/m ³ MP10 = 25,4µg/m ³ PTS = 37,9µg/m ³ CO ₂ = 564,5ppm

Fonte: Elaborada pela autora.

2.2 Impacto do setor de transportes na emissão de poluentes

Questões relacionadas à poluição estão cada vez mais presentes no contexto de mobilidade e transporte, já que grande parte dos poluentes emitidos é citada como proveniente da queima de combustíveis fósseis em automóveis (Bachechi, Po e Rollo, 2022; Rodriguez-Rey *et al.*, 2022).

Uma análise do Estado da Arte relacionando a emissão de poluentes com o setor de transportes revela uma vinculação entre a (i) condição da via, o (ii) tipo de combustível ou de automóvel e o (iii) volume de tráfego na emissão dos poluentes. Por isso, os trabalhos que tratam dessa análise concluem que há uma forte influência do planejamento urbano, políticas de mobilidade urbana e inovação veicular para conquistar um meio mais sustentável e o uso consciente do transporte automotivo (Aguiar *et al.*, 2015; Policarpo *et al.*, 2018; Moussa, 2022).

Desta forma, a seguir, são apresentados estudos relacionados a essas variáveis e valores base de emissão de poluentes no ambiente urbano, a partir de métricas nacionais e internacionais.

2.2.1 Condição superficial ou qualitativa da via

Com citações da *International Energy Agency - IEA* (2012), Organização Mundial da Saúde – *OMS* (2018) e *Organization for Economic Co-Operation and Development - OECD* (2020), Jaworski, Mądzie e Lejda (2019) afirmaram que a exposição ao material particulado (MP) tem grande impacto negativo na saúde humana por serem facilmente inalados pelas vias respiratórias, principalmente o MP10. Os autores estudaram a emissão de gases quando o veículo está em rotatórias, onde passa por ações de aceleração e frenagem em velocidade baixa. Os resultados apresentaram um aumento de componentes nocivos do escapamento, como CO₂, hidrocarbonetos totais de petróleo (HTP), CO e NO_x.

Os estudos de Thorpe e Harrison (2008) e Gustafsson *et al.* (2008), que discutem a emissão de poluentes provenientes de fontes como desgaste de freios, de pneus e abrasão da superfície da estrada, apresentam os riscos à saúde ao encontrar componentes como Fe, Cu, Pb e Zn em emissões de material particulado, além de minerais dos agregados e uma grande variedade no tamanho das partículas.

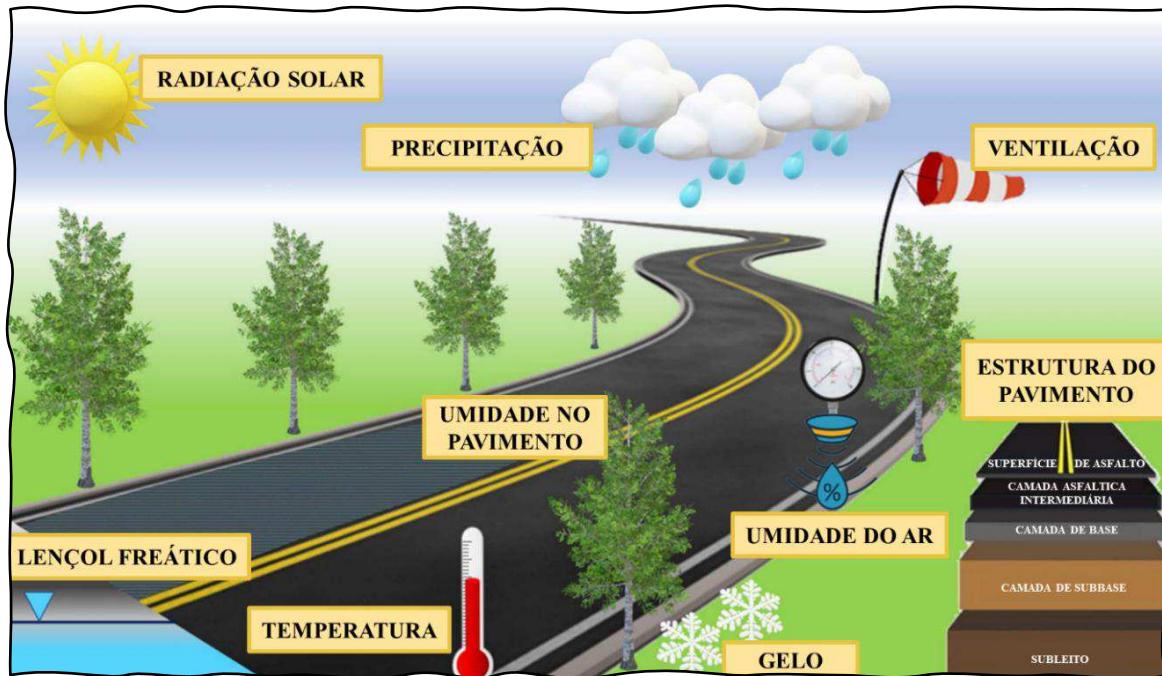
Em pesquisa realizada no Egito, Moussa (2022) verificou que carros, ônibus e motocicletas emitiram mais CO₂ em vias de baixa qualidade, onde são frequentemente forçados a acelerar e frear. Isso também se aplicou em situações de congestionamento. Os resultados apresentaram um aumento nas emissões de CO₂ de 23% para carros, 17% para ônibus e 4% para motocicletas, devido às más condições da via.

Por este motivo, o trabalho de Oliveira, Bertoncini e Castelo Branco (2022) verificou o Índice de Irregularidade Longitudinal (IRI) para avaliar as texturas superficiais de diferentes tipos de pavimentos, na região Metropolitana de Fortaleza. A qualidade funcional foi analisada a partir de parâmetros como microtextura, macrotextura, megatextura e irregularidade longitudinal da via. Percebeu-se que os três tipos de pavimento (asfáltico, concreto de cimento Portland e paralelepípedo/intertravado) resultam em emissões semelhantes de CO₂, com destaque para o revestimento de paralelepípedo que apresentou altos valores de emissão e impossibilitou o tráfego acima de 50km/h, coincidindo com o maior valor de IRI (4,21m/km).

Quando se trata de mudanças globais no clima, as alterações de parâmetros como temperatura e umidade afetam significativamente a infraestrutura viária, pois estão diretamente relacionados aos materiais usados na pavimentação. O pavimento asfáltico, por exemplo, tem seu desempenho dependente da temperatura do ligante na mistura asfáltica e é construído com camadas de solo, sensíveis ao teor de umidade. A Figura 5, baseada em Gulzar, Goenaga e Underwood (2021), destaca os fatores climáticos que afetam a estrutura e podem acelerar ou retardar sua deterioração, a depender da intensidade de mudança do clima e dos parâmetros

estabelecidas em projeto. O aumento da temperatura é particularmente crítico, pois pode elevar os custos de manutenção ou substituição das estruturas afetadas.

Figura 5 – Fatores climáticos que afetam a performance do pavimento flexível



Fonte: Adaptado de Gulzar, Goenaga e Underwood (2021).

2.2.2 Tipos de veículos e combustíveis utilizados

A busca pela inovação, junto à preocupação com o meio ambiente, motivou o setor automobilístico a buscar melhorias de desempenho energético para os veículos produzidos no Brasil. Os automóveis são grandes responsáveis pela emissão de poluentes no meio urbano (Leal e Consoni, 2021; Moussa, 2022), com relação direta ao modelo do automóvel e a variação na composição química do poluente liberado.

O Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia – INMETRO (2022) é atualmente o órgão responsável pela elaboração da Tabela de Consumo e Eficiência Energética dos veículos cadastrados para o Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBE-V), no qual foram autorizados a portar a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE).

Esta ação surgiu com o objetivo de gerar informação sobre o consumo de combustível ao consumidor, tornando-se um parâmetro relevante no momento da compra do veículo (Bales *et al.*, 2015; Costa, 2017). O INMETRO disponibiliza em seu site as tabelas com indicação de desempenho veicular, desde o ano de 2009, que apresentam os carros compactos como aqueles de menores emissores de CO₂ em g/km, e as minivans e carros esportivos como os responsáveis pela maior emissão de CO₂.

No início de sua implementação o cadastro dos veículos era opcional. No entanto, o Programa de Incentivo à Inovação Tecnológica e Adensamento da Cadeia Produtiva de Veículos Automotores (Inovar-Auto), criado pela Lei nº 12.715/2012, instituiu o apoio ao desenvolvimento tecnológico, inovação, proteção do meio ambiente, eficiência energética e a qualidade de veículos. Essas ações são incentivos para a melhoria do consumo energético dos automóveis e para a compra de veículos que produzam menos poluentes ao meio ambiente.

Conforme apresentado por Andrade Fialho e Bertoncini (2020), a eficiência energética trata-se da energia convertida para determinada função. No caso dos automóveis, a energia despendida leva em consideração as características dos veículos, comportamento do condutor e as condições de tráfego e da via. Desta forma, o transporte urbano de alta frequência, tempo de entrega e cargas pesadas contribui para o consumo de energia e emissões de CO₂. Por este motivo, deve-se voltar a atenção para a distribuição urbana e logística do transporte, visando a redução dos impactos ambientais.

Moreno *et al.* (2015) previram que o tipo de transporte e o trajeto escolhido podem influenciar na exposição à poluição atmosférica na cidade. As variações de exposição foram coletadas por medidores em trajes de dois passageiros em Barcelona, a fim de comparar o deslocamento com bonde, metrô, ônibus e caminhada. Seus resultados, apresentados na Tabela 7, demonstram que a caminhada em cruzamentos de tráfego pode apresentar maiores taxas de exposição a poluentes quando comparado ao uso do metrô, tendo em vista a proximidade com a fonte poluidora.

Tabela 7 – Concentrações de material particulado com base no tipo de transporte.

Tipo de transporte	Concentração média de partículas ultrafinas	Escala de exposição
Trens de metrô	$N < 2,5 \times 10^4$ partes.cm ⁻³	Nível baixo = L2
Ônibus a diesel ou caminhada no centro urbano	$N > 5,0 \times 10^4$ partes.cm ⁻³	Nível alto = L4
Caminhada em cruzamentos de tráfego	$N > 10 \times 10^5$ partes.cm ⁻³	Nível extremo = L5

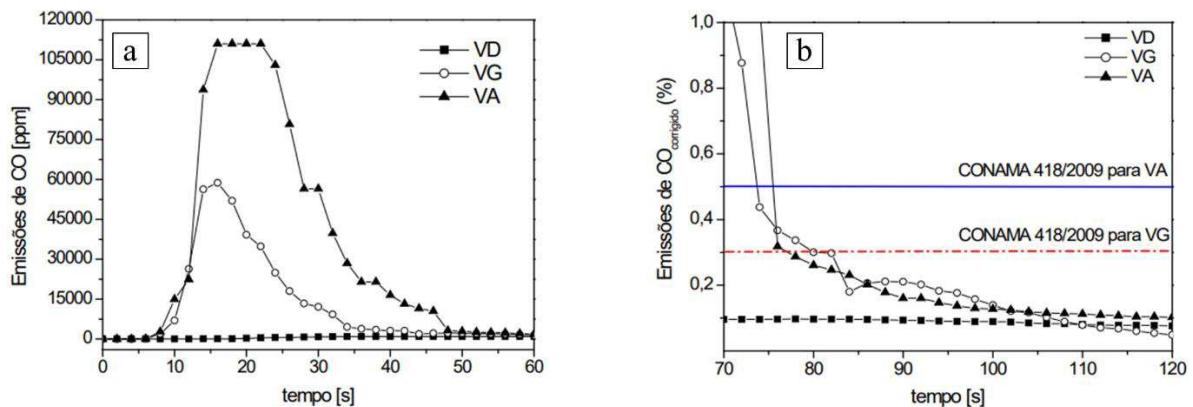
Fonte: Adaptada de Moreno *et al.* (2015).

Da mesma forma, a pesquisa de Chiu, Chen e Chang (2015) apresentou que em ônibus de turismo (veículos de maior porte e frequentemente movido à diesel), as zonas ocupadas por passageiros apresentaram níveis de CO₂ entre 1000 e 2000ppm. Os valores elevados são provenientes da proximidade das áreas ao emissor do poluente, além de levar em consideração a ocupação em um ambiente fechado e percursos mais extensos. Foi registrado, inclusive, reduções de até 200ppm de CO₂ quando as portas dos ônibus foram abertas.

Quando se trata especificamente dos automóveis, Aguiar *et al.* (2015) apresentaram análises de emissões de poluentes entre veículos brasileiros abastecidos com gasolina/álcool e *diesel*, nas condições de partida (a frio ou a quente) e marcha-lenta. Os resultados mostraram altos índices de emissões ainda na partida a frio, de CO e de HC (hidrocarboneto) para os veículos a álcool e gasolina, e NO_x para diesel. O trabalho enfatiza a importância de considerar as variáveis apresentadas em estudos de emissões veiculares e utilizar os dados citados para diagnóstico e manutenção dos automóveis, tendo em vista que são influentes na emissão de poluentes.

A Figura 6a apresenta as emissões de CO de veículos do tipo utilitário a diesel (VD), veículos a gasolina (VG) e veículos a álcool (VA), indicando ainda que as emissões de CO só atingem o valor permitido pelo CONAMA para VG e VA após um período de 70 segundos em marcha-lenta (Figura 6b).

Figura 6 – Perfil de emissões de CO durante a partida a frio (a) e marcha-lenta (b) para os veículos/combustíveis testados



Fonte: Aguiar *et al.* (2015).

Policarpo *et al.* (2018) também identificaram que veículos movidos à gasolina e etanol contribuíram principalmente para o aumento das emissões de CO, assim como hidrocarbonetos não metano e aldeídos, compostos por um grupo carbonila (C=O), um átomo de hidrogênio e a um grupamento R, que pode ser uma cadeia carbônica ou outro átomo de hidrogênio. Por outro lado, veículos a *diesel*, como caminhões e ônibus, foram os principais responsáveis pelas emissões de NO_x e MP. Desta forma, o trabalho apresenta a necessidade de estratégias para o gerenciamento de emissões veiculares, considerando tanto a composição da frota quanto os tipos de combustíveis utilizados.

Outra comparação entre diferentes tipos de combustíveis foi realizada por Frutuoso *et al.* (2023) na cidade de Fortaleza, considerando a quantidade de etanol em veículos *Flex-Fuel* (FFV). De uma forma geral, quanto maior o teor de etanol, maior poderá ser a emissão de CO₂, ainda que o estudo tenha apresentado elevados índices de emissão para todos os combustíveis. Ademais, o estudo foi realizado em vias com corredores para tráfego exclusivo de ônibus, contribuindo para menores emissões de poluentes, pois as paradas dos automóveis são reduzidas. Quando o tráfego é misto essa situação é invertida. A partir da análise, comprehende-se que a ação de aceleração e frenagem está associada à geração de poluentes e emissão de gases do efeito estufa.

Portanto, entende-se que o perfil de condução do motorista também influencia na geração de poluentes, ou seja, a velocidade média ao trafegar, o tempo de reação para frenagem e reaceleração, entre outros aspectos que não serão tratados na presente dissertação (Adamidis, Mantouka e Vlahogianni, 2020). Essas características vinculadas ao elevado volume de tráfego intensificam as emissões no ambiente urbano e podem dificultar a previsão dos poluentes na região.

Por fim, uma estratégia de tornar os modos de transporte mais sustentáveis é a utilização de veículos elétricos, como parte dos veículos de passeio. A venda de veículos elétricos no Brasil vem crescendo desde 2021 (cerca de 35 mil unidades), com um aumento de 41% em 2022, representando cerca de 49 mil unidades, segundo Associação Brasileira de Veículos Elétricos (ABVE, 2023). Já em 2023, o Brasil emplacou aproximadamente 94 mil veículos, registrando um aumento de 91% em relação ao ano anterior (ABVE, 2024). Apesar das vantagens ambientais desse tipo de automóvel, a sua adoção em larga escala pode ser prejudicada pelo alto custo e a dependência de importações de peças, além da insuficiente infraestrutura para carregamento constante dos veículos (Leal e Consoni, 2021).

2.2.3 Influência do volume de tráfego

O entendimento da geração e dissipação de poluentes em zonas urbanas é bastante relevante, uma vez que se trata de um tema necessário para nortear as políticas públicas e as ações de mobilidade, em prol da qualidade de vida da sociedade. Como exemplo, o estudo de García-Chan *et al.* (2021) indica a preferência dos líderes de cidades europeias por restrições de rotas veiculares, e até bloqueio do tráfego em alguns pontos de rodovias, para minimizar as concentrações de poluentes.

Essa estratégia tem sido aplicada em algumas cidades por meio das Zonas de Baixa Emissão (LZE, sigla em inglês) ou Zonas de Emissões Ultrabaixas (ULEZ, sigla em inglês),

como aconteceu em Londres em 2008, com o objetivo de reduzir as emissões de poluentes por veículos de carga movidos a diesel, ônibus, vans de maior porte e miniônibus. Já em 2017, uma medida de cobrança de taxa extra foi aplicada aos veículos que trafegassem no local sem os requisitos mínimos de emissão, estabelecidos pela União Europeia (Pereira e Frederico, 2019).

O avanço dessa ação continuou, ressaltando-se a divulgação em plataformas *online* como o Instituto ClimaInfo (Climainfo, 2023), afirmado que em 2019 a aplicação de multas foi expandida para qualquer veículo que não estivesse dentro das normas, não apenas veículos pesados como funcionava no início. Em 2021, as zonas foram ampliadas e passaram a incluir toda a cidade. Desde a implementação da primeira ULEZ, a prefeitura de Londres afirma que houve uma redução de 23% nas emissões de NO_x em toda a cidade.

Segundo Pereira e Frederico (2019), na Suécia já haviam sido implementadas ações semelhantes nas cidades de Estocolmo, Gotenburgo e Malmoe em 1996 e, em Tóquio no Japão, em 2003. Na Europa, muitas cidades vêm adotando essa estratégia em pequenas áreas para redução das emissões, com motivação para implementação em áreas maiores.

Diversos autores (Thorpe e Harrison, 2008; Azevedo *et al.*, 2015; Yang *et al.*, 2020; Che *et al.*, 2023) apresentam o setor de transportes como um dos principais geradores de poluição atmosférica e, como consequência, esse setor tem papel significativo nas mudanças climáticas.

Para estimar a liberação de gases poluentes estritamente relacionada aos veículos, existem equipamentos e análises de dados de emissões provenientes do escapamento do automóvel, que são usados, inclusive, para testes e otimização dos veículos. Como exemplo, a plataforma *DieselNet* explica que a China desenvolveu prazos para implementação dos padrões de emissão estabelecidos com base nas normas europeias, o último padrão apresentado foi o chamado “China VI”, publicado em 2018, com introdução do programa de 2019 até 2023.

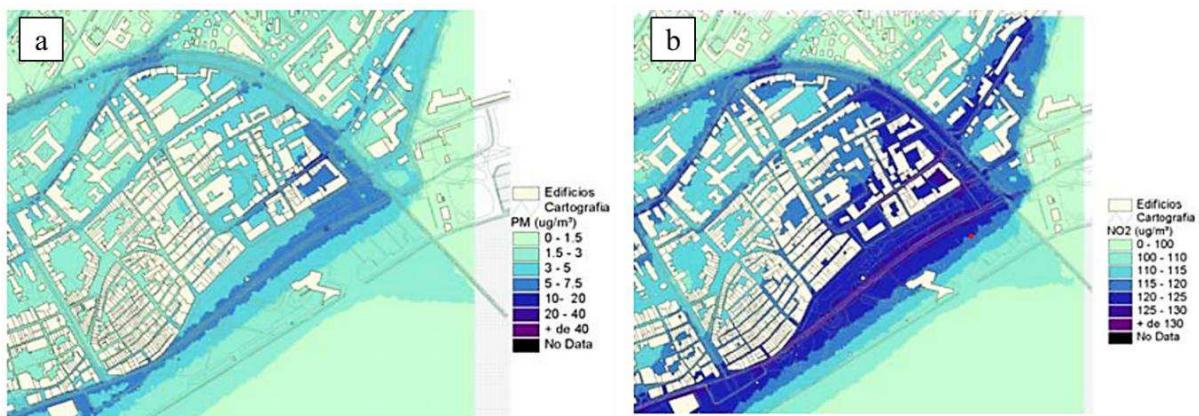
Liu e Tan (2020) propuseram uma investigação das emissões de veículos pesados na China com uso do equipamento *Portable Emission Measurement System* (PEMS). Foi percebida uma redução nos índices dos poluentes gasosos NO_x, CO e HC, de 88, 98 e 62%, respectivamente, valores aceitáveis frente aos padrões estabelecidas para os veículos China VI.

Além do PEMS, há outros equipamentos comerciais capazes de medir a emissão de poluentes, como o estudo apresentado por Aguiar *et al.* (2015), que utilizou um analisador de gases portátil (modelo *Greenline 8000*) constituído por células eletroquímicas e sensor de infravermelho, acoplado ao escapamento, para identificação de emissões em veículos brasileiros com diferentes tipos de motor e diferentes velocidades. A aquisição instantânea dos

dados foi viabilizada através do *software* do analisador, que apresentou como principais poluentes o CO, SO₂, NO_x e HCs.

A fim de compreender o efeito do tráfego de veículos na poluição urbana, o trabalho de Silva e Mendes (2006) apresenta por meio de mapas a média horária de poluentes no ambiente urbano da cidade de Viana do Castelo, em Portugal, nos quais MP10 e NO₂ estão apresentados. As regiões com cores mais intensas na Figura 7 representam as maiores concentrações dos poluentes nas zonas adjacentes às vias de maior tráfego, inclusive de veículos pesados.

Figura 7 – Concentração média horária de (a) MP10 e (b) NO₂.

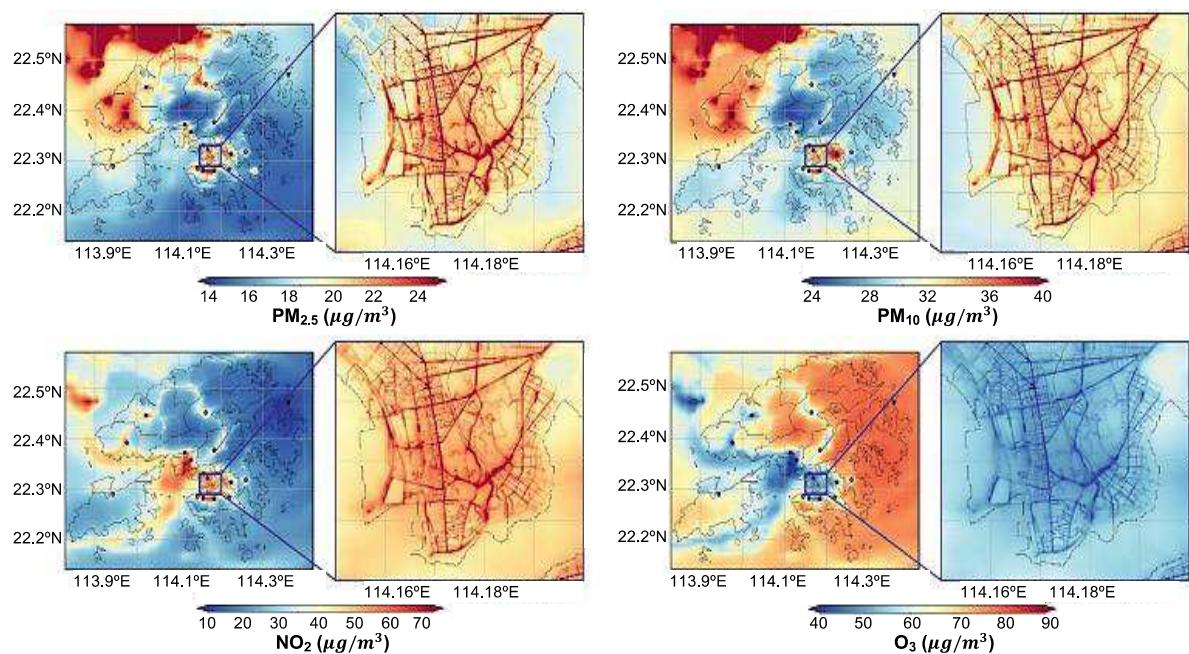


Fonte: Adaptado de Silva e Mendes (2006).

Além disso, é possível visualizar na imagem apresentada que, apesar do estudo considerar apenas o tráfego de automóvel como fonte de poluição, os índices mais elevados se estendem para o centro da área de estudo, região entre prédios e com predominância de atividades urbanas, demonstrando sua dispersão no ambiente e influência dos edifícios para o acúmulo de poluição.

Outro exemplo da relação entre poluentes e volume de tráfego foi estudado por Che *et al.* (2023) e está apresentado na Figura 8, que indica o resultado das concentrações médias de poluentes atmosféricos medidos em Hong Kong, sendo eles MP2,5, MP10, NO₂ e O₃. As linhas apresentadas na imagem destacam a heterogeneidade da poluição em áreas urbanas com densas redes rodoviárias e com a presença de blocos de construção. A concentrações de NO₂ foram encontradas em áreas com tráfego rodoviário elevado, já as concentrações de O₃ foram contrárias, apresentando níveis mais altos em áreas rurais.

Figura 8 – Distribuição espacial de concentrações médias de poluentes



Fonte: Che *et al.* (2023).

No estado de São Paulo, a pesquisa de Vieira *et al.* (2023) identificou por meio de análises químicas dos poluentes que, além da contribuição da queima de biomassa, os veículos pesados são os maiores emissores de carbono negro na área de estudo, sendo o poluente que absorve a radiação solar e agrava o aquecimento global. A combustão dos veículos também gerou alta concentração de elementos químicos nocivos, como enxofre e bromo. O estudo enfatizou a necessidade de reduzir as emissões veiculares e controlar as demais fontes de poluição para atender os padrões de qualidade do ar exigidos.

Para a cidade de Fortaleza, no Ceará, uma via com alto tráfego de veículos e grande movimentação de pessoas foi escolhida para medição de poluentes no ambiente urbano durante 6 meses. Neves *et al.* (2023) indicaram índices de MP2,5 maiores do que aqueles recomendados pela OMS (que sugere um máximo de $15\mu\text{g}/\text{m}^3$) em algumas coletas, mas aceitáveis para a legislação nacional, assim como o valor médio de $25,4\mu\text{g}/\text{m}^3$ para MP10. No período chuvoso os índices foram menores para os materiais particulados, quando comparado ao período seco.

Os autores citados também analisaram as concentrações de CO₂ e indicaram médias aproximadas de 560ppm, com valores máximos de 650ppm. Para todos os poluentes estudados houve uma diminuição nos índices aos finais de semana, com redução de aproximadamente 17, 14 e 5% para MP2,5, MP10 e CO₂, respectivamente, indicando a influência da redução da frota veicular local nos dias com menos atividades.

2.3 Influência da infraestrutura urbana e das condições meteorológicas na poluição atmosférica

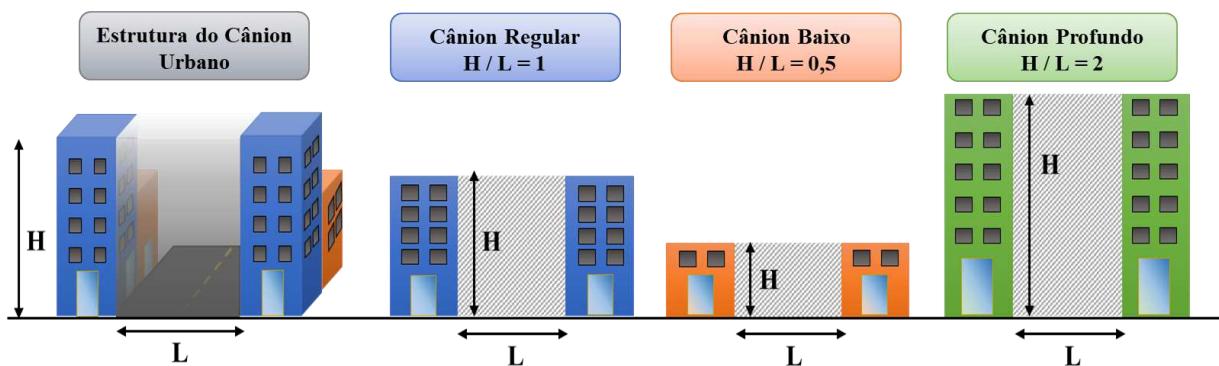
Uma série de fatores urbanos e variáveis climáticas estão relacionados à maneira como a poluição se comporta na cidade. Há um consenso entre pesquisadores que as ações humanas são as principais responsáveis pela alteração do meio, seja pela interferência em áreas verdes, crescente construção de superfícies impermeáveis ou edifícios cada vez maiores e mais próximos entre si.

Alguns termos são citados como influenciadores dos índices de poluição no meio urbano, dentre eles cânions urbanos (Aguiar *et al.*, 2017; Seaton *et al.*, 2022), áreas verdes (Rocha, 2017; Ponette-Gonzalez *et al.*, 2022), uso do solo (Ahn, Lee e Hong, 2021; Sakti *et al.*, 2023), e densidade demográfica (Liang e Gong, 2020, Sakti *et al.*, 2023). Mais especificamente, algumas variáveis que são responsáveis por manter a sensação térmica e o microclima local tendem a afetar características naturais do ambiente, como o clima, temperatura, umidade, velocidade e direção dos ventos, entre outras (Oliveira *et al.*, 2019; Yang *et al.*, 2020).

2.3.1 Características do espaço urbano

A forma como as edificações são distribuídas enfatiza a relação entre a altura dos prédios (H) e a distância entre eles (L). Essa proporção é calculada e conhecida como “cânion urbano”. Vardoulakis *et al.* (2003) apresentam proporções de cânions (medidos pela relação H/L), visualizadas na Figura 9, que indicam áreas internas entre os prédios com pouca ventilação e alta concentração de poluentes, sendo mais significativas em cânions profundos.

Figura 9 – Proporções de cânions no meio urbano

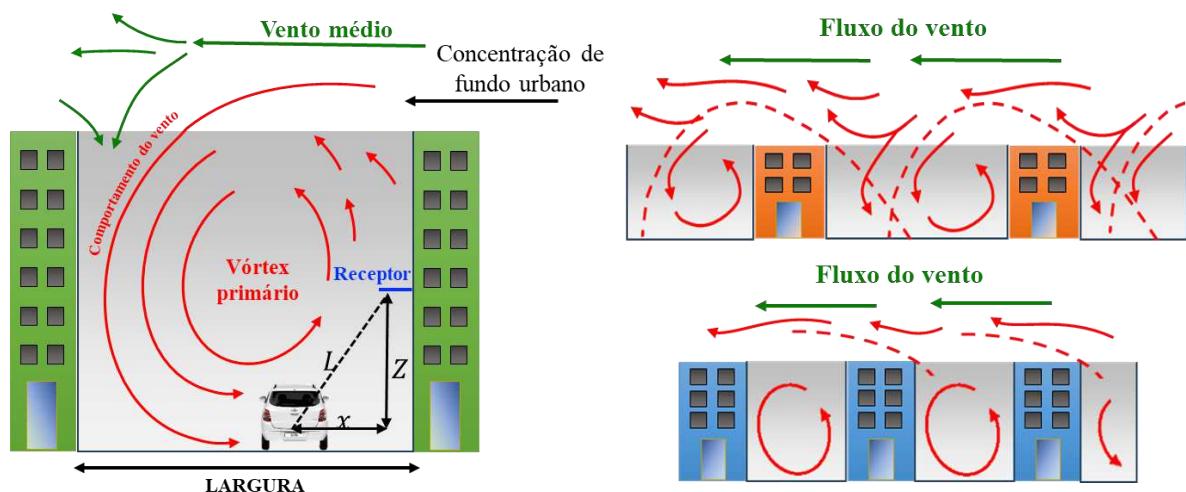


Fonte: Adaptada de Vardoulakis *et al.* (2003).

Um dos primeiros estudos sobre essa relação foi abordado por Oke (1981), que apresentou a influência dos cânions nas trocas de energias entre superfícies e nas condições

térmicas do local, além da importância da geometria dos cânions como característica do desenho urbano e do planejamento urbano das cidades (Martins, Bonhomme e Adolphe, 2013; Nakata-Osaki, Souza e Rodrigues, 2016). Essa característica é exemplificada na Figura 10, indicando o comportamento da ventilação e dispersão de poluentes no cânion urbano.

Figura 10 – Representação da ventilação e dispersão de poluentes no cânion urbano



Fonte: Adaptada de Vardoulakis *et al.* (2003).

O planejamento urbano pode englobar as estratégias de diminuição do tráfego a partir de diferentes rotas usadas, do estudo sobre a altura das edificações em cada região e até do aumento da arborização do local. Como citado por Akbari, Pomerantz e Taha (2001), “*as superfícies escuras e a vegetação reduzem o ar sobre as áreas urbanas, levando à criação de ilhas de calor*”. Purwanto *et al.* (2022) afirmam ainda que as ilhas de calor também são caracterizadas por intensa atividade humana, materiais de cobertura do solo (superfícies impermeáveis) e elevado tráfego de veículos.

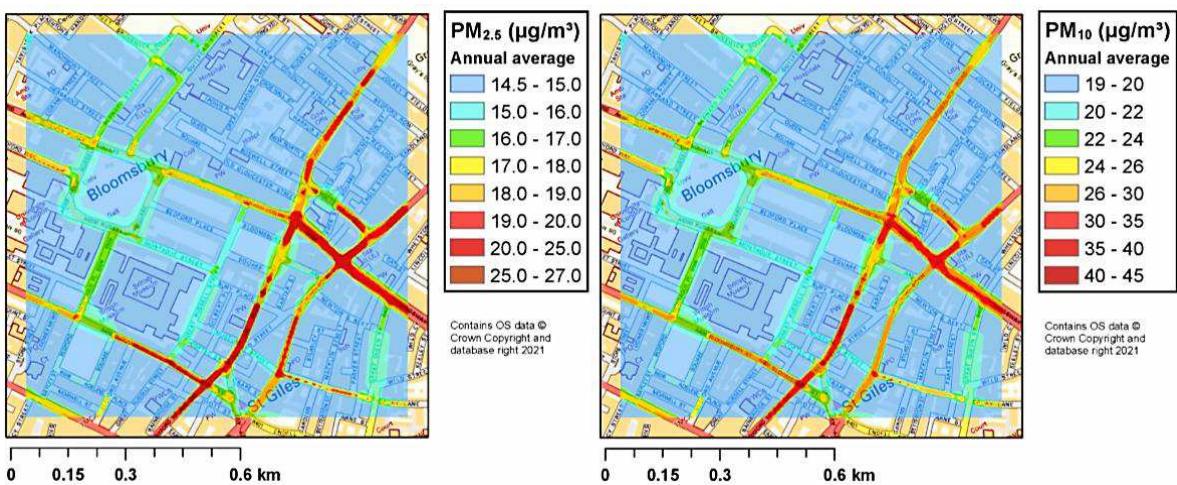
Considerando a influência das alterações climáticas no desempenho da infraestrutura rodoviária, Underwood *et al.* (2017) destacam que as temperaturas atuais excedem as previsões usadas nos projetos de misturas asfálticas, levando a uma degradação mais rápida e maiores custos de manutenção e reconstrução, além de afetar o microclima urbano com maiores índices de calor do pavimento, que compõe grande parte da área impermeabilizada das cidades. Somado a isso, a umidade e a ventilação também afetam a dispersão de poluentes e o resfriamento dos ambientes. Jardim (2011) indica que temperaturas mais elevadas reduzem a pressão atmosférica e, juntamente com a ausência de ventilação, provocam concentração de material particulado e ar úmido nas camadas mais próximo do solo.

Esse problema é de grande influência para o aquecimento do clima em larga escala, que se torna mais difícil de solucionar. No entanto, pequenas ações iniciadas em centros urbanos podem ser simples e fáceis de aplicar. Superfícies reflexivas (telhados claros e pavimentos frios, chamados assim por apresentarem materiais e propriedades que permitem a reflexão uma parte significativa da radiação solar incidente) e áreas verdes e azuis (arborização e lagos), podem reduzir a absorção de calor pelas superfícies, as temperaturas no nível do pedestre e a intensidade das ilhas de calor, favorecendo o microclima da região (Akbari *et al.*, 2015; Oliveira *et al.*, 2019).

Um estudo realizado em Hong Kong por Che *et al.* (2023) indica que um planejamento urbano desfavorável causou uma coincidência espacial entre poluição e população, com aumento de 46% no índice de exposição à poluição atmosférica. A análise espacial se baseou principalmente na comparação entre exposição individual (medição ponderada pela população) e a medição a nível de cidade. As concentrações médias ponderadas pela população foram de $18,9\mu\text{g}/\text{m}^3$ para MP2,5 e de $32,3\mu\text{g}/\text{m}^3$ para MP10, estimativas superiores quando comparadas aos valores medidos em Hong Kong. Isso indica que locais residenciais podem apresentar maiores níveis de poluição do que aqueles menos habitados, e ainda que as concentrações de poluição próximas à população são maiores do que as médias mensuradas para um bairro ou uma cidade.

Validando a relação entre espaço urbano e poluição atmosférica, Seaton *et al.* (2022) confeccionaram mapas de cruzamentos entre vias no Reino Unido, com representação das elevadas concentrações acima do padrão permitido de MP2,5 e MP10, nos cânions mais profundos e contínuos, ou seja, aqueles que apresentam edifícios maiores em grande parte da extensão da via, conforme indicado pelas cores mais intensas nos mapas da Figura 11.

Figura 11 – Identificação de cânions a partir da concentração de poluentes



Fonte: Seaton *et al.* (2022).

Um exemplo do planejamento da cidade foi apresentado por Beringui *et al.* (2021) com o histórico de poluição atmosférica da região de Bonsucesso, Rio de Janeiro. Os maiores índices de MP10 desde 1990 foram atribuídos ao intenso tráfego veicular e às fontes estacionárias, geradas pela grande concentração de indústrias do ramo petroquímico, metalúrgico, geração de energia, cerâmica e combustíveis industriais em uma mesma região.

Para o MP2,5, os maiores índices encontrados foram entre 2010 e 2011, com médias aproximadas de $50\mu\text{g}/\text{m}^3$, mas, na maioria dos trabalhos analisados, os valores ficaram abaixo de $20\mu\text{g}/\text{m}^3$. De um modo geral, o estudo retrata que as maiores concentrações de MP (PTS, MP2,5 e MP10) foram observadas em locais com maior volume de tráfego veicular e próximo de indústrias, enquanto menores concentrações estão em locais mais afastados dos grandes centros urbanos.

Desta forma, a temática de planejamento urbano é inserida ainda como forma de minimizar a concentração de emissões em uma única região, buscando estratégias de redução na geração dos poluentes ou mesmo formas de dispersá-los no ambiente urbano. Uma menor distância percorrida por veículos automotivos também tem essa função, e pode ser realizada por meio de estratégias de logística verde e roteirização verde, abordadas por Andrade Fialho e Bertoncini (2020) a partir de uma revisão da literatura. O trabalho apresenta o avanço dos estudos na busca por otimizar as rotas de transporte para minimizar os impactos ambientais com melhor eficiência energética dos veículos, assumindo a relação direta entre gasto energético e emissão de poluentes.

Maia, Netto e Costa (2019), além de identificar os órgãos responsáveis pelo monitoramento da qualidade do ar no Rio de Janeiro, discutiram as interações entre poluição,

elementos naturais e condições térmicas na cidade. A partir de métodos estatísticos aplicados aos poluentes CO, SO₂ e partículas inaláveis, percebeu-se uma relação proporcional entre suas concentrações e as variáveis morfológicas e meteorológicas, que apresentaram como principal aspecto as taxas de ocupação e de verticalização da área de estudada.

O impacto da vegetação na concentração de partículas também é citado em ambientes de alto tráfego. Zheng *et al.* (2021) constataram que a presença de arborização serve como um filtro de limpeza do ambiente e pode melhorar a qualidade do ar, além de aumentar a umidade e ajudar na redução da temperatura.

A análise de projetos de vias verdes na Coréia do Sul é abordada por Ahn, Lee e Hong (2021), a partir de medições móveis e em campo de partículas ultrafinas e carbono negro. Essas vias são passarelas construídas para pedestres, com incentivo à aplicação de vegetação e ventilação, com altura no nível acima, abaixo ou igual às vias de tráfego comuns. As concentrações de poluentes nas vias verdes foram 30% menores do que nas calçadas, de acordo com uso do solo, presença de vegetação, altura dos edifícios e tráfego próximo.

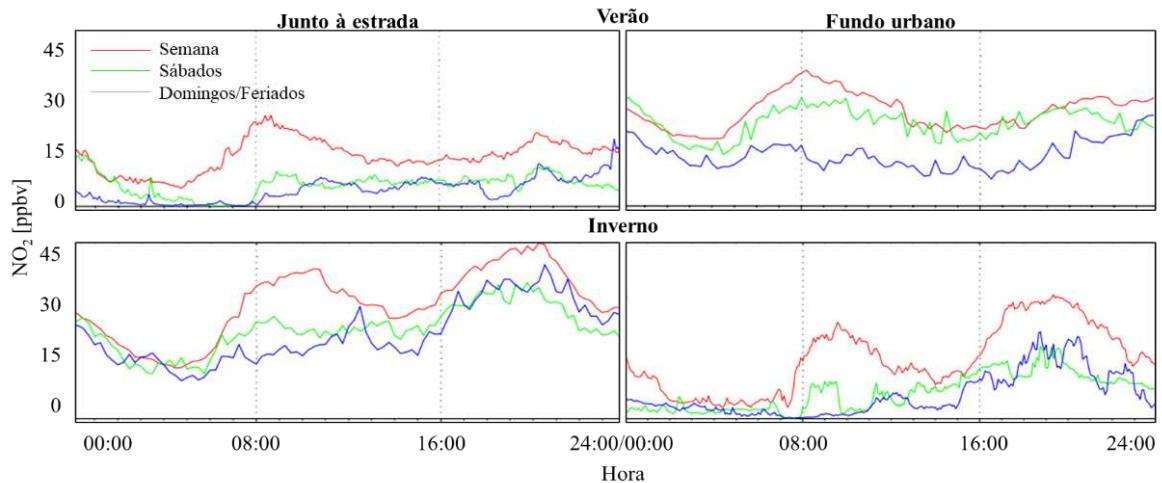
O uso do solo também foi analisado por Ribeiro *et al.* (2019), que explorou o padrão de uso na geração de NO₂. A entropia foi utilizada como um indicador da distribuição de ocupação do solo, na qual seu valor é zero quando o uso do solo não tem variação, e 1 quando há diversidade de tipos de uso do solo na área de estudo. Neste caso, o volume de tráfego aliado à elevada entropia gerou grandes índices de NO₂, pois têm-se maior geração de viagens no local. O mesmo trabalho estudou o gabarito das edificações a partir da altura delas, e seus efeitos na concentração de NO₂. Como resultado, apesar da altura das edificações afetar a concentração de poluentes e influenciar na formação dos cânions urbanos, percebeu-se que a relação entre essas variáveis não foi direta, pois a análise por ponto indica que o impacto do gabarito pode ser suprimido pelo intenso tráfego, assim como gabaritos mais altos podem influenciar na dispersão dos poluentes pelo efeito de canalização dos ventos.

Com base em históricos de dados de qualidade do ar e simulações de emissões realizadas, Zhang *et al.* (2023) afirmaram que a topografia da cidade de Pequim teve grande influência na concentração de O₃ na região. Apesar do poluente ser produzido nas camadas atmosféricas superiores, ele era transportado verticalmente para as camadas inferiores por uma difusão vertical, assim apresentava maior concentração no nível das ruas e de exposição das pessoas, assumindo valores acima de 65,9 µg/m³ por hora, mais da metade do valor estabelecido pela OMS em 8 horas de exposição (até 100 µg/m³).

Para Coelho *et al.* (2022), as medições realizadas em zonas urbanas europeias nomeadas como áreas de concentração, ou seja, a área de estudo para análise da concentração

de poluentes, indicaram que algumas regiões como Liubliana na Eslovênia, Liguria na Itália e Sosnowiec na Polônia apresentaram maiores concentrações de MP10, com valores de 45, 35 e 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, e os valores de MP2,5 era semelhantes, com redução nos índices de concentração entre 5 e 15%. Outra importante descoberta foi que o NO₂ tem maior variabilidade espacial, com maior dependência de fontes locais quando comparado ao MP2,5 e MP10, o que indica que podem apresentar maior capacidade de dispersão e ter valores maiores mesmo longe de suas fontes. Este resultado é compatível com a pesquisa realizada na cidade do Porto por Oliveira *et al.* (2004), na qual as concentrações de NO₂ (Figura 12) no período do inverno foram maiores nas proximidades da estrada, área junto à fonte de emissão e com a presença de uma camada (atmosférica) limite mais baixa, delimitando a dispersão do ar. No verão as concentrações foram maiores no fundo urbano, resultado do transporte de partículas pela ventilação para regiões com maior densidade de edificações e consequente concentração dos poluentes.

Figura 12 – Valores médios diários de NO₂ durante os dois períodos de amostragem.



Fonte: Adaptado de Oliveira *et al.* (2004).

Além disso, é possível observar os menores índices de concentração de NO₂ aos sábados, domingos e feriados, corroborando pesquisa realizada por Oliveira *et al.* (2019), na qual as concentrações de NO₂ e amônia (NH₃) em áreas de recreação foram reduzidas aos finais de semana, resultado da diminuição do tráfego veicular.

Variáveis estudadas por Liang e Gong (2020) e Sakti *et al.* (2023) se relacionam com a estrutura urbana, como a densidade populacional, o tamanho da população e a renda familiar. Esses fatores são relevantes pois podem predizer outras variáveis:

- A densidade populacional é um reflexo “*da demanda de transporte e da fração de emissões inaladas pelas pessoas*” (análise da vulnerabilidade e exposição humana). Uma maior densidade populacional de uma região pode gerar a formação de pontos de poluição intensa em áreas do centro urbano;
- Populações maiores retratam o aumento do uso de veículos e de viagens a serem realizadas, que, por sua vez, representam o aumento dos congestionamentos e das emissões de escapamentos;
- O aumento da renda per capita se relaciona com o aumento das concentrações de atividades industriais (e vice-versa), o que resulta em deterioração da qualidade do ar na região. No entanto, a qualidade do ar pode ser valorizada se uma “*economia mais forte for resultado da concentração de indústrias de alta tecnologia menos poluentes*”.

Desta forma, a partir do trabalho dos autores supracitados, é possível afirmar que quanto maior a densidade populacional de uma região, maior será a emissão de determinados poluentes, tendo em vista que são provenientes das atividades humanas. Tratar essas variáveis exige estratégias e modelos preditivos avançados para correlacionar muitas variáveis.

2.3.2 Variáveis meteorológicas

As características do ambiente construído estão associadas a variações climáticas como altas temperaturas, baixas umidades e pouca ventilação. Temperaturas mais altas reduzem a pressão atmosférica e, juntamente com a ausência de ventilação, causam concentração de material particulado e ar úmido nas camadas mais próximas do solo (Jardim, 2011).

Como exemplo do uso de diferentes variáveis para compreender fenômenos do ambiente urbano, Li *et al.* (2022) utilizaram dados como temperatura, umidade e ambiente construído para investigar os impactos do uso do solo no clima da região. Embora exista uma radiação intensa pela manhã, a temperatura superficial se elevou no período da noite, devido à absorção de calor pela estrutura urbana no decorrer do dia, somado ainda aos edifícios de grande altura que impedem a circulação do vento e favorecem a formação de “ilhas de calor”.

Como citado anteriormente, as áreas urbanas com elevadas temperaturas, resultantes das barreiras formadas por edifícios, são chamadas de “ilhas de calor”. Essas áreas também são caracterizadas por intensas atividades humanas, materiais de cobertura do solo (superfícies impermeáveis) e alto tráfego de veículos. A partir de dados meteorológicos e de qualidade do ar, Purwanto *et al.* (2022) encontraram uma redução de 1°C em ilhas de calor como resultado da redução da frota veicular durante o período de isolamento da pandemia de

Covid-19. Consequentemente, percebeu-se uma diminuição nos índices de NO₂ gerados pelos automóveis em 37 e 28%, respectivamente, nas cidades de Malang e Surabaya estudadas.

Ainda relacionado às mudanças durante a pandemia, Chau *et al.* (2022) usaram informações meteorológicas, como hora do dia, umidade relativa, velocidade do vento e radiação solar, para previsão de poluentes, no qual apresentaram uma redução de 63,9; 48,7; 45,7 e 42,1%, respectivamente, para NO₂, CO, SO₂ e MP2,5 durante o isolamento, período com considerável redução do volume de tráfego local.

As análises do CO₂ realizadas por Gomes, Silva e Silva (2019) apresentaram o valor máximo igual a 1069ppm às 14:00, horário com temperatura máxima registrada no mês, de 34°C. A média de concentração na área de estudo ficou entre 500 e 800ppm. Nesse caso, a relação diretamente proporcional entre temperatura e CO₂ não é vista em todos os dias do período de coleta. Esse efeito pode ser justificado pela influência do clima local, afetado por variáveis como a velocidade e a direção dos ventos e a morfologia urbana, que são responsáveis por parte da dispersão e concentração dos poluentes no ambiente.

Por fim, considerando a influência das condições meteorológicas, alguns autores (Ari e Alagoz, 2022; Li *et al.*, 2023) otimizaram seus sensores de medição de poluentes atmosféricos ao acrescentar a coleta de dados de temperatura e umidade, tendo em vista que essas informações podem afetar a concentração de poluentes de uma localidade e a sensibilidade de medição do sensor.

Diante disso, a pesquisa associada a esta dissertação apresenta medições de poluição atmosférica coletadas junto a dados meteorológicos, comparando seus valores com a literatura e relacionando as variáveis. A presença de uma grande quantidade de dados, apesar do desafio da análise, pode gerar informações importantes sobre o comportamento climático de cada região e auxiliar na tomada de decisão para políticas públicas.

2.4 Modelos e ferramentas de análise de poluição atmosférica

Com o reconhecimento do impacto da poluição atmosférica na saúde pública e no meio ambiente, torna-se necessário o desenvolvimento de modelos computacionais para compreender e prever a distribuição dos poluentes na atmosfera. Esses modelos, em grande maioria, utilizam multivariáveis, como o tráfego veicular e características da infraestrutura ou do clima, e são capazes de formular estratégias para o controle das emissões ou mesmo mitigar os efeitos na saúde humana.

Para garantir a confiabilidade do modelo, a coleta de dados em campo se torna indispensável, permitindo que a previsão seja realizada a partir de dados reais. Essa abordagem

combinada permite previsões mais precisas e *insights* essenciais sobre o comportamento dos poluentes locais, contribuindo com as estratégias para melhoria da qualidade do ambiente urbano.

A obtenção e análise dos dados de poluentes, segundo Sakti *et al.* (2023), pode ser realizada de três formas principais: (i) modelagem da qualidade do ar a partir da previsão de valores futuros com base em histórico de dados, no qual assume-se a existência do histórico, (ii) recuperação de dados obtidos por imagens de satélite, chamado de sensoriamento remoto, (iii) medições diretas na superfície da Terra.

A modelagem é a área que mais cresce atualmente, utilizando conceitos teóricos e técnicas computacionais para simular a poluição atmosférica de outras regiões, sem a necessidade de nova coleta de dados (Lou *et al.*, 2023). Em alguns casos, combinam-se o uso de aprendizagem de máquina e informações espaciais para melhorar a compreensão do modelo (Tella e Balogun, 2022). A partir da revisão de literatura para a presente dissertação, os modelos computacionais de destaque são Regressão Linear/Regressão sobre uso do solo, Redes Neurais, *Deep Learning/Machine Learning* e Floresta Aleatória. Em geral, os modelos buscam compreender o comportamento da poluição a partir de determinadas variáveis e prever seus valores futuros a partir de reconhecimento de padrões, análise de banco de dados, Inteligência Artificial (*Artificial Intelligence* - IA), entre outros métodos. A modelagem tem como benefício uma análise rápida e eficiente de uma grande quantidade de dados, sejam eles reais ou previstos pelo modelo. Ainda assim, este método exige dados de entrada para realizar suas previsões, podendo ser dados brutos de poluentes ou informações que auxiliem na compreensão da poluição no meio urbano, como o uso de imagens em pontos georreferenciados.

O sensoriamento remoto analisa a poluição em níveis acima da atmosfera, no entanto, podem não cobrir a área específica de estudo e apresentar limitações para acesso aos dados. Geralmente as informações fornecidas são de variáveis secundárias, usadas para prever a qualidade do ar, como exemplo, o clima da região de estudo (Purwanto *et al.*, 2022), informações sobre a vegetação existente como auxílio para identificar a concentração de poluentes (Lou *et al.*, 2023), e, por último, podem fornecer dados de poluentes, coletados por estações de monitoramento existentes na região (Wei *et al.*, 2022). No entanto, ainda que os modelos computacionais auxiliem na obtenção de informações, e as variáveis secundárias ajudem no entendimento da poluição local, se faz necessário o uso de dados primários de qualidade do ar, coletados por equipamentos construídos ou estações de monitoramento.

A coleta de dados em campo tem como principal vantagem a observação da situação no nível dos receptores de poluição, ou seja, a população, assim a medição direta pode

apresentar limitações espaciais e dependem da disponibilidade de medidores. Alguns trabalhos utilizaram dados de estações de monitoramento mantidas por órgãos públicos, como acontece na Irlanda (Perillo *et al.*, 2022), Malásia (Tella e Balogun, 2022) e na China (Zhang *et al.*, 2022). Outros pesquisadores utilizam ferramentas obtidas em parcerias ou construídas pelos autores, com coleta de dados na área de interesse para o estudo (Azevedo *et al.*, 2015; Farrell *et al.*, 2015; Rocha, 2017; Chau *et al.*, 2022). No caso da cidade de Fortaleza, objeto da presente pesquisa, existem coletas realizadas tanto por órgãos públicos (na cidade e na região metropolitana) quanto por meio de pesquisas individuais em instituições. No entanto, essas coletas geralmente se limitam a pequenas áreas, e, nos casos em que cobrem uma extensão maior, apresentam dificuldades de acesso aos dados coletados.

2.4.1 Modelagem e estratégias de análise de dados para previsão de poluição

Como forma de validar os benefícios das mudanças a serem realizadas nas cidades, e até mesmo incentivar o investimento nas mesmas, as pesquisas buscam por modelos preditivos e simulações de cenários futuros.

Quando se trata de modelos preditivos, muitos trabalhos utilizam dados secundários, como os citados anteriormente, informações do espaço urbano (Farrell *et al.*, 2015; Kim *et al.*, 2018; Seaton *et al.*, 2022) e meteorologia da região (Li *et al.*, 2022; Purwanto *et al.*, 2022), para previsão de qualidade do ar, assim como, valores de volume médio de tráfego de veículos (Bachechi, Po e Rollo, 2022; Ponette-Gonzalez *et al.*, 2022).

O monitoramento constante da poluição atmosférica em países desenvolvidos auxilia na elaboração de tais modelos e simulações, tornando-os mais rápidos e eficientes por não necessitar de uma coleta de dados em campo e pela agilidade na execução dos modelos. Por este motivo, observa-se a grande demanda de profissionais especialistas em análise de dados ou programação, por exemplo, e grandes avanços nesta área no âmbito internacional.

Como exemplo, Xie *et al.* (2022) utilizaram um histórico de 4 anos de dados de emissão de MP2,5 na China, para verificar a confiabilidade do modelo construído, que usava simulação e observação em campo para correlação. O histórico de dados auxiliou os testes do modelo para previsão de qualidade do ar, como realizado por Ji *et al.* (2022), que utilizaram técnicas de algoritmos inteligentes para melhorar a precisão dos modelos.

Devido à dificuldade de medição em grandes áreas urbanas, Faraji *et al.* (2022) usaram informações de poluição atmosférica e de meteorologia disponíveis da cidade de Teerã, capital do Irã, para alimentar o modelo de previsão espaço-temporal, a partir de rede neural e aprendizado de máquina. Desta forma, com base nas características da localidade, o modelo

apresentou bons resultados de predição, com acerto nas estimativas de 84 e 78% das variações de MP, respectivamente, para a hora e dia seguinte.

O uso de simulação de cenários futuros a partir de variáveis existentes é uma forma de obter os resultados e a viabilidade de certas ações a serem implementadas. Na busca por uma infraestrutura de transporte integrada ao espaço público, Yang *et al.* (2020) apresentaram uma estratégia de simulação para a avaliação da qualidade do ar e do microclima. Os autores utilizaram inicialmente previsão de tráfego, seguido por previsão de poluentes emitidos, variação do microclima da região e, por fim, análise do conforto térmico urbano.

Como resultado, uma abordagem integrada entre a infraestrutura viária e o espaço urbano pode favorecer a qualidade do ar, o microclima e o conforto urbano local. Desta forma, os autores buscaram maneiras de otimizar as rotas realizadas pela população, associando o espaço urbano à abordagem azul-verde (áreas com lagos e vegetação) para auxiliar no conforto urbano.

Estudos voltados para a infraestrutura viária assumem modelos climáticos para prever como as mudanças extremas de temperatura poderão interferir no custo, manutenção e desempenho do pavimento asfáltico, e propõem atualização dos padrões de engenharia para incorporar registros climáticos atualizados, favorecendo o uso de modelos preditivos e proporcionando economias significativas na implementação da infraestrutura (Underwood *et al.*, 2017).

Gulzar, Goenaga e Underwood (2021) estudaram países em desenvolvimento de regiões tropicais, especificamente, Colômbia e Índia, indicados como mais vulneráveis e suscetíveis de experimentar um aumento da variabilidade da temperatura com o aquecimento global. A partir de 21 modelos climáticos, foram identificados os ambientes em que se espera temperaturas mais altas no pavimento e o máximo grau de desempenho padrão (PG) exigido em todos o país. O estudo destaca a importância de considerar as temperaturas futuras do ar e as suas consequências para o planeamento e concepção da infraestrutura do pavimento.

Dias (2019) estudou por meio de simulações a possível aplicação das Zonas de Baixa Emissão para a cidade de Fortaleza/CE, como forma de prever cenários com restrição de alguns tipos de veículos a partir do uso de dados de tráfego, de altura das edificações, de largura das vias e de emissões de poluentes.

O resultado da simulação das LEZ em Fortaleza gerou uma redução média de $9,53\mu\text{g}/\text{m}^3$ de NO_2 e $2,20\mu\text{g}/\text{m}^3$ de MP10, equivalente a diminuição em 9,2 e 9,9%, respectivamente. Apesar de ser uma porcentagem pequena, assumir zonas para áreas maiores na cidade pode resultar em uma diminuição significativa nos índices de poluição e melhoria na

qualidade de vida, tendo em vista que o cenário previsto conta com a melhoria na qualidade do ar, o incentivo ao uso de transportes coletivos e o aumento da tecnologia veicular.

Um dos problemas da análise de qualidade do ar em Fortaleza é a carência de medidores e, por conseguinte, a falta de dados coletados em tempo real disponibilizados para consulta. Por isso, é necessário o estudo de previsão de poluentes e de tráfego, como realizado por Dias (2019) e Yang *et al.* (2020), ou a medição manual para menores áreas de estudo, que possam ser exemplos para aplicação em áreas maiores. A comparação entre esses resultados pode contribuir com a construção de tecnologias mais limpas e com melhorias na qualidade de vida da população.

Por fim, um método eficiente para análise de dados usado na literatura é a interpolação, ideal para locais com carência de dados, limitação de coleta ou, até mesmo, quando os dados não estão disponíveis em sua totalidade. Busca-se estimar valores em função da distância e magnitude dos pontos coletados nas proximidades, baseado em informações espaciais para localização dos pontos, como apresentado por Réquia e Roig (2016) a partir do método de IDW – *inverse distance weighting*.

O IDW é um interpolador que considera que os pontos mais próximos entre si apresentam maior semelhança entre seus resultados, enquanto os mais distantes são independentes (Gomes, Zaidan e Rocha, 2023). Desta forma, entende-se que é possível interpretar os dados de uma grande área urbana sem que seja necessário o uso de uma grande quantidade de medições, ou seja, com poucos sensores ou estações de monitoramento mantidas por órgão públicos, que geralmente trabalham em menor número. Vale ressaltar que a interpretação dos dados por meio de *softwares* de georreferenciamento não substitui a coleta dos dados reais em campo.

De todo modo, as informações espaciais e georreferenciadas de qualidade do ar auxiliam no entendimento da poluição a nível de cidade. Como exemplo, o uso de uma rede de sensores, transportados por ônibus coletivos, foi suficiente para caracterizar a concentração de O₃ e NO₂ em um trecho da cidade de Juiz de Fora e da cidade de São Paulo. Santos *et al.* (2018) utilizaram projeções UTM e georreferenciamento, seguido de interpolações com técnicas baseadas na ponderação pelo inverso da distância (IDW), classificação e agrupamentos das informações e recortes, para delimitar os valores representados. Como resultado, as concentrações de O₃ foram críticas em ambientes mais arborizados, características comuns nas áreas urbanas, enquanto os valores NO₂ foram maiores em locais com maior volume de tráfego e congestionamentos.

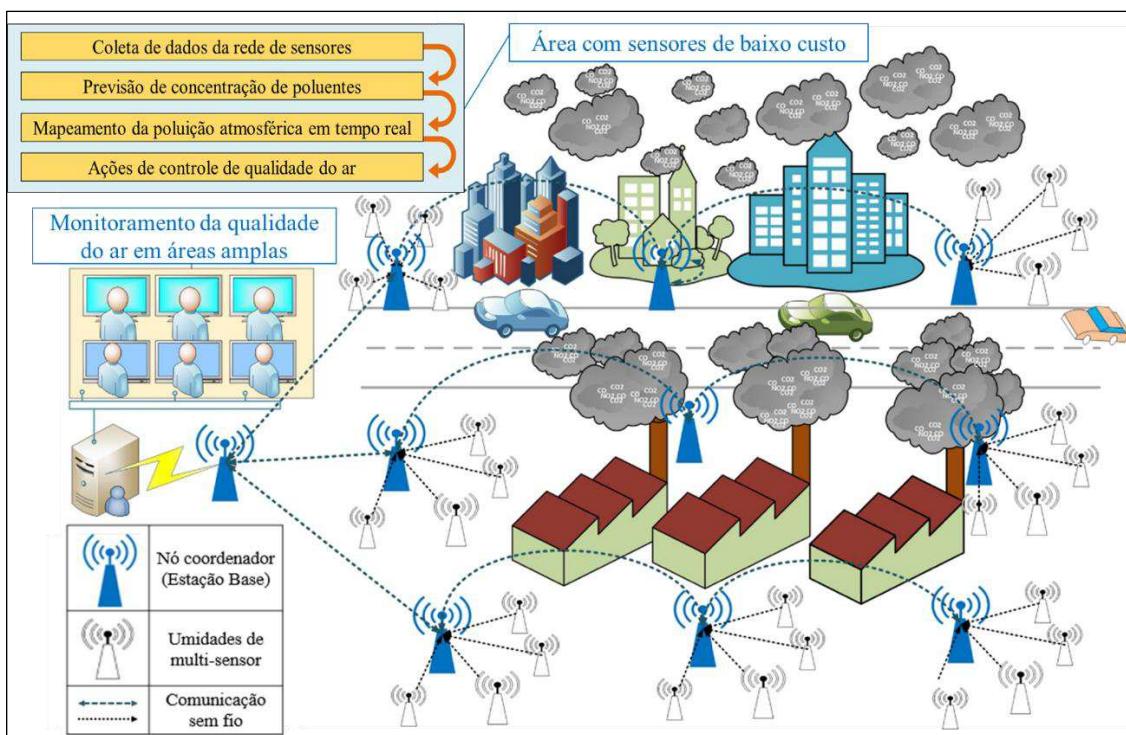
2.4.2 Coleta de dados em campo

Ao avaliar as alternativas de medição de qualidade do ar, bem como as dificuldades apresentadas para o uso de estações de monitoramento, medição em escapamentos e soluções de simulação e modelagem, alguns autores optam pela construção de sensores que possam coletar dados específicos e confiáveis no ambiente de estudo (Miranda, 2015; Ari e Alagoz, 2022).

Em geral, sensores utilizados em larga escala ou em grandes áreas urbanas são de baixo custo para viabilizar o estudo. Seu uso pode ainda ser limitado por não obter alta precisão ou por apresentar necessidade de elevados períodos de calibração e validação (Cowell *et al.*, 2023). No entanto, em sua maioria, pode ser usado sem comprometer os resultados em microrregiões urbanas, com a possibilidade de classificar os dados de acordo com os padrões estabelecidos (Miranda, 2015).

Para gerar uma estimativa mais precisa das concentrações de poluentes, especificamente, CO e NO₂, Ari e Alagoz (2022) obtiveram dados de medição com multisensores, para que o modelo de calibração suave se baseasse por dados em tempo real e de curto prazo. Como resultado, o modelo proposto aumentou o valor do coeficiente de correlação (R^2) em mais de 92% em relação as estimativas de concentração de poluentes analisadas no estudo. O esboço do monitoramento realizado pelos autores supracitados está apresentado na Figura 13, como exemplo para a análise da qualidade do ar em uma ampla área.

Figura 13 – Esboço do monitoramento da qualidade do ar em grande escala



Fonte: Adaptado de Ari e Alagoz (2022).

Sensores de baixo custo foram construídos para coleta de dados em alguns pontos na cidade de Recife, bem como para análise dos poluentes com o equipamento acoplado ao automóvel (Miranda, 2015). A pesquisa consistia na captação dos dados, na transmissão das informações de forma remota e no compartilhamento dos dados ambientais, buscando a vinculação à sistemas de mobilidade urbana. Como resultado, os autores comprovaram a possibilidade de coleta de dados consistentes sem a utilização de um sistema robusto. Neste caso, a calibração do sensor construído não foi foco da pesquisa, tendo em vista a dificuldade de acesso à dados existentes de órgão públicos de monitoramento.

Azevedo *et al.* (2015) utilizaram um sistema de retenção de material por meio de filtros e duas bombas *AirCheck* para análise das concentrações de partículas totais em suspensão (PTS), metais (Ferro-Fe, Cobre-Cu, Zinco-Zn e Chumbo-Pb) e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs). Para fins de comparação/validação dos resultados, um sistema *MiniVol* da *AirMetrics* foi utilizado para coletar PTS no mesmo ambiente. O estudo apresentou menor quantidade de PTS aos finais de semana, em que o tráfego é menor e HPAs provenientes da queima de diesel e demais combustíveis fósseis foram encontrados no trecho estudado, tendo sido relacionado ao fluxo de veículos como vans e ônibus.

Na cidade de Fortaleza, a coleta de dados em campo é bem disseminada pelas instituições de pesquisa (como apresentado no Tópico 2.1.2), como justificativa da insuficiência de informações monitoradas e disponibilizadas. Além do uso de sensores de baixo custo, para compreender o comportamento e as fontes de poluentes, análises químicas são realizadas com material coletado por meio de filtros.

Rocha (2017) utilizou dois tipos de equipamentos para coleta de dados: (i) um sensor portátil de alto custo, com uso de infravermelho para identificação das partículas carregadas com o vento, e (ii) uma estação fixa com filtros de vidro onde as partículas ficavam retidas e eram pesadas para análise. Os dados foram coletados durante o período chuvoso e seco em regiões de prática de atividades físicas na cidade de Fortaleza. Os resultados indicaram altos níveis de material particulado em ambientes com maior tráfego, e melhor sensação térmica em regiões com maior índice de vegetação.

O mesmo grupo de pesquisa realizou um estudo durante a pandemia de Covid-19, assumindo períodos antes, durante e após o bloqueio de tráfego de veículos na cidade. De forma geral, ocorreram reduções significativas de NO, NO₂, NO_x e CO em todos os períodos. No bloqueio parcial foram encontradas reduções respectivas de 50% e 34% para MP2,5 e MP10, em comparação ao período antes do bloqueio, prosseguindo com reduções 46% e 35% no período de bloqueio total. Esses resultados se devem à redução de quase 50% do tráfego de veículos no período estudado, bem como pelas reduções das atividades comerciais. Além disso, os riscos à saúde gerados pela emissão foram reduzidos pela metade durante o confinamento (Rocha *et al.*, 2022).

Marques *et al.* (2019) apresentam um estudo que envolve a coleta de dados em campo, por meio de amostrador de partículas e estação meteorológica móvel (Casella e Davis, também utilizados neste trabalho para obtenção de valores base meteorológicos e de poluição), com a análise espacial de edificações e arborização no ambiente, obtidas por meio de imagens de satélite. Foram 7 pontos de coleta em toda a cidade de Fortaleza, tendo em comum o uso das áreas próximas para atividade física e recreação. Como resultado, percebeu-se que o aumento de construções verticalizadas está relacionado à redução da cobertura arbórea, assim como os valores de MP são influenciados pelas características meteorológicas e que os maiores índices de arborização podem contribuir para a melhoria da qualidade do ar em áreas urbanas por influenciar na dinâmica de poluentes atmosféricos.

Desta forma, a construção de um sensor de baixo custo com a possibilidade de ser realocado pode ser uma ideia promissora tanto para ambiente interno como externo, o que justifica o crescimento de pesquisas nesta área (Chojer *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2020). Busca-se

a implementação de sensores inicialmente em pequenas áreas, com a finalidade de compreender os desafios de usabilidade e validar os dados obtidos a partir de equipamentos de referência, para que futuramente sua utilização em grande escala seja viável, a fim de obter um sensor de bom desempenho, durabilidade e estabilidade.

2.4.3 Uso da conectividade e inovação como contribuição para o Desenvolvimento Urbano Sustentável

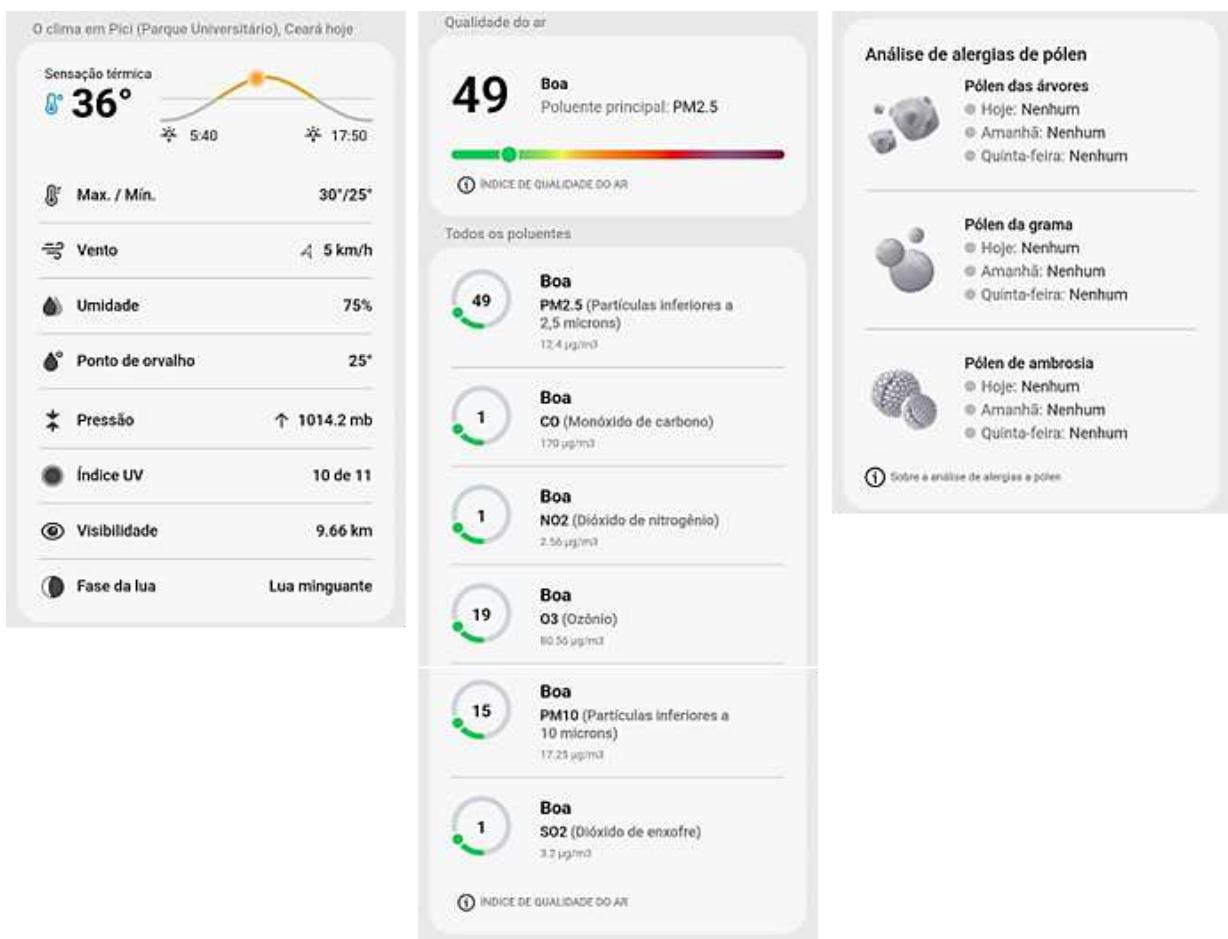
A coleta dos dados dentro do ambiente urbano está relacionada à conectividade entre setores, que podem acelerar e otimizar processos dentro da cidade. Essa ideia pode ser visualizada dentro do conceito de Cidades Inteligentes, que busca conexão entre atividades rotineiras para torná-las mais eficientes, econômicas e sustentáveis com foco no bem-estar da população. Desta forma, digitalizar as informações de uma cidade ajuda a estabelecer uma infraestrutura de dados, que se tornam base para a evolução das cidades modernas (Yin *et al.*, 2015; Ari e Alagoz, 2022).

A chamada computação móvel acessada por *smartphones*, *tablets* ou *notebooks* disponibiliza dados importantes para o comércio agir de forma lucrativa, ao mesmo tempo que o acesso à informação fornece aos usuários a liberdade e facilidade de escolha das atividades do dia a dia (Satyanarayanan, 2011). Esses dados englobam desde preferências de produtos, trabalhos e lazer, até informações de saúde, tráfego, rotas e clima.

Como exemplo, alguns dispositivos móveis apresentam dados de qualidade do ar obtidos do *The Weather Channel*, que é um canal de televisão dos Estados Unidos comprado em grande parte pela multinacional *International Business Machines Corporation* (IBM), que atualmente fica responsável pela análise dos dados climáticos, por exemplo. A seguir, estão apresentadas na Figura 14, exemplos de visualização dos dados obtidos por um computador no dia 29 de janeiro de 2024, sendo possível também obtê-los por aparelhos celulares.

O conceito de Cidades Inteligentes surgiu a partir dos desafios e problemas gerados pela rápida urbanização, embora existam grandes avanços em tecnologia e inovação que são implementados em outros países, algumas questões ainda devem ser abordadas e solucionadas, principalmente quando se considera a especificidade de cada localidade. Yin *et al.* (2015) afirmam que a economia, o transporte, a cultura, entre outros aspectos, está atualmente combinada com a revolução da Tecnologia da Informação e Comunicação, com a internet parte importante da vida dos cidadãos.

Figura 14 – Visualização de dados de dispositivos móveis



Fonte: Adaptado de *The Weather Channel* (2024).

Uma redação divulgada pela OMS (2021b) apresentou a ideia de um *design* urbano chamado “*Superilla*”, ou “*Superblock*”. Aplicado em Barcelona em 2016, desejava-se tratar o desenvolvimento da cidade com prioridade para pedestres, seguido por ciclistas e transporte público, na busca pela redução da poluição atmosférica proveniente do tráfego, melhoria dos espaços verdes e atividades em conjunto para os cidadãos. O objetivo foi alcançado e, com isso, uma redução considerável foi apresentada nos níveis de NO₂, elemento estudado na pesquisa.

Além disso, um estudo de previsão de impacto estimou que 667 mortes prematuras poderiam ser evitadas anualmente com a implementação dos 503 *Superblocks* previstos, ao considerar que a proporção de óbitos está atribuída à níveis de NO₂, níveis de ruído, níveis de calor e desenvolvimento de espaços verdes (Mueller *et al.*, 2020). Em 2021, com apoio da *Partnership for Healthy Cities*, a ação foi considerada um sucesso e está de acordo com os assuntos relacionados à Cidades Inteligentes.

Um dos problemas apresentados para alcançar a melhoria na coleta e análise dos dados é a capacidade dos sistemas de armazenar grande quantidade de informações. Segundo

Armbrust *et al.* (2010), nos últimos 10 anos analisados (2000 a 2010) a computação em nuvem ganhou espaço em diversos setores, o que permitiu o fornecimento de serviços com rapidez, sem a necessidade de um grande reembolso de capital ou uma grande equipe de operação.

Em muitos casos, mudanças nas cidades podem gerar desconforto para alguns usuários e elevar alguns custos nos domínios governamentais. Um estudo realizado por Przeybilovicz *et al.* (2018) demonstrou a aplicação de uma governança eletrônica com Tecnologia da Informação para desenvolver cidades inteligentes no Brasil. O resultado apresentou um grande receio das autoridades municipais de aderir aos conceitos de cidades inteligentes que abrangem a participação ativa do cidadão, o que dificulta a aplicação de novas estratégias, mesmo que forneçam maior eficiência e sustentabilidade.

Como exemplo, Miranda (2015) apresentou um trabalho com uso de sensores de baixo custo sem fio, para coleta de dados de qualidade do ar e correlação com outros fenômenos. O sensor apresentou não somente resultados condizentes com a realidade, como também identificou picos de poluição em ambientes com congestionamentos, o que caracteriza a concentração de poluição e melhor custo-benefício para sua aplicação em larga escala, principalmente quando em parceria com órgãos públicos ou empresas responsáveis pela mobilidade da população.

2.5 Considerações finais sobre a revisão de literatura

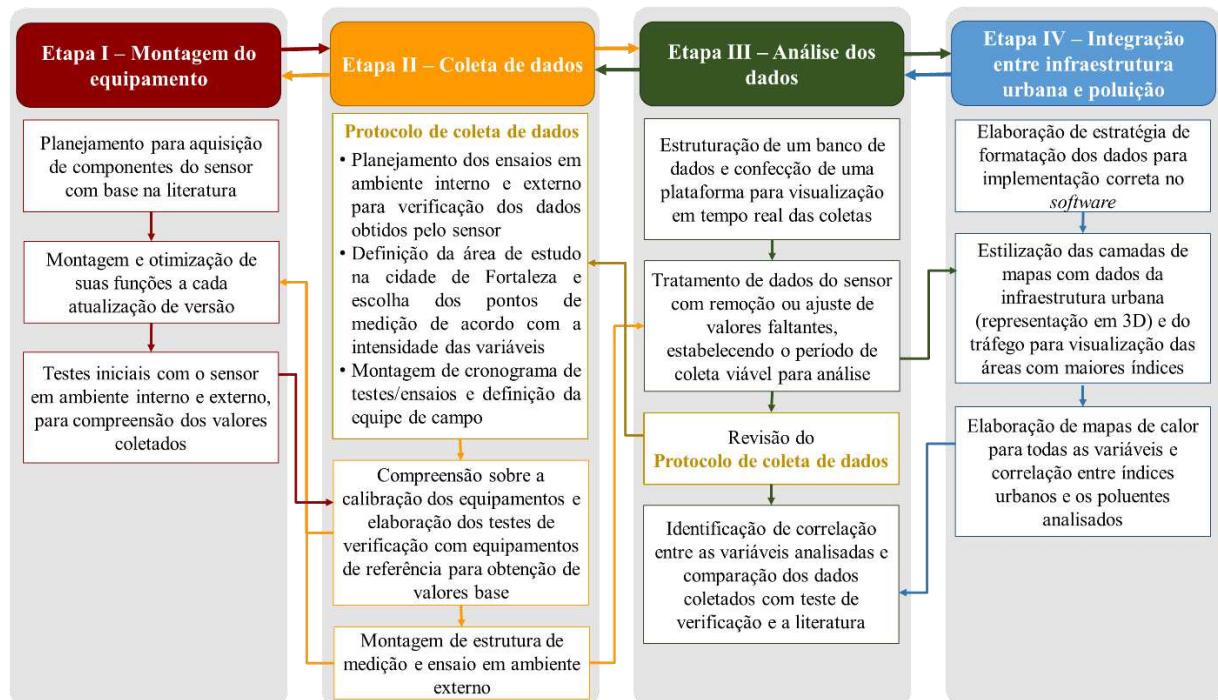
A revisão bibliográfica neste capítulo oferece uma visão detalhada sobre poluição atmosférica e seu monitoramento, abordando desde contextos globais até especificidades regionais no Brasil e Ceará. A investigação do impacto do setor de transportes na emissão de poluentes revelou a importância de fatores como a condição das vias, os tipos de veículos e combustíveis utilizados, e o volume de tráfego. Destaca também a influência da estrutura urbana e condições meteorológicas na qualidade do ar, sublinhando a complexidade desses fatores e a importância de modelos e ferramentas para a análise e coleta de dados ambientais.

Essencialmente, a revisão não apenas destaca a relevância da investigação do tema, mas também fornece ideias críticas sobre como abordagens de monitoramento acessíveis podem ser desenvolvidas e aplicadas. A utilização de um equipamento de baixo custo representa um passo inovador no monitoramento da qualidade do ar, visando contribuir para o acervo científico e para o desenvolvimento de políticas públicas eficientes.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa relativa a esta dissertação foi dividida em 4 etapas. A Etapa I está relacionada à aquisição de materiais e construção do sensor; a Etapa II trata do planejamento para coleta dos dados, com testes em ambiente controlado (internos) e ensaios em ambiente externo, contando com caracterização da área de estudo e ida a campo para realização das medições; a Etapa III abrange a análise e o tratamento dos dados coletados com base nos testes de verificação, comparando-os com os valores apresentados na literatura, assim como análise dos níveis de poluição da área de estudo; e a Etapa IV compreende o cruzamento dos dados de infraestrutura urbana e de poluição, com a confecção dos mapas de calor, representação em 3D e identificação dos pontos mais críticos da área de estudo (Figura 15).

Figura 15 – Esquema das etapas metodológicas



Fonte: Elaborada pela autora.

As setas na figura acima indicam que o processo metodológico desta pesquisa foi iterativo, ressaltando que, mesmo após a conclusão de uma etapa, foi necessário revisitar e refinar os procedimentos anteriores em resposta à evolução do equipamento, aos resultados dos testes e aos dados obtidos. Um equipamento de sensor de baixo custo - suscetível a falhas e dados inconsistentes - exigiu uma revisão constante das etapas para assegurar a coleta de dados alinhados com a realidade e com os padrões estabelecidos pela literatura. Essa flexibilidade no

método permitiu que ajustes fossem feitos para manter a confiabilidade dos resultados, o que é crucial quando se trabalha com tecnologia em fase de desenvolvimento.

Por fim, foi elaborada uma figura esquemática (Figura 16) que explica a metodologia utilizada para avaliação dos bairros Meireles e Aldeota com especificações de horário, data, duração e local escolhido para o ensaio, com base no elevado tráfego das vias, características da infraestrutura urbana, estrutura de cânions e locais escolhidos para segurança no manuseio dos equipamentos.

Figura 16 – Figura esquemática



Fonte: Elaborada pela autora.

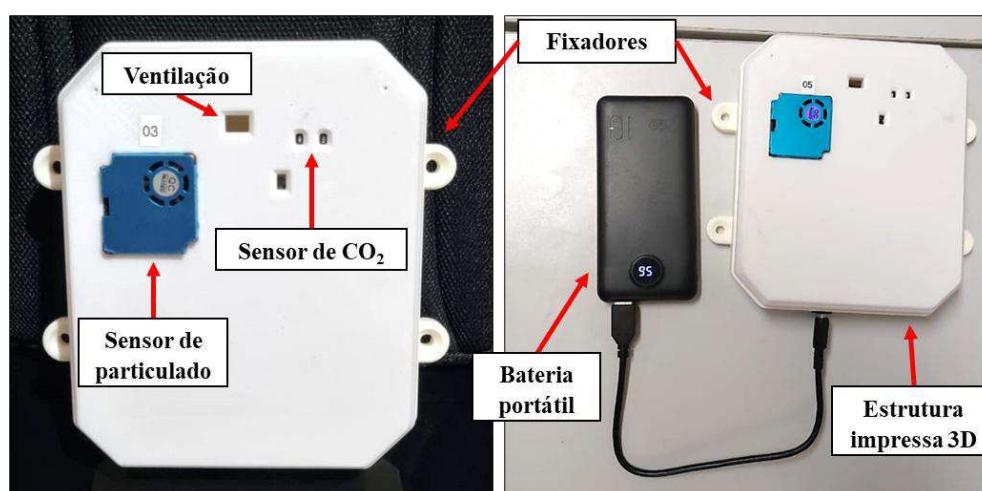
Por serem afeitas a Materiais e Métodos, ou seja, a Metodologia da pesquisa, neste capítulo serão especificadas as Etapas I e II (Figura 15), caracterizando os componentes do equipamento, as etapas construtivas do equipamento, a caracterização da área de estudo e o detalhamento do protocolo de coleta de dados. As outras duas etapas são objetivo do capítulo seguinte.

3.1 Obtenção de componentes para montagem do equipamento

O equipamento foi construído em parceria realizada por dois laboratórios, um da Engenharia de Teleinformática e outro associado a Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, o Laboratório de Mecânica dos Pavimentos do INCT-Infra, ao qual a autora é vinculada. Foram escolhidos componentes atestados em pesquisas anteriores no meio acadêmico relacionadas à medição de qualidade do ar. Como o desenvolvimento e construção do equipamento fazem parte de projeto financiado neste trabalho os sensores usados serão omitidos.

O equipamento construído apresentado na Figura 17, denominado *Sensenet* versão 3.0, realiza medições de poluentes do tipo material particulado e CO₂, e coleta dados meteorológicos de temperatura e umidade. As informações são transportadas via *wi-fi* para uma plataforma de armazenamento de dados, sendo possível visualizar os dados coletados em tempo real e garantir a conectividade do equipamento em campo.

Figura 17 – *Sensenet* 3.0



Fonte: Elaborada pela autora.

O sensor apresentou atualizações para otimização de seus resultados a partir de testes realizados com as versões anteriores, como será explanado no Tópico 3.2, tanto em ambiente controlado como em meio externo. Uma vez mais, devido à confidencialidade do projeto, a nomenclatura técnica dos componentes foi omitida, mas as identificações necessárias são apresentadas na Tabela 8, junto à descrição do funcionamento e os parâmetros obtidos, o que possibilita sua reprodução para outros trabalhos de pesquisa e desenvolvimento que se interessem em partir das contribuições desta dissertação.

Tabela 8 – Especificação dos componentes do *Sensenet*

Identificação	Descrição	Parâmetros
Sensor de Partículas	Sensor de detecção de poeira que utiliza pás do ventilador em seu interior para conduzir o ar através da câmara de detecção, na qual as partículas são reconhecidas em diferentes tamanhos por meio de um <i>laser</i> , obtendo-se amostras com testes contínuos em tempo real. Tensão operacional de 3,3 a 5,0V.	Medição de MP1,0, MP2,5 e MP10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Sensor de CO ₂ , Temperatura e Umidade	Sensor utilizado para coleta de dados de CO ₂ , com precisão de $\pm 30\text{ppm}$ (+ 3%), fornece informações de temperatura e umidade ambiente. Tensão de alimentação de 3,3 a 5,5V.	Medição de CO ₂ [ppm], Temperatura [°C] e Umidade [%]
Minicomputador [Placa Raspberry Pi]	Composto por uma série de minicomputadores de placa única multiplataforma, de tamanho reduzido com componentes integrados, que se conecta a um monitor de computador.	-
Regulador de Data/Hora [RTC]	Componente usado para atualizar informações de data e hora da Placa Raspberry Pi. Tensão operacional de 2,3 a 5,5 V.	Data e hora
Bateria para RTC	Componente necessário para manter o RTC em funcionamento constante.	-
Bateria portátil	Bateria portátil com entrada e saída do tipo C.	-

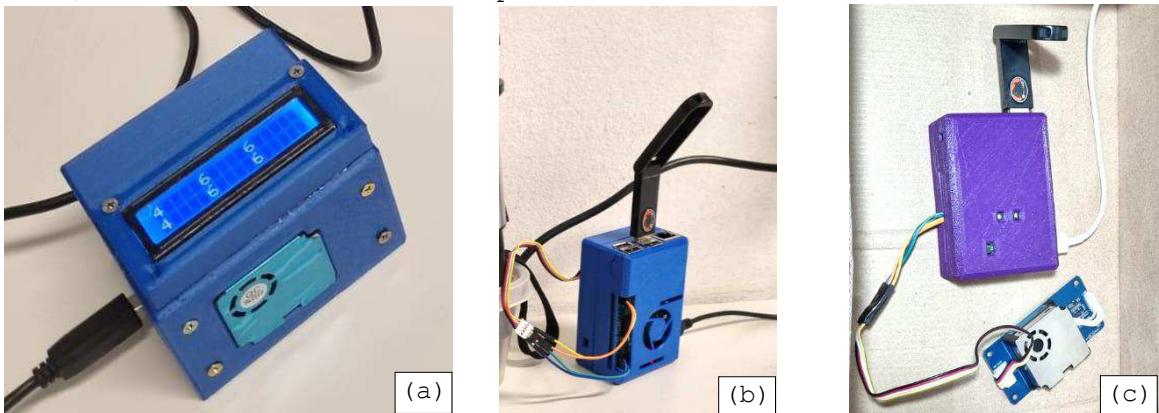
Fonte: Elaborada pela autora.

3.2 Evolução da construção do *Sensenet*

A construção do equipamento exigiu testes para aprimorar as medições realizadas e o desempenho da estrutura. Por este motivo, a Figura 18 apresenta algumas modificações realizadas no equipamento, que sofreram atualizações no decorrer dos ensaios realizados para sua calibração.

Figura 18 – Evolução do *Sensenet***Sensenet 1.0**

- (a) Versão inicial com coleta de material particulado (MP1; MP2,5; MP10) em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ com tela LCD para visualização das concentrações. Conexão com computador como fonte de energia e dados salvos manualmente;
- (b) Coleta de material particulado (MP1; MP2,5; MP10) em $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Conexão com carregador como fonte de energia (tomada) e dados salvos no pen drive;
- (c) Coleta de material particulado (MP1; MP2,5; MP10) em $\mu\text{g}/\text{m}^3$, CO_2 em ppm, temperatura e umidade. Conexão com carregador como fonte de energia (tomada) e dados salvos no pen drive;

**Sensenet 2.0** (Versão usada na Rodada 1 de testes)

Coleta de material particulado (MP1; MP2,5; MP10) em $\mu\text{g}/\text{m}^3$, CO_2 em ppm, temperatura e umidade. Conexão com bateria portátil como fonte de energia e dados salvos no pen drive.

**Sensenet 3.0** (Versão Final – usada na Rodada 2 de testes)

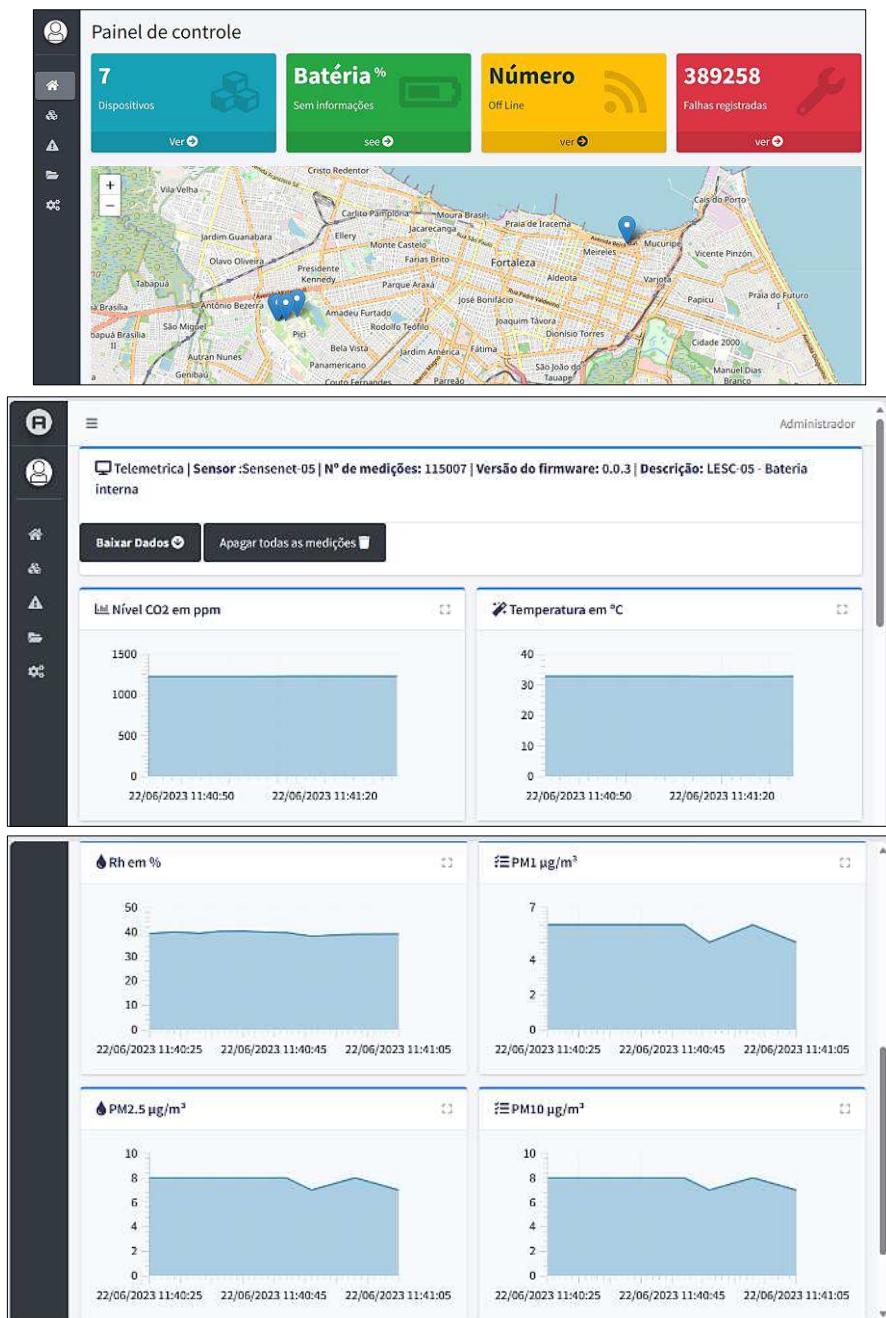
Coleta de material particulado (MP1; MP2,5; MP10) em $\mu\text{g}/\text{m}^3$, CO_2 em ppm, temperatura e umidade. Conexão com bateria portátil como fonte de energia e dados salvos em pen drive.



Fonte: Elaborada pela autora.

O presente trabalho utilizou as versões 2.0 (rodada 1 de ensaios) e 3.0 (rodada 2 de ensaios, sendo a rodada principal para este estudo). Na versão 3.0, todos os componentes estão inseridos dentro da estrutura construída com impressão 3D para proteção contra intempéries climáticas que poderiam mascarar os dados coletados. Os dados foram armazenados continuamente na nuvem e visualizados a partir de *dashboard* (Figura 19). O sensor é equipado com uma bateria portátil, viabilizando os ensaios em ambiente externo, e apresenta conexão contínua com a internet, neste caso, com a rede de 4G do celular.

Figura 19 – *Dashboard* para visualização de dados do *Sensenet*



Fonte: Elaborada pela autora.

As atualizações do *dashboard* permanecem em constante evolução durante os testes, tendo em vista que a versão 3.0 não será a última. Em paralelo às medições em campo foram realizados testes com o microfone, para obtenção de ruído do ambiente urbano, testes com o sensor de compostos orgânicos voláteis (VOCs), sendo estes compostos de grande influência para a saúde. Por fim, para viabilizar o uso do sensor em qualquer ambiente ou usuário, atualizações referentes às ações de ligar/desligar, acesso à internet, autocalibração, entre outras, vêm sendo testadas e implementadas na plataforma.

3.3 Descrição dos equipamentos utilizados e estrutura de medição

Como citado anteriormente, esta pesquisa conta com um equipamento construído do zero, de nome *Sensenet*, para coleta de dados de poluição e variáveis meteorológicas, o qual está descrito a seguir. Os dados do *Sensesnet* foram analisados a partir de um teste de verificação junto aos equipamentos de referência *Casella* e *Davis*, listados abaixo. Esta etapa foi essencial para obtenção de médias aceitáveis para a área de estudo.

- Equipamento com detecção de partículas e de variáveis meteorológicas - *Sensenet* versão 3.0: Coleta de material particulado de 1,0; 2,5 e 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (MP1,0; MP2,5; MP10), temperatura e umidade. O equipamento, conforme Figura 20, possui como fonte uma bateria portátil, que lhe fornece uma autonomia de 5 a 6h de medição ininterrupta e dados salvos automaticamente em uma plataforma *online*. É necessário um período de aproximadamente 30 minutos ligado para que os dados se estabilizem automaticamente e a coleta se mantenha estável. Além disso, medições em ambiente interno foram realizadas com o *Sensenet* para compreensão dos valores coletados, a partir de testes de precisão e de performance realizados com os equipamentos de referência. O equipamento é instalado verticalmente na estrutura de medição para otimizar a coleta das partículas dispersas no ambiente. Uma luz de LED interna sinaliza que o equipamento está ligado e a conexão com o *wi-fi*, assim como confirmação de armazenamento os dados, é realizada por meio da plataforma *online*, que indica quando o equipamento está em pleno funcionamento.

Figura 20 – *Sensenet* versão 3.0



Fonte: Elaborada pela autora.

Os itens listados a seguir são os equipamentos de referência utilizados em testes de precisão e de performance em ambientes internos e para testes de verificação e calibração das variáveis coletadas pelo *Sensenet* em ambientes externos. Nesses casos, foram realizados ensaios estáticos em ambiente externo para comparação entre os valores coletados e obtenção de coeficientes de correção ou médias de concentração para as variáveis de MP2,5, CO₂, temperatura e umidade, a partir dos parâmetros da cidade de Fortaleza/CE.

Além disso, os equipamentos foram levados a campo junto ao *Sensenet*, para que análises conjuntas fossem realizadas com todos os equipamentos na região, já que a área de estudo não apresenta coleta de dados atmosféricos e meteorológicos em sua totalidade.

- Amostrador de partículas – Casella Cel-712 *Microdust Pro Real-Time Dust Monitor*: Coleta de partículas totais em suspensão (PTS) em mg/m³. A calibração do equipamento, apresentado na Figura 21, é realizada de forma manual e são utilizados fatores de correção para obtenção dos valores de MP2,5 e MP10 a partir do valor de PTS. Os valores de correção utilizados foram obtidos no trabalho de Rocha (2017), parâmetros estes para Fortaleza/CE, e, especificamente, na região do LABOMAR. A autora obteve os fatores de correção a partir de uma análise entre o analisador de partículas Casella e o equipamento Hi-Vol, caracterizando a área de estudo como residencial e comercial. Os dados analisados em 2016 resultaram em uma relação de 45% entre MP2,5 e PTS e de 73% entre MP10 e PTS, portanto, os valores obtidos pelo amostrador (recebidos em formato .csv) são multiplicados por 0,45 e 0,73 para obtenção dos valores de PM2,5 e MP10, respectivamente, em seguida, transformados em µg/m³ (x 1.000). O Casella é carregado com 3 pilhas AA que fornecem cerca de 12h de autonomia.

Figura 21 – Casella Cel-712 Microdust Pro



Fonte: *Sunbelt Rentals e Clean Environment Brasil* (2024)

- Amostrador de ar de grande volume – Hi-Vol 3000: Amostrador de partículas de grande volume (Figura 22), aspira ar do ambiente com vazão controlada através de um filtro com velocidade uniforme. Contém bocas seletivas para MP2,5, MP10 e PTS, a determinação deste último corresponde a uma faixa de valores de concentração que varia de 2 a $750\mu\text{g}/\text{m}^3$. O equipamento possui filtro retangular de 250 x 200mm, no qual as partículas ficam armazenadas durante o período de coleta, utilizado apenas para o teste de verificação em ambiente externo. Ao fim do ensaio, os filtros são removidos e as partículas pesadas, proporcionando o verdadeiro controle de fluxo volumétrico dos poluentes.

Figura 22 – Amostrador de ar de grande volume – Hi-Vol 3000



Fonte: Ecotech (2024).

- Estação meteorológica móvel – *Davis*: Estação autônoma (Figura 23), utilizada com bateria interna, fornece dados de temperatura, umidade, assim como informações de velocidade e direção do vento, pressão atmosférica e precipitação, que não foram utilizadas nesta pesquisa. A estação funciona com auxílio de um Console (com monitor para visualização dos dados), alimentado por 3 pilhas tamanho CC, para armazenamento dos dados (extraídos no formato de texto) e análise das variáveis em tempo real, apresentando principalmente a variação da temperatura e umidade interna e externa à estação.

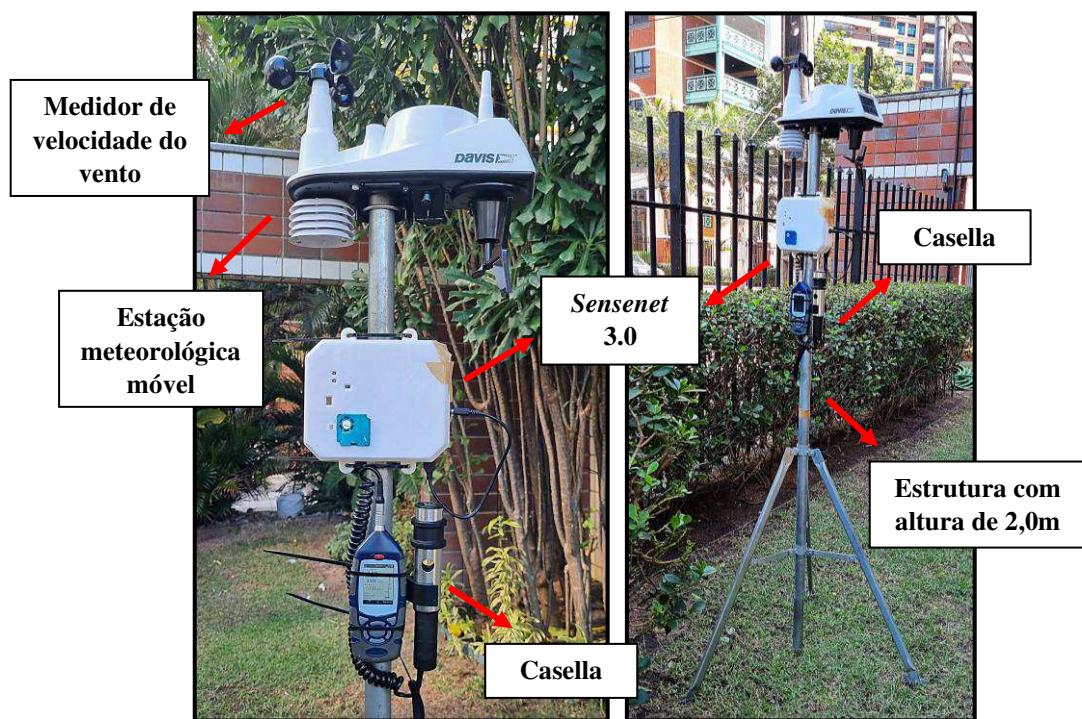
Figura 23 – Estação meteorológica móvel – *Davis*



Fonte: Agrosensores (2024).

Sensenet, Casella e estação *Davis* foram acoplados em uma única estrutura e os procedimentos de calibração ou conectividade foram realizados em todos os dias de coleta. A estrutura montada para medição das variáveis em campo está apresentada na Figura 24. Para esclarecimento, embora todos os equipamentos tenham sido utilizados para coleta de dados no ambiente urbano, apenas os dados do *Sensenet* foram considerados para os resultados deste trabalho. Os demais equipamentos serviram de suporte para a análise dos resultados e para obtenção dos valores bases de poluição. Desta forma, não foi realizada uma comparação entre os sensores para ambiente externo para cada ponto, sendo feito apenas durante os testes de verificação e ensaios em ambiente interno.

Figura 24 – Estrutura de medição



Fonte: Elaborada pela autora.

Em todos os dias de coleta, a estrutura foi montada no laboratório (LABOMAR) e transportada até o local de medição, necessitando de um tempo médio de 40 minutos para ligar os equipamentos, calibrar o Casella, conectar a estação meteorológica e o *Sensenet*, e montar a estrutura, de modo a manter todos os equipamentos a uma altura entre 1,5 e 2,0m em relação ao solo (Neves *et al.*, 2019, 2023), sendo a altura necessária para obtenção de parâmetros atmosféricos a nível de caminhada (altura dos pedestres). De uma forma geral, os equipamentos necessários para coleta de dados desta pesquisa foram:

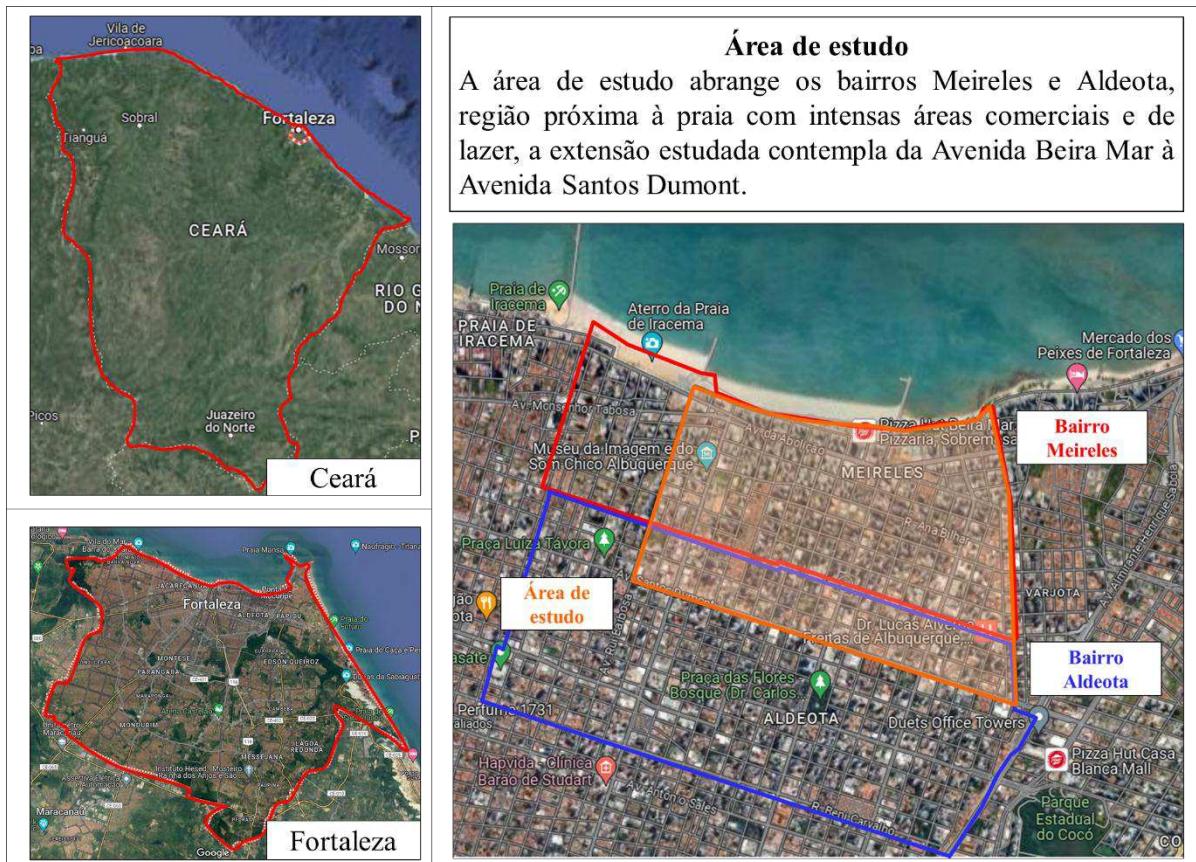
- Sensor construído (*Sensenet* versão 3.0);
- Bateria portátil com autonomia de 6 horas para funcionamento do *Sensenet*;
- Amostrador de partículas Casella;
- Estação meteorológica móvel *Davis* + Console para armazenamento das leituras;
- Estrutura de apoio para estação meteorológica (coleta a 1,80m do chão);
- Lacres para fixação dos equipamentos (Casella e *Sensenet* 3.0) à estrutura de apoio da estação móvel.

3.4 Seleção e Detalhamento dos Locais de Coleta

A coleta de dados ocorreu dentro da cidade de Fortaleza/CE, abrangendo os bairros Meireles e Aldeota (Figura 25), região com estrutura de cânions urbanos conhecida. Os bairros

apresentam edifícios altos e residências, em grande maioria, com muito comércio local que recebe turistas em grande parte do ano, principalmente por incluir uma das principais avenidas à beira mar. A ventilação intensa e a maior largura das vias podem contribuir nos baixos níveis de poluição.

Figura 25 – Planta de situação



Fonte: Elaborada pela autora.

Os bairros foram escolhidos por apresentarem alguns dos maiores índices de vínculos empregatícios com elevado fluxo de pessoas e veículos ao longo do dia. Percebe-se na Figura 26 que o bairro Centro tem a maior taxa de vínculos (cerca de 92.500), no entanto, o ambiente não apresentava segurança para a coleta dos dados. Assim, decidiu-se realizar as coletas no 2º e no 3º bairro com os maiores vínculos empregatícios ativos, somando aproximadamente 88 mil vínculos para os dois bairros. Além disso, Meireles e Aldeota, respectivamente, são caracterizados em 1º e 2º lugar pelo maior Índice de Desenvolvimento Humano - IDH da cidade, estando entre os 10 primeiros lugares no ranking de Educação, Longevidade e Renda (Fortaleza, 2022).

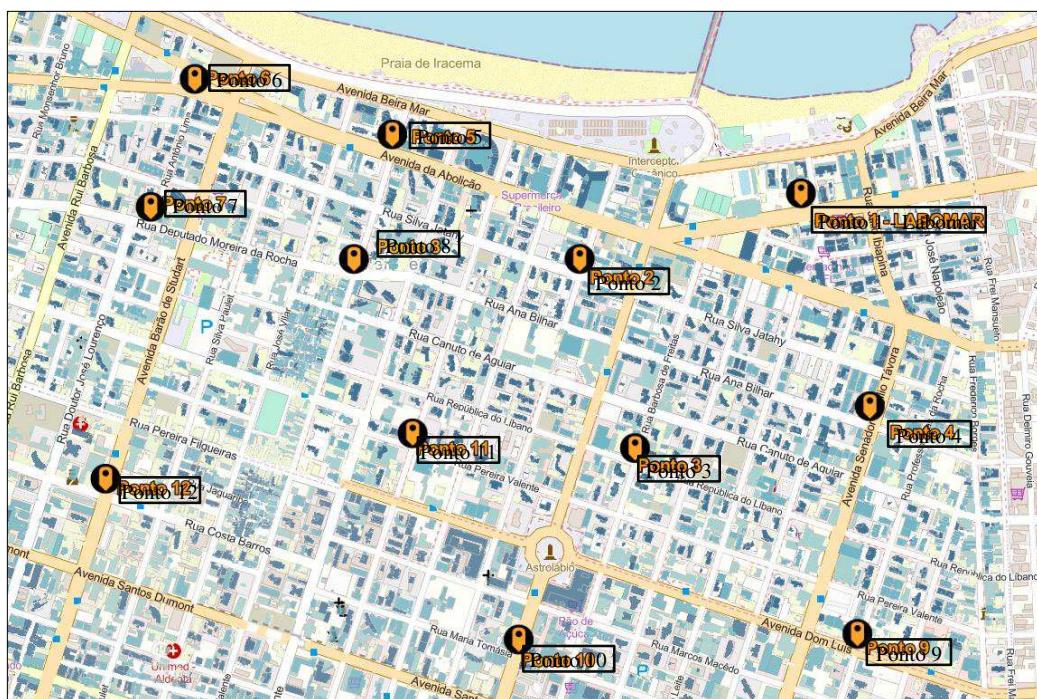
Figura 26 – Estimativa de vínculos empregatícios ativos nos bairros Meireles e Aldeota



Fonte: Adaptado de Fortaleza (2022)

Já os pontos de coleta foram escolhidos levando em consideração a presença de cânions urbanos e vias de maior tráfego de veículos e de circulação de pessoas, considerando a área urbana analisada. Cada um deles está locado em interseções entre duas vias principais ou pontos na quadra com edifícios mais altos no bairro. Um critério importante foi iniciar as coletas no LABOMAR (Ponto 1), visando um ambiente seguro para tal e uma equipe disponível para eventuais problemas iniciais, seguindo para pontos com distâncias aproximadas de 500m entre si. Algumas variações na distância foram necessárias, pois em alguns casos a distância prevista estava locada em um ambiente sem sombra e com pouca segurança para a equipe e para os equipamentos. Os pontos estudados estão apresentados na Figura 27.

Figura 27 – Distribuição dos pontos de medição na área de estudo



Fonte: Elaborada pela autora.

A Figura 27 representa os pontos em um mapa com classificação de cânions da área de estudo, em que as cores mais escuras (azul escuro) representam os cânions maiores e as cores mais claras (azul claro e bege) representam os cânions menores. Esse mapa foi confeccionado a partir de dados de altura das edificações e largura das vias disponíveis em plataformas de órgão públicos. Para tal, um algoritmo foi desenvolvido no *software* QGIS seguindo os seguintes passos:

- I. Desenho de forma manual de linhas que representavam as vias e linhas perpendiculares até as edificações mais próximas;
- II. As linhas construídas foram utilizadas para obtenção da distância entre os prédios, que seria comparada à altura deles;
- III. A comparação realizada se tratava de uma divisão entre a altura da edificação (H) e a distância entre edificações (L), classificando os cânions de acordo com a métrica estabelecida por Vardoulakis *et al.* (2003), variando entre 0,5, 1 e 2 para cânions baixos, regulares e profundos;
- IV. Um algoritmo foi desenvolvido para este cálculo na ferramenta *Model Builder* no QGIS, que produz um código treinado para fazer previsões e permite a otimização de análises espaciais em lotes (“batch”), ou seja, podem ser executados utilizando várias entradas e quantas vezes forem necessárias, o que otimiza o processo para usos futuros;

V. Por fim, a cor mais intensa foi usada para identificar cânions maiores e as cores mais claras para cânions menores.

Vale ressaltar que em nenhum dos casos os cânions foram classificados como profundos ($H/L = 2$), mas suas respectivas variações foram representadas. A localização dos pontos formou uma malha no mapa para possibilitar a realização da interpolação dos dados em *software*, de modo a obter uma estimativa de valor para os pontos intermediários e construir um mapa de poluição atmosférica do perímetro da área de estudo. Os pontos escolhidos estão apresentados na Figura 28 e o detalhamento de cada ponto foi explorado no Apêndice A.

Figura 28 – Endereço e características físicas dos pontos de coleta

Ponto 1

Av. da Abolição com Rua Júlio Ibiapina



Ponto 2

Rua Silva Jatahy com Rua Visconde de Mauá



Ponto 3

Rua República do Líbano com Rua Barbosa de Freitas



Ponto 4

Avenida Senador Virgílio Távora com Rua Ana Bilhar



Ponto 5

Avenida da Abolição com Rua Nunes Valente



Ponto 6

Avenida Monsenhor Tabosa com Rua Antônio Lima



Ponto 7

Rua Deputado Moreira da Rocha com Rua Antônio Lima



Ponto 8

Rua Deputado Moreira da Rocha com Rua Nunes Valente



Ponto 9

Avenida Dom Luís com Rua Professor Dias da Rocha



Ponto 10

Avenida Desembargador Moreira com Rua Maria Tomásia



Ponto 11

Rua Pereira Valente com Rua Joaquim Nabuco



Ponto 12

Avenida Barão de Studart com Rua Costa Barros



Fonte: Elaborada pela autora.

3.5 Protocolo de coleta de dados

A coleta dos dados foi dividida em duas rodadas (1 e 2). A Rodada 1 foi realizada com a versão 2.0 do *Sensenet*, pois o sensor ainda estava em fase de teste e otimização das funções. Estabeleceu-se os primeiros pontos de medição (Pontos 1, 2, 3 e 4) com coleta de dados em forma de rodízio durante 4 dias, ou seja, em um único dia, realizavam-se medições nos 4 pontos, assim tinha-se 1 hora de coleta por ponto em um único dia, conforme a Tabela 9.

Tabela 9 – Protocolo de medição da Rodada 1 – Dias e horários de coleta.

Dia da semana	Data	09:00 – 10:00	10:30 – 11:30	12:00 – 13:00	13:30 – 14:30
Terça	25/04/2023	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4
Quarta	03/05/2023	Ponto 4	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
Quinta	11/05/2023	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 1	Ponto 2
Terça	23/05/2023	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 1

Fonte: Elaborada pela autora.

O tempo de ensaio foi limitado pelas fontes de energia disponíveis. O *Sensenet* estava acoplado a uma bateria portátil que iniciava seu funcionamento por volta das 8:30, descarregando antes das 15h. Esperava-se utilizar dados de volume de tráfego disponibilizados pela Autarquia Municipal de Trânsito e Cidadania (AMC), no entanto seus dados se baseavam no tráfego médio por via, e, como a análise focava em um ponto específico, foi definido que a contagem do tráfego seria mais apropriada.

Assim, a partir do 3º dia de coleta, o tráfego foi estimado com contagem a cada 10 minutos, ou seja, passava-se 10 minutos contando os veículos e o valor total era registrado, seguindo esse processo durante todo o período de coleta, aproximadamente 4 horas. Nos casos em que houve intervalo (de no máximo 10 minutos) para a equipe, os valores faltantes foram ajustados com a média de valores próximo, para manter a base de dados completa e de acordo com as características do ambiente e horário de medição. Foram considerados nessa análise apenas os veículos automotores de passeio, visto que estes apresentaram maior percentual se comparados aos caminhões e às motocicletas (< 5% do total de veículos).

A estratégia de coleta de dados em forma de rodízio (4 pontos analisados em um dia) dispersou os valores de poluição de tal maneira que impossibilitou a análise da evolução dos poluentes no decorrer do dia, havendo quebras inexplicáveis na evolução das concentrações dos poluentes (Tópico 4.1.1). Essa rodada inicial de coleta de dados foi crucial para compreender as limitações do equipamento e da metodologia escolhida. Os ajustes foram

realizados para a Rodada 2, composta por medições em mais 8 pontos da cidade, refazendo ainda as coletas dos pontos 1 a 4. Desta forma, foi utilizado o *Sensenet* versão 3.0, o qual apresenta calibração ajustada para todos os parâmetros, e a contagem do tráfego em todos os dias de medição, seguindo a estratégia apresentada anteriormente.

A Tabela 10 apresenta os dias e horários de coleta, nos quais foram analisados um ponto por dia com duração aproximada de 4h de coleta, totalizando 12 pontos de medição no intervalo de julho (final do mês, com apenas dois dias de ensaios) a setembro de 2023. Desejava-se aumentar a quantidade de pontos para ampliar a área de estudo e auxiliar na precisão da interpolação.

Tabela 10 – Protocolo de medição da Rodada 2 – Dias e horários de coleta.

Dia da semana	Data	Ponto de Coleta	Período aproximado de coleta com dados válidos
Terça	25/07	1	04h30min
Quarta	26/07	2	04h40min
Quarta	02/08	3	03h10min
Quarta	16/08	7	04h10min
Terça	22/08	4	04h50min
Quinta	24/08	6	04h50min
Terça	29/08	8	05h00min
Quinta	31/08	5	04h00min
Terça	05/09	11	04h50min
Quarta	13/09	12	04h50min
Terça	19/09	10	04h10min
Quinta	21/09	9	04h30min

Fonte: Elaborada pela autora.

Basicamente, as diferenças entre as Rodadas 1 e 2 foram (i) a troca do sensor, da versão 2.0 do *Sensenet* para a versão 3.0, (ii) o aumento da quantidade de dias de coleta, (iii) contagem do tráfego em todos os dias de coleta e (iv) a medição de um ponto por dia, para obtenção do comportamento da poluição ambiental em um mesmo ponto no decorrer do dia.

Nos dois casos, a escolha dos horários de coleta entre 10:00 e 15:00 e dias de medição de terça a quinta-feira, especificados nas Tabelas 9 e 10, baseiam-se nos estudos de Farrell *et al.* (2015) e Neves *et al.* (2023), respectivamente. Estes horários refletem condições diversas do dia para analisar o comportamento dos poluentes, e para o dia de coleta às terças, quartas e quintas-feiras, dias da semana considerados típicos na rotina dos usuários. A segunda,

a sexta e os finais de semana costumam apresentar tráfego com outros horários de pico e as rotas se diferenciam do tradicional trajeto trabalho-casa e casa-trabalho.

Além disso, em paralelo às medições externas, testes de precisão e sensibilidade no sensor construído foram realizados em ambientes internos e controlados, a fim de comparar os resultados obtidos nos dois tipos de ambientes. Vale ressaltar que este trabalho não busca o valor do IQAr, e sim, a análise mais refinada da concentração de poluentes específicos, enfatizando que a poluição do ambiente está relacionada às diversas variáveis, e não apenas aos valores dos poluentes coletados.

3.6 Tratamento e Preparação dos dados

O tratamento de dados destacou as variáveis MP2,5, CO₂, Temperatura e Umidade coletadas pelo *Sensenet*, variáveis de tráfego contabilizada pela autora e infraestrutura urbana obtidas em fontes de órgão públicos. O Microsoft Excel e o Google Colab foram usados para identificação de métricas e elaboração de gráficos e tabelas. Entende-se que um equipamento portátil de baixo custo apresenta menor nível de precisão e sensibilidade que sensores sofisticados e certificados, no entanto os índices coletados pelo *Sensenet* assumiram valores próximos da realidade do ambiente.

Antes dos ensaios em campo, o *Sensenet* foi testado em ambiente interno, a partir de testes de precisão e de performance. Esses testes foram essenciais para mensurar o tempo necessário de calibração para os sensores, seja manual ou automática, bem como para obter valores base dos poluentes e corrigi-los quando mensurados em campo.

O Casella, o Hi-Vol e a Estação *Davis* foram usados como equipamentos de referência para o *Sensenet* nos testes de verificação, realizado em ambiente externo com duração aproximada de 12 dias de coleta e obtenção de médias a cada 30 minutos e 1 hora, para verificação dos valores ao longo do dia. As médias para as todas as variáveis na área de estudo foram estimadas e, como complemento, seus valores foram comparados aos resultados apresentados na literatura. No caso da variável CO₂, não houve equipamento de referência para comparação, então seus dados foram ajustados com base na literatura considerando ensaios realizados em Fortaleza.

Um total de 41.734 entradas de dados foram coletadas, sendo um dado coletado a cada 5 segundos e depois agregados em intervalos de tempo de 10 minutos para corresponder aos dados de tráfego, além de médias horárias para análise por ponto. Uma técnica de projeção linear foi aplicada para preencher os valores faltantes e os valores nulos foram assumidos iguais

ao valor coletado mais próximo. Assim, segue uma lista de ajustes que foram necessários para que os dados estivessem de acordo com o que acontece no ambiente urbano:

- Os resultados de Material Particulado (MP) foram positivos quando comparados ao Casella e ao Hi-Vol, ainda que com menor precisão;
 - Os dados de MP1,0 não foram abordados neste trabalho, apesar de terem sido coletados, pois o poluente não é alvo de pesquisas na literatura, ainda que seja prejudicial; o mesmo é superado pelos demais quanto aos riscos à saúde, e a equipe não dispunha de equipamento de referência para correção e validação;
 - Os dados de MP10 coletados foram semelhantes aos dados de MP2,5. Nos testes de verificação, foi identificado que o *Sensenet* coleta os dados de MP2,5 e mensura, em sua codificação interna a partir de um fator de correção, os valores de MP10; além disso, o equipamento não apresenta sensibilidade suficiente para identificar a diferença entre os poluentes em ambientes menos agressivos. Portanto, o trabalho aborda os valores de MP2,5 na análise de resultados e a calibração do MP10 está prevista na continuidade dos trabalhos junto à Samsung;
 - Os dados de CO₂ obtidos foram ajustados e apresentaram concentrações entre 400 e 600ppm. Diante disso, um fator intermediário foi encontrado para ajuste de valores obtidos acima de 600ppm;
- * OBS: Na medição realizada no ponto 4, houve uma falha no sensor e, não foram obtidos dados de CO₂, temperatura e umidade. Portanto, esses parâmetros não serão apresentados no ponto 4.
- Os dados de Temperatura e Umidade do *Sensenet* apresentaram bons resultados de acordo com os valores obtidos pela estação *Davis*, ou seja, valores semelhantes;

Uma matriz de correlação e modelos de regressão linear múltipla (MLR) foram desenvolvidos para identificar as variáveis mais influentes na previsão dos padrões de poluição atmosférica na área estudada. Por fim os dados foram integrados ao QGIS Desktop 3.28.10, um software de Sistema de Informação Geográfica (SIG) para visualizar as relações espaciais entre as variáveis coletadas e a paisagem urbana. A seguir estão apresentadas as etapas e estratégias utilizadas para produção dos mapas no QGIS:

- Os dados foram inseridos no software em forma .csv com a identificação de Latitude de Longitude por ponto. As camadas com as informações dos poluentes foram reprojetadas para o sistema de coordenadas “EPSG:31984 - SIRGAS 2000 / UTM zone 24S”, com unidades em metros;

- A área a ser interpolada foi definida a partir da função do QGIS de Polígonos de Voronoi, que se trata de um algoritmo que gera uma camada de polígonos a partir dos pontos de entrada. Neste caso, foi utilizada uma região de *buffer* de 10% de extensão, para diminuir efeitos de borda;
- Foi utilizada a camada dos polígonos de Voronoi para realizar uma Interpolação de Ponderação pelo Inverso da Distância (IDW, sigla em inglês) de uma camada de pontos vetorial. Pontos amostrais são ponderados durante a interpolação para que a influência de um ponto em relação a outro caia com a distância do ponto desconhecido criado, obtendo-se assim uma previsão de 100% da área analisada;
- A camada foi estilizada com gradiente de cores de vermelho (valores maiores) a azul (valores menores) e distribuição dos dados por quartil com 5 classes de cores;
- Por fim, as edificações foram inseridas no projeto do QGIS com identificação em 3D das alturas dos prédios e cânions proeminentes, no quais foram pintados com cores intensas aqueles mais altos, e os mais baixos se mantiveram na cor cinza.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

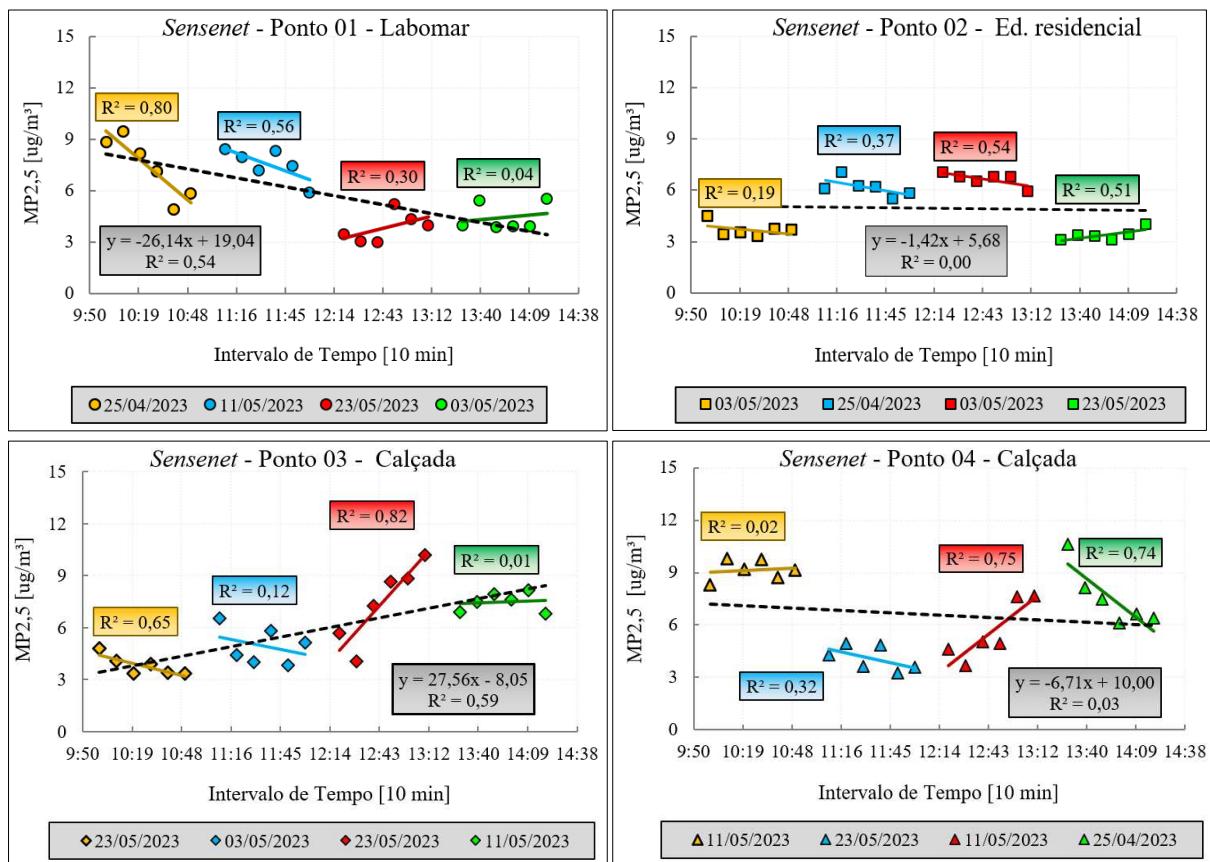
Conforme mencionado anteriormente, este capítulo traz as duas outras etapas apresentadas na metodologia da pesquisa: a Etapa III, que diz respeito a análise e ao tratamento dos dados coletados com base nos testes de verificação, comparando-os com os valores apresentados na literatura, bem como suas relações com variáveis secundárias como infraestrutura urbana e tráfego de veículos e a obtenção de correlação multivariada; e a Etapa IV, que envolve a criação de mapas iterativos para análise georreferenciada dos poluentes, aferindo seus resultados com variáveis da infraestrutura urbana. Espera-se contribuir para a compreensão dos efeitos da infraestrutura urbana na qualidade do ar e otimizar o processo de coleta de dados, auxiliando no planejamento urbano de Fortaleza, bem como de outras cidades, e nas estratégias de medidas mitigatórias e conscientização da sociedade sobre os efeitos da poluição.

4.1 Análise de poluentes atmosféricos

Neste tópico será apresentado um breve resumo dos resultados obtidos pelo *Sensenet* na Rodada 1 e quais *insights* foram usados para a otimização do protocolo de coleta de dados, resultando na Rodada 2.

4.1.1 Resultados obtidos na Rodada 1 – Valores de MP2,5 do *Sensenet* 2.0

Conforme apresentado na Metodologia, a Rodada 1 contou com coleta de dados em 4 pontos com uma estratégia de rodízio entre pontos, em que, em um único dia o sensor era transportado a cada ponto de modo a realizar coletas de 1 hora (Figura 29). Vale lembrar que essa rodada foi realizada com o *Sensenet* versão 2.0 e uma contagem de tráfego a cada 10 minutos para os dois últimos pontos medidos.

Figura 29 – Análise de MP2,5 por hora de medição – *Sensenet 2.0*

Fonte: Elaborada pela autora.

Neste método de medição, em que apenas o poluente MP2,5 foi analisado, percebeu-se fortes correlações em alguns horários e baixas correlações em outros, não sendo possível observar vinculação da quantidade do particulado com o tráfego ou a hora do dia. Houve diferenças discrepantes entre a última medição de uma hora e a primeira medição da hora seguinte, fazendo-se questionar a maior influência do dia de coleta frente à hora de medição, já que a cada dia têm-se diferentes valores de temperatura, umidade, tráfego, entre outros fatores, ainda que todos tenham sido coletados entre terça e quinta-feira (em tese, dias com tráfego constante na semana). De uma forma geral, a linha de tendência por ponto (linha preta tracejada) apresentou diferentes comportamentos, conforme discutido a seguir:

- No ponto 1, apesar de não haver uma forte correlação linear entre a concentração de MP2,5 em função da hora do dia de coleta ($R^2 = 0,54$), houve um decréscimo dos valores no decorrer do dia. A concentração de MP2,5 foi mais elevada das 10:00 às 12:10 (meio da manhã) em comparação aos dados entre 12:20 e 14:30 (início da tarde), com médias de 7,5 e 4,1 µg/m³, respectivamente, mostrando uma redução de 44,7% de material particulado no período da tarde

em relação à manhã. Esta redução acompanhou a diminuição de tráfego (40 veículos a menos no período da tarde, ou seja, 14% a menos), apontando uma possível relação entre a concentração dos poluentes e o volume de tráfego neste ponto para o período estudado;

- No ponto 2, percebe-se uma concentração aproximadamente constante de MP2,5 durante todo o período de coleta (R^2 próximo a zero). A região não apresenta fontes fixas relevantes de poluição, contém prédios altos e pouca ventilação, sendo que a via dá acesso apenas a residências e poucos edifícios comerciais; aparentemente não houve influência do tráfego na quantidade de particulados. Note-se que no local de coleta há um baixo volume de tráfego, com médias constantes de 20 veículos a cada 10 minutos.
- No ponto 3, houve um crescimento proporcional entre os valores de MP2,5 e o aumento da hora do dia, com valores médios de $4,4\mu\text{g}/\text{m}^3$ pela manhã e $7,7\mu\text{g}/\text{m}^3$ pela tarde. Essa variação acompanhou a evolução do tráfego médio coletado pela manhã, 94 veículos, e pela tarde, 108 veículos. Ainda assim, alguns picos seguidos de valores muito baixos não puderam ser justificados, indicando a problemática dos diferentes dias de coleta em cada ponto;
- No ponto 4 ($R^2 = 0,03$), houve uma constância na concentração de MP2,5 no decorrer do dia, mas as análises individuais por hora indicam o contrário, i.e., valores com grande dispersão e baixa correlação entre as variáveis no decorrer do dia, independente do horário. Este ponto apresenta vias largas e espaço para ventilação constante, o que pode influenciar na dispersão dos poluentes no decorrer do dia (Rocha, 2017; Santos, 2018), ainda que apresente alto volume de tráfego, com média de 245 veículos.

Para visualização dos valores médios de MP2,5 nas coletas da Rodada 1, a Tabela 11 apresenta a média por hora em cada ponto, coletados em dias diferentes. Apesar de seguir algumas tendências apresentadas na literatura, foi necessária uma nova análise com medições ininterruptas de um único ponto por dia, com coleta de dados em uma maior área com mais pontos de coleta e, ainda, com um menor intervalo possível entre coletas.

Tabela 11 – Valores médios de MP2,5 em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ – *Sensenet 2.0*

Pontos	10:00 – 11:00	11:10 – 12:10	12:20 – 13:20	13:30 – 14:30	Tráfego médio
1	7,4	7,5	3,8	4,4	270
2	3,7	6,2	6,6	3,4	20
3	3,8	4,9	7,4	7,5	100
4	9,2	4,1	5,6	7,6	240

Fonte: Elaborada pela autora.

4.1.2 Resultados obtidos na Rodada 2 – Valores de MP2,5 do Senenet 3.0

A Tabela 12 apresenta os valores de média, mediana, desvio padrão e coeficiente de variação por ponto para análise estatística dos dados.

Tabela 12 – Representação estatística de MP2,5 em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ por ponto – *Sennet 3.0*

Hora de medição	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7	Ponto 8	Ponto 9	Ponto 10	Ponto 11	Ponto 12
10:30	9,2	3,5	4,0	9,2	13,2	20,8	6,2	21,0	7,5	25,4	14,2	3,1
10:40	7,2	3,7	4,0	9,5	12,0	20,0	6,9	20,2	7,4	24,0	14,4	5,0
10:50	6,5	3,2	4,0	9,7	9,7	19,8	6,0	19,8	6,6	22,4	13,8	2,5
11:00	6,7	3,5	4,0	10,2	10,7	18,7	5,0	20,0	6,9	22,6	13,5	2,7
11:10	6,0	3,7	4,0	10,3	11,2	20,1	4,6	19,9	7,7	21,6	13,8	4,0
11:20	6,6	3,9	4,0	11,9	11,4	18,5	4,9	20,4	8,1	22,1	15,8	4,0
11:30	5,2	3,3	5,4	12,2	10,9	19,5	5,4	19,8	13,0	20,5	12,6	3,5
11:40	6,3	3,5	4,1	12,6	7,5	19,0	5,3	18,9	6,5	21,2	10,3	5,0
11:50	5,4	3,2	3,9	12,1	8,0	18,2	5,4	19,2	7,2	22,0	11,3	6,4
12:00	5,5	3,0	4,3	11,9	8,0	17,4	4,5	18,9	8,8	21,7	11,5	4,8
12:10	5,0	3,2	3,9	12,5	9,1	19,0	4,3	20,1	9,8	22,2	11,6	7,2
12:20	5,8	3,6	3,8	14,2	7,8	17,4	4,4	21,8	10,8	20,0	11,6	7,3
12:30	5,1	3,5	4,3	15,0	7,3	17,3	3,8	19,7	11,0	17,5	11,7	4,5
12:40	5,9	3,6	6,5	16,6	6,9	17,0	3,9	18,6	10,6	15,4	10,9	4,5
12:50	5,2	4,0	5,4	14,4	6,5	18,1	3,6	19,5	9,4	19,5	10,8	4,9
13:00	7,9	3,9	4,1	13,9	7,2	17,9	4,3	18,5	11,8	18,9	9,7	3,5
13:10	4,8	3,8	4,7	16,4	6,4	16,8	4,0	18,0	11,6	18,3	9,4	5,1
13:20	5,0	4,1	7,8	16,7	6,9	16,5	4,0	17,8	9,8	17,6	8,5	3,7
13:30	6,4	4,0	4,6	16,2	7,6	16,1	3,9	17,9	8,4	17,0	8,9	3,8
13:40	5,2	4,3	5,7	15,1	11,1	18,9	4,0	18,1	9,0	16,4	9,1	5,1
13:50	6,8	4,0	5,6	15,7	12,5	16,3	4,0	17,1	9,4	15,8	8,6	4,2
14:00	6,6	4,0	5,3	15,3	13,9	20,7	4,0	18,1	7,7	17,0	8,4	4,3
14:10	6,6	4,1	4,8	14,4	15,4	15,5	4,0	18,0	9,0	16,2	7,9	5,5
14:20	5,6	4,2	6,3	14,8	16,8	16,3	4,0	17,7	8,1	15,7	8,7	4,9
14:30	7,0	4,2	5,9	17,3	18,2	16,1	4,0	18,1	7,6	14,1	7,7	4,3
Média	6,1	3,7	4,8	13,5	10,3	18,1	4,6	19,1	8,9	19,4	11,0	4,6
Mediana	6,0	3,7	4,3	14,2	9,7	18,1	4,3	18,9	8,8	19,5	10,9	4,5
Desvio Padrão	1,0	0,4	1,0	2,4	3,3	1,5	0,8	1,2	1,7	3,0	2,3	1,2
Coef. Variação (%)	16,3	9,7	21,2	18,0	31,9	8,4	18,1	6,0	19,3	15,4	20,7	25,6

Fonte: Elaborada pela autora.

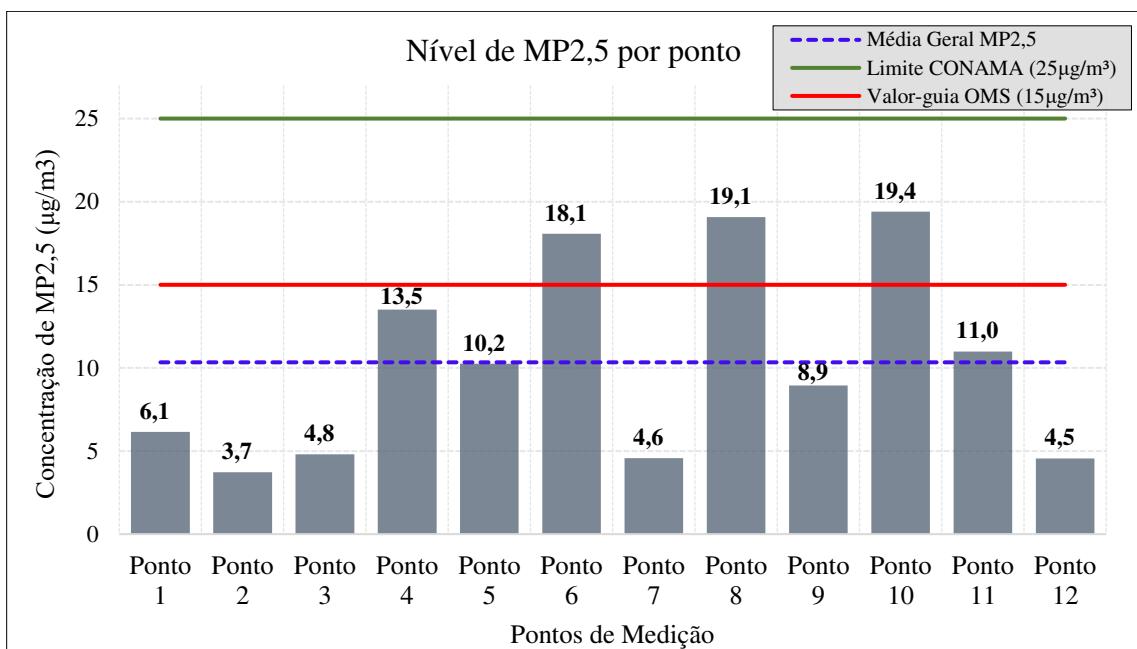
As maiores médias de MP2,5 foram registradas nos pontos 4, 6, 8 e 10. Em todos os pontos o valor da mediana está bem próximo do valor médio, o que indica uma distribuição simétrica dos dados. O desvio padrão foi baixo para todos os pontos, variando de 0,4 a 3,2,

excetuando-se os pontos 5 e 10. Para análise do coeficiente de variação (CV), pode-se destacar os seguintes pontos:

- Ponto 5 apresentou maior valor de CV, 31,9%, indicando maior variabilidade dos dados em relação aos demais pontos. Tal fato pode ser explicado pela via larga e direção do vento paralela a via. Os poluentes podem se dispersar em momentos de ventos intensos, no entanto, as edificações mais altas podem funcionar como barreiras para essas variáveis, portanto, o comportamento se torna instável durante o dia;
- Ponto 8 apresentou uma das maiores médias com baixo CV, $19,1\mu\text{g}/\text{m}^3$ e 6,0% respectivamente, mostrando que apesar de uma média alta, seus valores são constantes no decorrer do dia. Esse comportamento pode ser justificado pela movimentação constante de pedestres e veículos, tendo em vista a predominância de edifícios residenciais e de maior altura, o que influencia na concentração dos poluentes emitidos no local;
- Ponto 10 tem comportamento contrário ao ponto 8, apesar de apresentar menor média de MP2,5, $4,5\mu\text{g}/\text{m}^3$; tem um dos mais altos CV (15,4%), indicando variabilidade dos valores, ainda que sejam baixos. Neste caso, há prédios altos e espaçados que permitem maior dispersão dos poluentes.

Na Figura 30 é apresentada uma análise das médias de MP2,5 em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ por ponto de coleta, a fim de obter uma visão geral da área de estudo. As linhas verde e vermelha representam o nível de MP2,5 permitido pela legislação nacional (CONAMA 491/2018) e o valor-guia indicado pela legislação mundial (OMS, 2021), iguais a 25 e $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24 horas), respectivamente.

Figura 30 – Nível de MP2,5 por ponto com faixa limite permitida



Fonte: Elaborada pela autora.

A média geral de MP2,5 para a região foi de $10,3\mu\text{g}/\text{m}^3$ (linha azul tracejada), tendo 5 pontos (4, 6, 8 e 10) apresentando valores mais elevados que a média. Estes resultados indicam boa qualidade do ar na região, principalmente em relação à resolução do CONAMA. Já para os limites da OMS, os pontos 6, 8 e 10 exibiram valores mais elevados. Isso pode representar a influência de fatores urbanos e viários na concentração dos poluentes de áreas próximas. Vale lembrar que o valor da OMS é chamado de valor-guia, e que a legislação permite valores maiores em casos de metas de adaptação para redução das emissões.

Como comparação, Coelho *et al.* (2022) indicaram que as maiores concentrações de MP10 encontradas foram em torno de $45\mu\text{g}/\text{m}^3$ para Liubliana (Eslovênia), Ligúria (Itália) e Sosnowiec (Polônia), seguidos por Amsterdã e Aveiro (Holanda e Portugal, respectivamente), com valores até $35\mu\text{g}/\text{m}^3$ e, por último, Bristol no Reino Unido, com valores máximos próximos a $20\mu\text{g}/\text{m}^3$. Os autores afirmam que a análise é semelhante para o MP2,5, que apresentaram valores entre 5 e 15% inferiores ao MP10. Neste sentido, os valores apresentados pelos pontos 6, 8 e 10 estão próximos às médias de MP2,5 prevista pelos autores, mesmo tratando-se de cidades com bastante diferenças econômicas, extensão do território, volume de tráfego e intensidade de atividades urbanas.

Silva e Mendes (2006) mensuraram concentrações entre 10 e $20\mu\text{g}/\text{m}^3$ para MP10 em uma região litorânea de uma cidade em Portugal, e valores de MP2,5 ligeiramente inferiores, entre 5 e $7,5\mu\text{g}/\text{m}^3$, semelhante às médias encontradas neste estudo nos pontos 1, 2, 3, 7 e 12.

A cidade de Hong Kong apresentou uma média de $19\mu\text{g}/\text{m}^3$ para MP2,5, semelhante às maiores médias deste trabalho, o que indicou uma coincidência espacial entre poluição e população gerando um aumento de 46% no índice de exposição à poluição atmosférica (Che *et al.*, 2023).

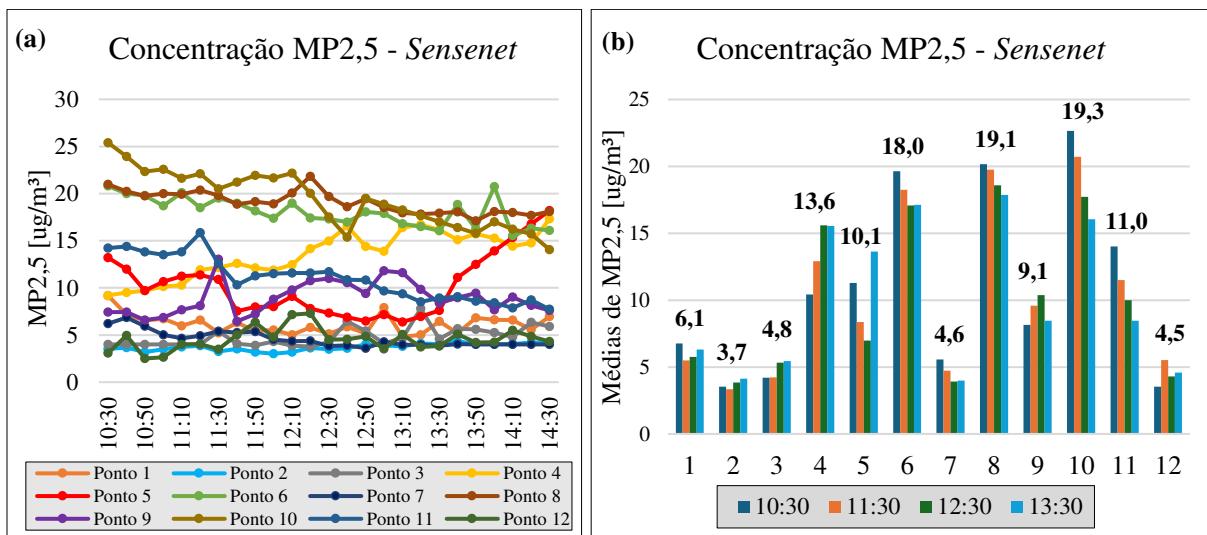
No Brasil, especificamente no estado de São Paulo, Vieira *et al.* (2023) destacam que as médias mensais no ano de 2020 variaram de 8 a $22\mu\text{g}/\text{m}^3$ para MP2,5, com coletas realizadas no campus da Universidade de São Paulo.

Percebe-se que os valores máximos de MP2,5 em Fortaleza não diferem tanto dos exemplos supracitados, ainda que as regiões sejam mais desenvolvidas economicamente, o que pode caracterizar maior tráfego, maior infraestrutura urbana, maiores alturas das edificações e elevado índice populacional na região, fatores relevantes para a dispersão e para os índices de emissão dos poluentes.

Com foco na cidade de Fortaleza, os resultados apresentaram uma concentração máxima de $19\mu\text{g}/\text{m}^3$, e uma média de aproximadamente $10\mu\text{g}/\text{m}^3$, valores ligeiramente inferiores às variações de MP2,5 registradas na região pela literatura. Tal diferença pode ser atribuída ao fato de que a área analisada apresenta vias com menor tráfego em comparação às estudadas por Rocha *et al.* (2020) e Neves *et al.* (2023). Estes autores reportaram médias de $25\mu\text{g}/\text{m}^3$ e $20\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, em medições realizadas em locais de Fortaleza e sua região metropolitana com atividades veiculares mais intensas, evidenciando uma maior exposição a poluentes nessas áreas em comparação com o local do presente estudo.

Ciente de que diversos fatores podem influenciar na concentração dos poluentes, vale citar que o período de coleta de dados deste trabalho compreende os meses de julho, agosto e setembro, que apresentam diferentes características climáticas, como a ventilação intensa que pode influenciar na ressuspensão de poeira e na concentração de MP na atmosfera próximo à superfície do solo (Rocha, 2017).

Para uma análise da concentração de MP2,5 no decorrer do dia, a Figura 31, mostra (a) a evolução a cada 10 minutos de coleta e (b) a representação da concentração por hora em cada ponto.

Figura 31 – Variação dos níveis de MP2,5 no decorrer do dia – *Sensenet 3.0*

Fonte: Elaborada pela autora.

Os pontos 1, 2, 3, 7 e 12 obtiveram valores semelhantes durante o período de coleta (inferiores a 8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Os pontos 1 e 12 apresentaram tráfego mais elevado que os demais, com média de 249 e 346 veículos, no entanto, como as vias são largas, estas permitem maior ventilação e dispersão da poluição. Já os pontos 2 e 7 tiveram os menores índices de tráfego, média de 18 e 82 veículos, e apresentam vias estreitas com edificações mais altas, que dificultam a movimentação dos poluentes, ainda que estejam em menor quantidade. O ponto 3, situado em uma via de rota alternativa para o tráfego, média de 117 veículos, apresenta uma vegetação robusta que pode auxiliar na deposição de partículas e evitar a dispersão delas no ar.

Alguns pontos apresentaram redução nos valores de MP2,5 quando se compara o período da manhã com o período da tarde, enquanto outros tiveram comportamento inverso. De um modo geral, não há diferença significativa entre as médias coletadas no período da manhã (10,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) e da tarde (10,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), indicando que a hora do dia, bem como as possíveis alterações na temperatura e no tráfego, não apresentou influência na concentração do poluente.

4.1.3 Resultados obtidos na Rodada 2 – Valores de CO₂ do Sensenet 3.0

Os valores de CO₂ em partes por milhão (ppm) estão apresentados na Tabela 13, assim como a média, mediana, desvio padrão e coeficiente de variação (CV) encontrados por ponto.

Tabela 13 – Representação estatística de CO₂ em ppm por ponto – *Sensenet 3.0*

Hora de medição	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7	Ponto 8	Ponto 9	Ponto 10	Ponto 11	Ponto 12
10:30	448	445	458	0	453	284	440	636	577	495	489	465
10:40	449	442	458	0	442	284	443	636	492	482	484	471
10:50	443	440	458	0	440	267	438	548	495	473	492	450
11:00	440	432	458	0	437	263	432	513	503	464	486	459
11:10	446	440	458	0	428	272	445	493	475	478	465	470
11:20	445	433	458	0	426	259	423	476	473	469	465	444
11:30	451	427	469	0	420	246	426	480	466	475	467	438
11:40	448	422	480	0	381	246	451	483	455	488	484	434
11:50	451	425	491	0	407	265	450	475	462	487	461	432
12:00	450	429	472	0	413	268	451	485	466	479	448	452
12:10	439	429	483	0	428	256	439	490	470	479	438	465
12:20	446	421	474	0	407	235	440	490	474	494	448	474
12:30	450	422	477	0	418	244	430	501	478	486	448	452
12:40	456	435	479	0	427	242	438	503	498	471	438	462
12:50	451	424	469	0	436	242	431	484	494	464	459	466
13:00	457	433	468	0	431	255	436	493	477	464	463	457
13:10	453	425	461	0	416	252	430	481	477	464	467	467
13:20	442	429	459	0	428	245	425	470	477	464	473	473
13:30	437	426	466	0	424	242	424	464	477	464	469	476
13:40	433	429	474	0	435	258	433	458	486	464	464	483
13:50	438	425	469	0	441	266	413	456	489	464	462	469
14:00	436	427	456	0	447	260	413	453	507	472	453	465
14:10	435	435	473	0	453	254	413	465	508	486	457	468
14:20	433	442	489	0	459	242	413	451	485	477	453	485
14:30	446	431	610	0	465	265	413	446	469	445	502	474
Média	445	431	475	0	430	257	432	493	485	474	465	462
Mediana	446	429	469	0	428	256	432	483	477	473	464	465
Desv. Padrão	7	7	29	0	18	13	12	47	23	12	16	14
Coef. Var. (%)	1,5	1,6	6,2	0	4,2	5,0	2,8	9,6	4,8	2,4	3,5	3,0

Fonte: Elaborada pela autora.

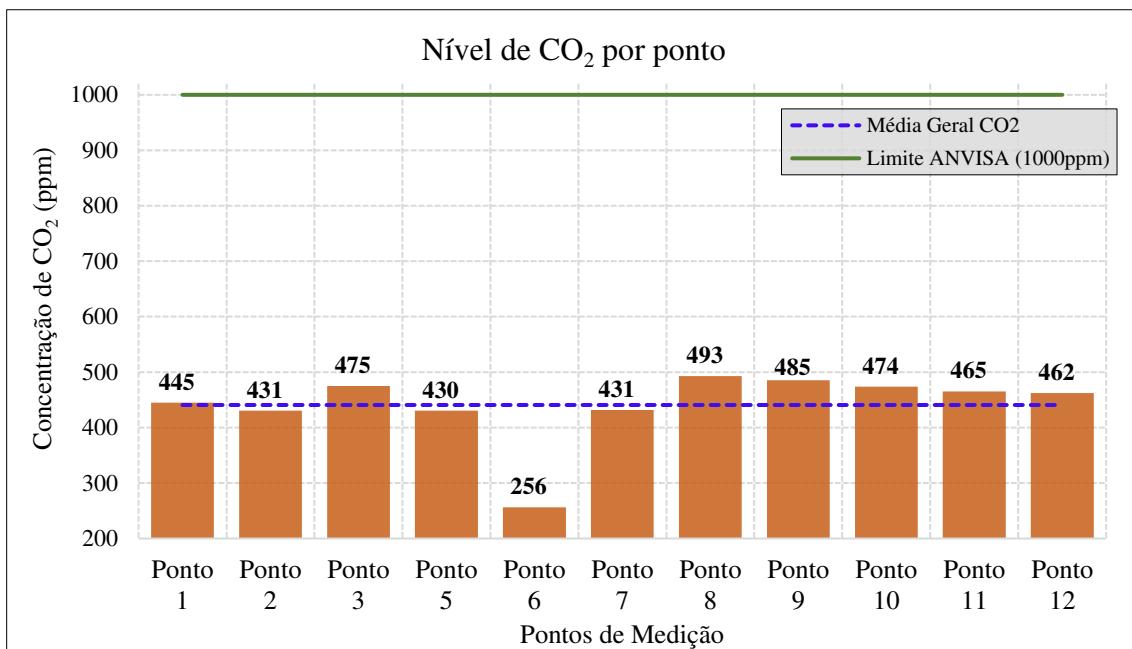
A média entre os pontos variou de 430 a 495ppm, e apenas um ponto apresentou maior variação, com média de 256ppm, e o mesmo será tratado adiante. Os valores medidos foram próximos aos apresentados por Gomes, Silva e Silva (2019) e Neves *et al.* (2023) para Fortaleza, ou seja, de até 600ppm.

Os pontos 3 e 8 apresentaram maiores desvio padrão e CV, enquanto os pontos 1 e 2 ficaram menos dispersos em relação à média. O ponto 6 apresentou a menor média entre

todos, mesmo obtendo alto desvio padrão e CV, indicando variabilidade mesmo nas menores concentrações de CO₂.

Não existem valores máximos estabelecidos por legislação nacional para o CO₂, nem pela OMS, pois este não é considerado um poluente, devido à sua emissão fazer parte de processos naturais no meio ambiente. Todavia, ANVISA (2003) recomenda que para ambientes internos a concentração de CO₂ não deve ultrapassar 1000ppm, garantindo assim a renovação do ar do ambiente. Assim, o meio científico usa esse valor para balizar as emissões geradas em ambiente externo também. Portanto, ao analisar a Figura 32 nota-se que a concentração de CO₂ ficou abaixo desse limite e próximos aos valores encontrados por Neves *et al.* (2023), entre 450 e 650ppm.

Figura 32 – Nível de CO₂ por ponto com faixa limite permitida



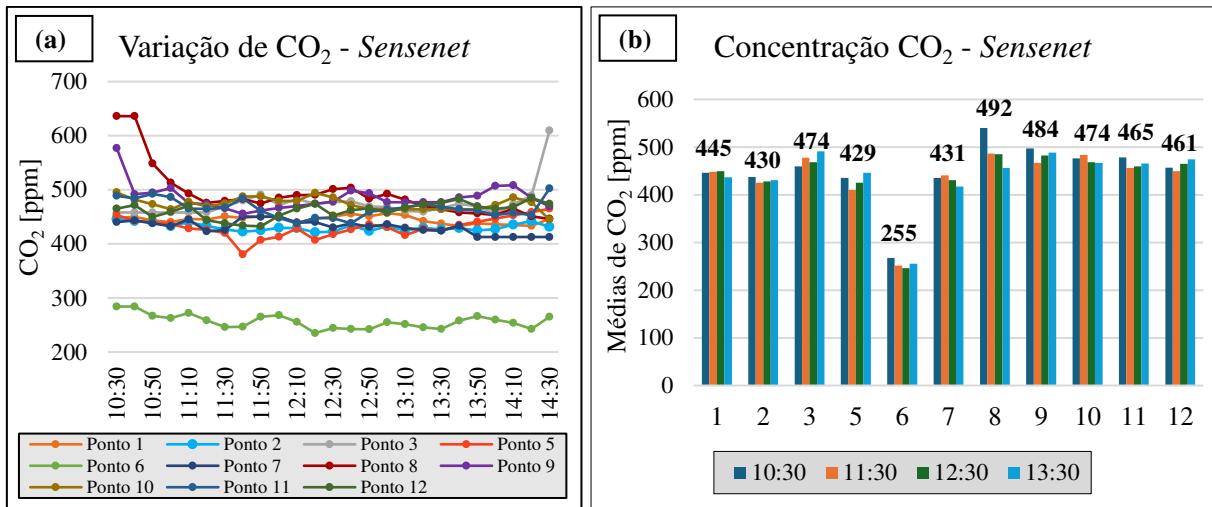
Fonte: Elaborada pela autora.

O ponto 6, com média de 256ppm, apresenta características semelhantes a outros pontos, com alto tráfego, vias largas e ventilação constante, portanto esses fatores não podem justificar os índices mais baixos de CO₂ apenas neste local. Algumas hipóteses para esse resultado podem ser a maior velocidade do vento, parâmetro não coletado neste estudo, ou indicar uma instabilidade na coleta dos dados motivada pelo calor (que afeta os índices de temperatura/umidade, consequentemente os índices de CO₂).

A evolução do poluente no decorrer do dia é mostrada na Figura 33a, com médias a cada 10 minutos para o período de coleta das 10:30 às 14:30, enquanto as médias por hora de

cada ponto (exceto ponto 4) estão indicados na Figura 33b. No decorrer do dia não foram encontradas grandes alterações de valores que pudessem ser caracterizadas pela diferença de horário, ou seja, assim como para o MP2,5, as médias do período da manhã foram semelhantes ao período da tarde. Ainda que haja diferenças na localidade, no volume tráfego, no material do pavimento, na infraestrutura, na temperatura e na umidade, as concentrações de CO₂ mantiveram uma alteração máxima de 70ppm entre pontos.

Figura 33 – Variação dos níveis de CO₂ corrigidos no decorrer do dia – *Sensenet 3.0*



Fonte: Elaborada pela autora.

4.2 Análise do volume de tráfego

Neste tópico serão apresentados os dados de tráfego de veículos coletados por ponto na área de estudo, juntamente aos valores de poluentes, com a intenção de avaliar se há relação entre as variáveis. A análise também foi dividida em Rodadas 1 e 2.

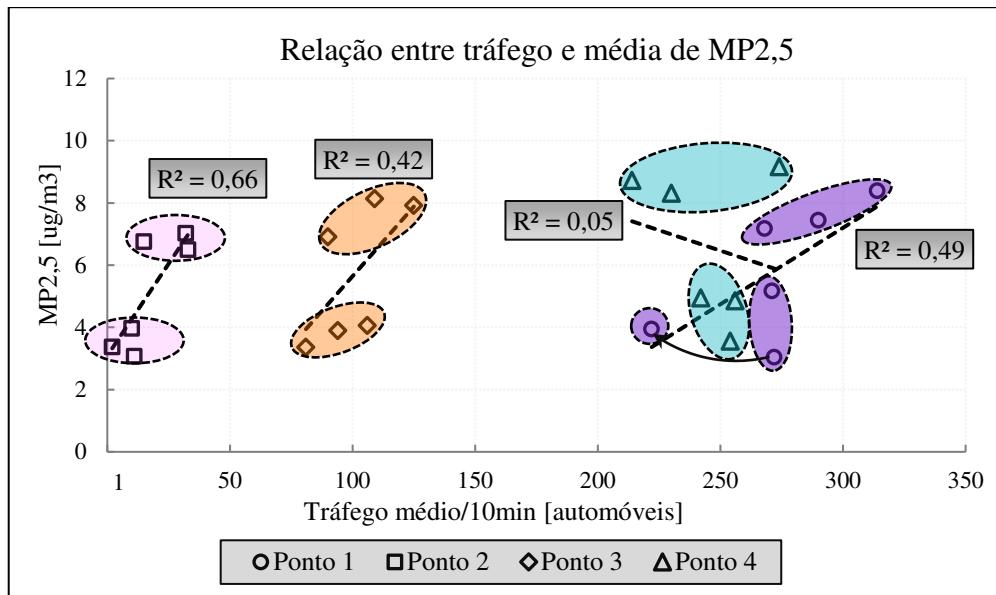
4.2.1 Resultados obtidos na Rodada 1 – Valores de Tráfego

Na Rodada 1, a correlação analisada foi entre MP2,5 e tráfego de veículos. A contagem de tráfego foi realizada de 10 em 10 minutos a partir do 3º dia de medição na Rodada 1, e esse procedimento foi adotado para os ensaios na Rodada 2. De acordo com a Figura 34, os pontos 1, 2 e 3 possuem relação diretamente proporcional entre o tráfego e a concentração de MP2,5 aferidos, enquanto o ponto 4 apresentou comportamento oposto, porém com R² bem próximo a zero.

Da Figura 34, percebe-se que há agrupamentos de 3 valores dentro de um mesmo ponto de análise. Isso se deve à diferença dos dias de coleta, ainda que dentro dos dias da semana previstos (terça, quarta e quinta). A alteração do dia de coleta em um mesmo ponto foi

suficiente para modificar as emissões de MP2,5 e a média do volume do tráfego local. Essa análise foi essencial para a modificação do protocolo de coleta para a Rodada 2, com medição de um ponto ao longo do dia.

Figura 34 – Influência do tráfego na concentração de MP2,5 – Rodada 1

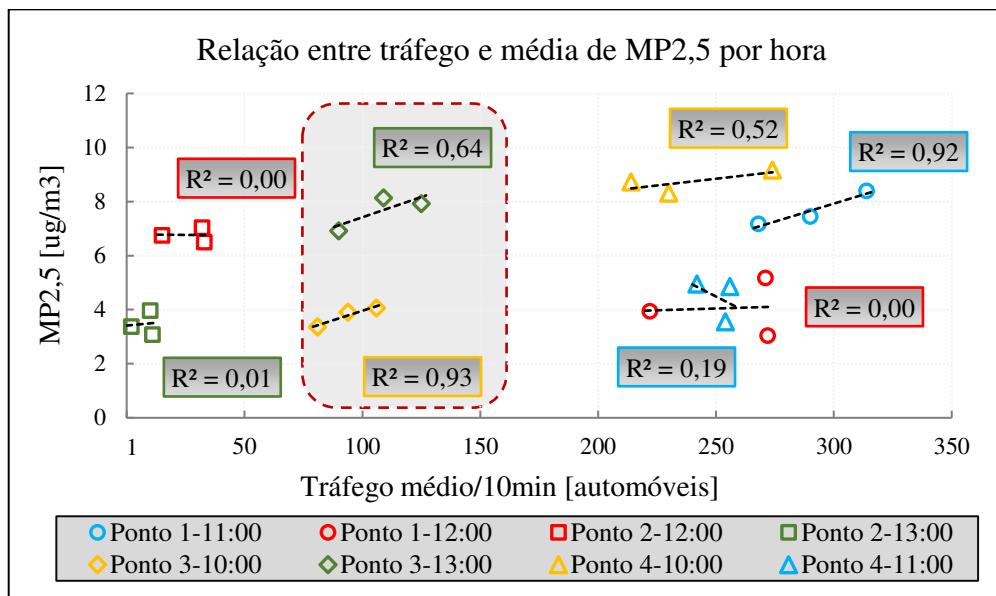


Fonte: Elaborada pela autora.

Por conta da grande diferença entre os valores de MP2,5 e tráfego coletados em um mesmo ponto, como apresentado na Figura 34 percebeu-se a necessidade de analisar cada hora de coleta, como apresentado na Figura 35. O ponto 3, destacado na figura com a área retangular tracejada, foi desconsiderado desta análise por apresentar um intervalo de 3h entre as coletas, muito grande para correlacionar os valores por hora, enquanto os demais apresentaram um intervalo máximo de 1h. Ainda assim, o ponto 3 seguiu uma tendência de crescimento do MP2,5 em função do tráfego, com correlações da ordem de 0,64 e 0,93, às 13h e às 10h, respectivamente.

Para os pontos 1, 2 e 4, com intervalo máximo de 1h entre as análises, o avanço da hora da coleta (ponto 1 – das 11:00 para às 12:00; ponto 2 – das 12:00 para às 13:00; e ponto 4 das 10:00 para às 11:00) apontou um padrão de redução na concentração de MP2,5, enquanto o volume de tráfego não apresentou alterações consideráveis, o que leva a crer que fatores externos como (i) hora da medição ou (ii) dia da coleta podem ser responsáveis pela variação de MP2,5 de forma tão importantes quanto o tráfego.

Figura 35 – Influência do tráfego na concentração de MP2,5 por dia de coleta



Fonte: Elaborada pela autora.

4.2.2 Resultados obtidos na Rodada 2 – Valores de Tráfego

Para a Rodada 2, estão apresentados na Tabela 14 a média por ponto de MP2,5, CO₂, tráfego e classificação das vias.

Tabela 14 – Valores médios de MP2,5, CO₂ e Tráfego por ponto

Pontos	MP2,5 [ug/m ³]	CO ₂ [ppm]	Tráfego [veículos]	Classificação das vias
1	6	445	249	Local
2	4	431	18	Local
3	5	475	117	Local
4	14	0	241	Local
5	10	430	429	Arterial I
6	18	257	249	Local
7	5	432	82	Local
8	19	493	186	Local
9	9	485	290	Local
10	19	474	136	Local
11	11	465	118	Local
12	5	462	346	Arterial II
Média Geral *	10	441	205	-
Valor Máximo	19	493	429	-
Valor Mínimo*	4	257	18	-

* Desconsiderando o valor nulo de CO₂ no ponto 4.

Fonte: Elaborada pela autora.

Percebe-se nos pontos 5 e 12 que o volume de tráfego apresentou relação direta com a classificação da via, tendo em vista que as maiores médias, de 429 e 346 veículos, foram obtidas em vias classificadas como arteriais I e II, respectivamente. Essas vias apresentam maior capacidade de tráfego e permitem o acesso às vias locais, desempenhando um papel crucial na infraestrutura urbana por facilitarem a conexão entre áreas distantes da cidade.

Por sua vez, as vias locais caracterizam-se por apresentar menor largura e uma capacidade de tráfego reduzida. Sua principal função é o acesso direto a residências, comércios e serviços locais. Ainda assim, os maiores índices de MP2,5 e CO₂ (19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e 493ppm) foram obtidos nos Pontos 10 e 8, respectivamente, localizados em vias classificadas como locais, pois essas vias podem ser frequentemente utilizadas como rotas alternativas para tráfego, o que tende a elevar os níveis de congestionamento e, consequentemente, de emissão.

O Ponto 10 apresentou o maior valor de MP2,5 e o um dos maiores índices de CO₂ (19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e 474ppm). Esses índices maiores podem ter sido influenciados pelo pavimento intertravado. A textura áspera desse pavimento ocasiona maiores deslocamentos verticais no automóvel, que podem elevar o esforço para combustão e intensificar as emissões de poluentes (Oliveira, Bertoncini e Castelo Branco, 2022). Além disso, a via não permite velocidade altas, por isso, pode apresentar congestionamentos quando o tráfego é mais intenso.

De uma forma geral, os pontos que apresentaram as maiores médias de tráfego estão representados na Figura 36, indicados pelos maiores raios das circunferências do mapa. Os pontos 1, 4, 5, 6, 9 e 12 estão localizados em avenidas com duas ou mais faixas de tráfego. As respectivas médias de veículos foram de 249, 241, 429, 249, 290 e 346.

Figura 36 – Mapa para representação das médias de tráfego por ponto.



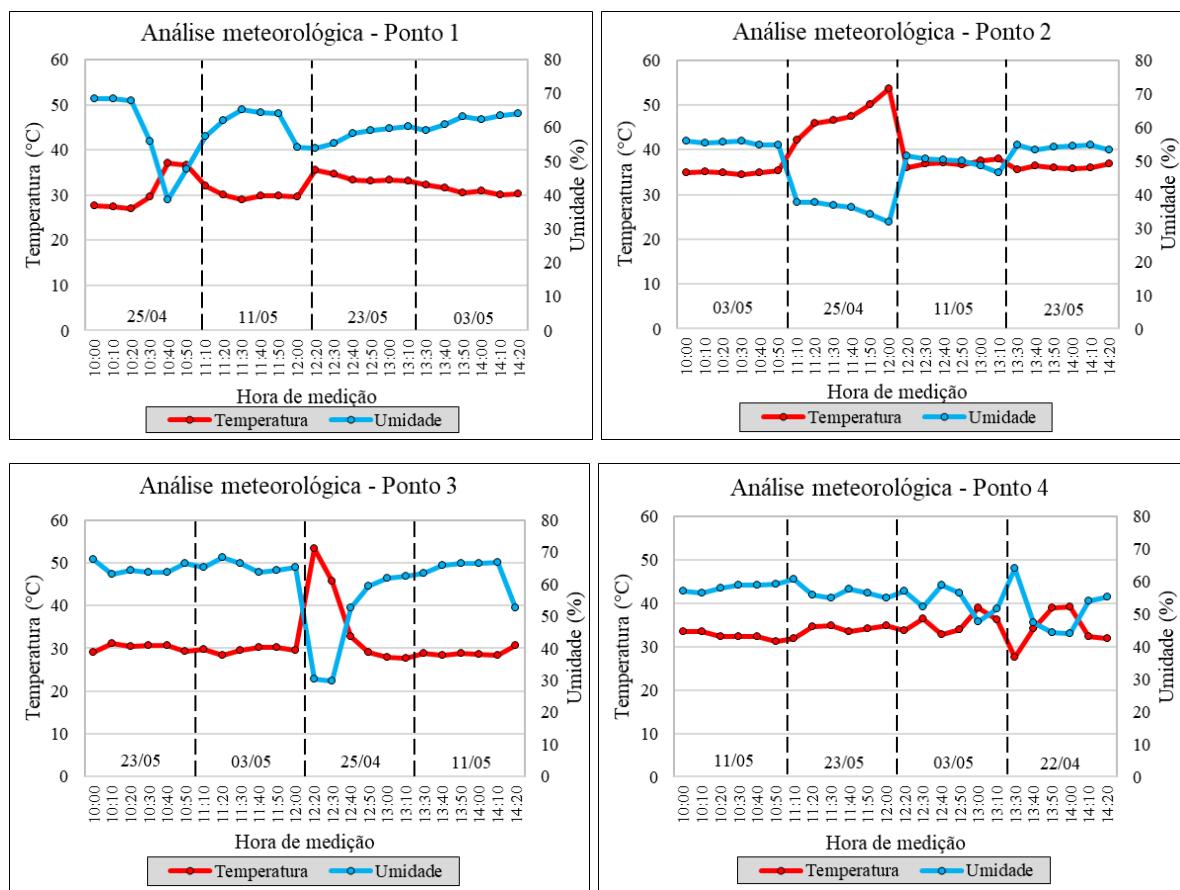
Fonte: Elaborada pela autora.

4.3 Análise de dados meteorológicos

Uma análise individual dos fatores meteorológicos (temperatura e umidade) é apresentada, lembrando que o componente do *Sensenet* que coleta estes dados é o mesmo que coleta dados de CO₂. São apresentados tanto os valores da Rodada 1, com uma avaliação breve, mas essencial, para identificar as mudanças necessárias no sensor; como os valores da Rodada 2, após calibrações internas e correções na estrutura física do equipamento.

4.3.1 Resultados obtidos na Rodada 1 – Dados Meteorológicos do *Sensenet* 2.0

A apresentação dos dados de temperatura e umidade segue a estratégia de coleta da Rodada 1, na qual um único sensor foi transportado por 4 pontos diferentes em um único dia, realizando coletas com duração de 1h em cada local. A Figura 37 traz os resultados e a relação entre temperatura e umidade em cada ponto. Nos gráficos, uma linha vertical tracejada foi acrescentada, bem como a data de cada ensaio. Essa rodada foi realizada com o *Sensenet* 2.0.

Figura 37 – Análise da temperatura e umidade por ponto de medição – *Sensenet 2.0*

Fonte: Elaborada pela autora.

Percebe-se a relação inversamente proporcional entre os índices de temperatura e umidade em todos os pontos, como esperado, tendo em vista que o ar quente retém mais água, por isso, regiões com maior umidade diminuem a variação da temperatura no ambiente (Rocha, 2017). Os resultados apresentaram valores muito altos de temperatura, consequentemente, baixos valores de umidade, que não condizem com os índices obtidos na região analisada. Ainda que a coleta de dados próximo ao pavimento ocasione um aumento na temperatura superficial das proximidades, tendo em vista a absorção de calor pela superfície, não é suficiente para apresentar valores médios de 40°C em medições à 1,5m do solo no período analisado. O ocorrido se deve ao aquecimento interno do equipamento devido ao funcionamento natural de seus componentes. Como se tem uma estrutura interna compacta, os sensores ficam próximos entre si e mascaram os resultados reais de temperatura do ambiente externo. Essa descoberta definiu o novo *design* da versão 3.0 do equipamento, com o aumento de suas dimensões e a modificação de sua cor, reduzindo a absorção de calor.

O problema não foi resolvido em sua totalidade, necessitando de um pequeno ajuste nos resultados obtidos na Rodada 2 para temperatura, umidade e CO₂, a partir de valores base

da literatura e nos testes de verificação realizados. No entanto, é possível perceber que as médias obtidas estão de acordo com os valores de temperatura e umidade encontrados na literatura para a cidade de Fortaleza. Tais comparações serão apresentadas no tópico a seguir.

4.3.2 Resultados obtidos na Rodada 2 – Dados Meteorológicos do Senenet 3.0

Os valores de média, mediana, desvio padrão e coeficiente de variação (CV) para temperatura e umidade estão apresentados na Tabela 15.

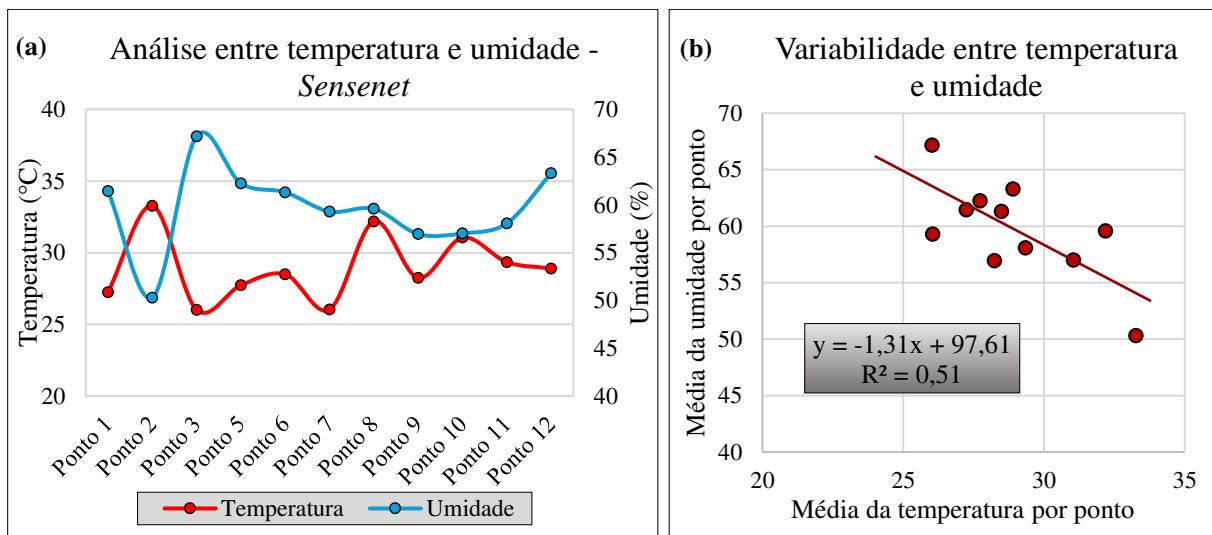
Tabela 15 – Representação estatística de Temperatura e de Umidade por ponto – *Sennet 3.0*

Pontos	Temperatura [°C]				Umidade [%]			
	Média	Mediana	Desvio Padrão	Coef. Var. (%)	Média	Mediana	Desvio Padrão	Coef. Var. (%)
1	27,2	27,2	0,3	1,0	61,5	61,3	1,0	1,6
2	33,3	33,3	0,7	2,0	50,3	50,4	1,3	2,5
3	26,0	26,2	0,9	3,5	67,2	66,3	2,2	3,2
5	27,7	28,0	1,8	6,5	62,3	61,5	4,1	6,6
6	28,5	28,4	0,8	3,0	61,3	61,5	1,8	3,0
7	26,0	25,9	1,0	3,8	59,3	59,7	1,7	2,8
8	32,2	32,3	1,3	4,1	59,6	59,2	2,5	4,2
9	28,2	28,3	0,5	1,6	56,9	57,4	1,6	2,7
10	31,1	31,0	0,4	1,4	57,0	57,0	0,7	1,2
11	29,3	29,2	1,3	4,4	58,1	58,7	2,1	3,6
12	28,9	28,9	0,4	1,3	63,3	63,4	1,0	1,6

Fonte: Elaborada pela autora.

A média dos valores de temperatura para todos os pontos variou entre 26 e 33°C, e os valores médios de umidade de 50 a 67%, valores condizentes para Fortaleza. Média, mediana e coeficiente de variação mostram que os dados coletados não apresentaram grande dispersão.

A Figura 38(a) apresenta a média de temperatura e de umidade obtida em cada ponto analisado e a Figura 38(b) indica a dispersão entre as variáveis. A principal característica dos dados é que na maioria dos pontos os valores de temperatura e umidade não coincidem, ou seja, têm-se o aumento nos índices de uma variável enquanto a outra diminui, resultado alinhado com a literatura (Jardim, 2011; Gomes, Silva e Silva, 2019). O coeficiente de determinação igual a 0,51 indica que apenas 51% da variabilidade dos dados é explicada pelo modelo, enquanto 49% são devidos a outros fatores não analisados.

Figura 38 – Análise dos índices de temperatura e umidade por ponto – *Sensenet* 3.0

Fonte: Elaborada pela autora.

Deve-se lembrar que fatores do ambiente podem ter influenciado na alteração das variáveis, como redução da ventilação, raios solares direcionados ao sensor, alteração na direção dos ventos, entre outros. Como comparação, em estudo realizado na cidade de Fortaleza em uma região com características semelhantes à deste estudo, Neves *et al.* (2019) encontraram valores médios de temperatura de 36 e 34°C e de umidade de 58 a 62%, valores próximos aos encontrados neste trabalho.

4.4 Relação entre volume de tráfego e poluentes

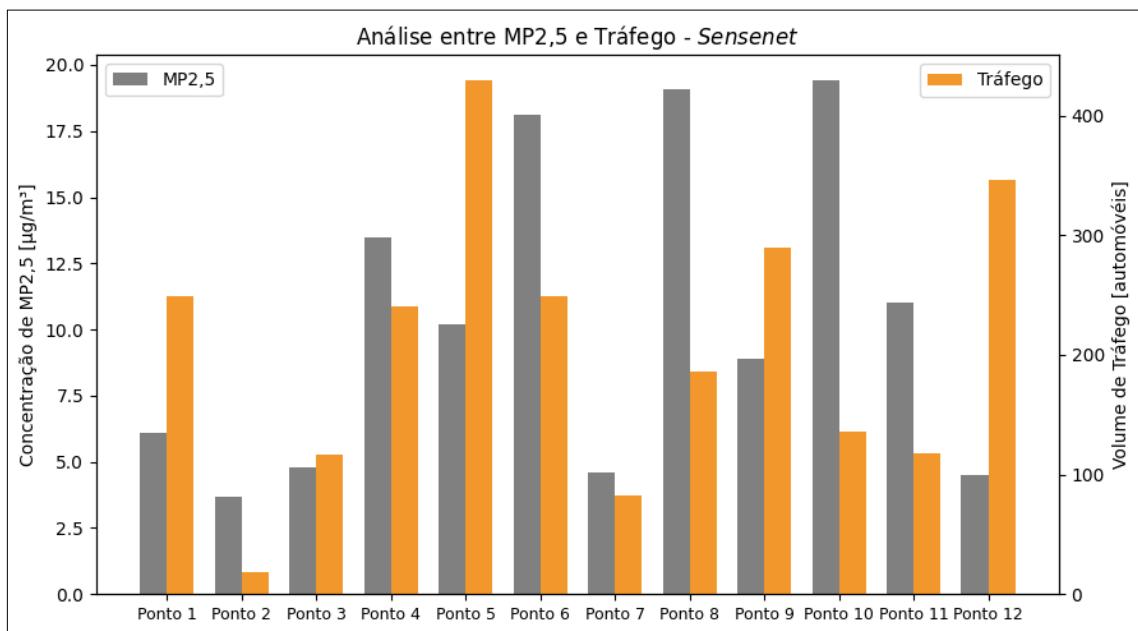
A partir deste tópico, apenas os dados da Rodada 2 serão utilizados para análises de correlação, tendo em vista que consideram uma coleta ampla de dados e a versão otimizada do sensor (*Sensenet* versão 3.0). Como previsto, a coleta de dados em ambientes externos está sujeita a influência de diversos fatores, como índices de velocidade e direção dos ventos, que podem afetar a dissipação e concentração de poluição. Estas informações não serão consideradas neste trabalho, no entanto, observações como a intensidade dos cânions e vegetação podem ser inseridas em análises posteriores.

➤ Análise dos dados de MP2,5 em relação ao tráfego

O volume de tráfego foi determinado a partir da contagem de veículos a cada 10 minutos em todos os pontos de medição. Os valores médios de tráfego e MP2,5 estão apresentados na Figura 39. Os pontos 6, 8 e 10 apresentaram os maiores valores de MP2,5, enquanto os pontos 5, 9 e 12 tiveram os maiores valores de tráfego. Esses dados mostram que não necessariamente um

tráfego maior irá levar a uma maior concentração de MP2,5, havendo outros fatores influentes como o tipo de veículo e combustível utilizado, que não foram abordados neste trabalho. Exemplifica-se o ponto 5 que teve o maior tráfego e apenas a sexta maior concentração de MP2,5 entre doze pontos.

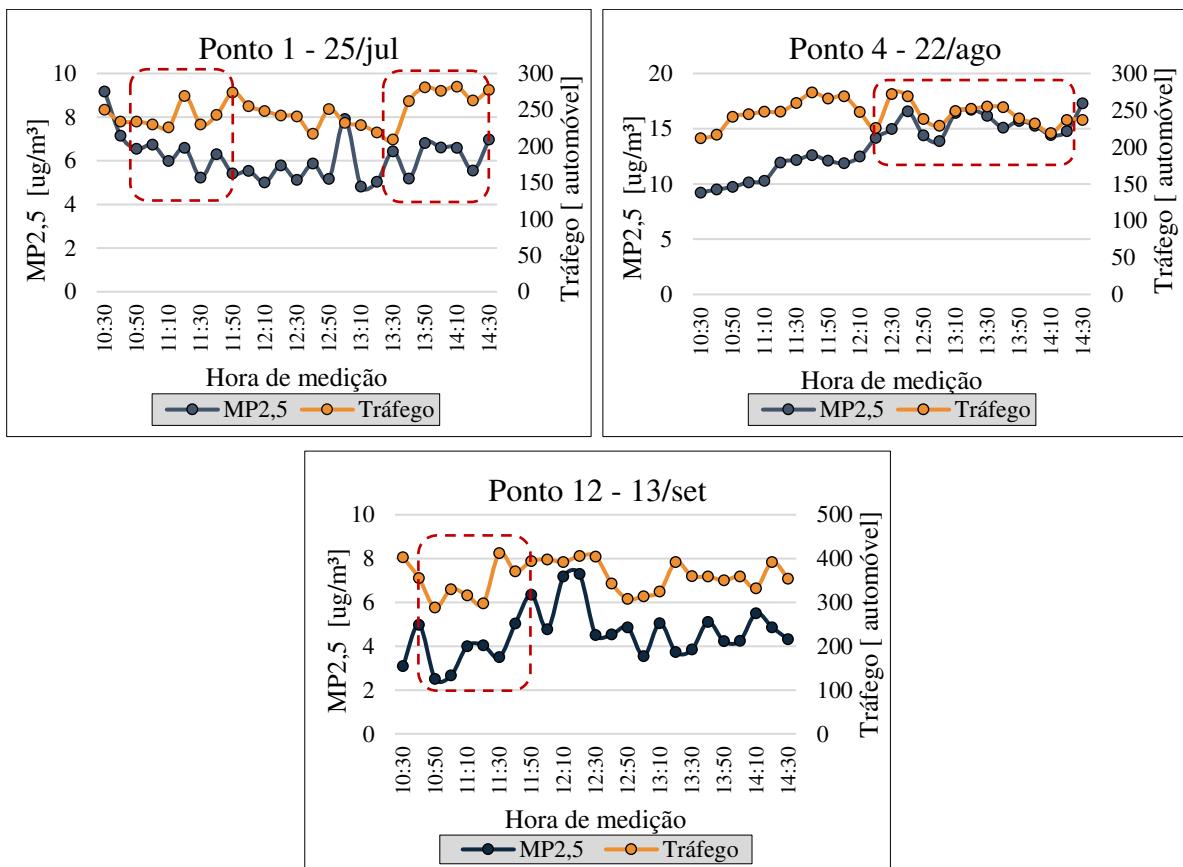
Figura 39 – Análise entre concentração de MP2,5 e volume de tráfego por ponto



Fonte: Elaborada pela autora.

A Figura 40 mostra que alguns pontos, como os pontos 1, 4 e 12, apresentam comportamentos próximos se comparados o tráfego e o MP2,5. Nesses pontos, apesar das variações ao longo do dia, notou-se que os picos de tráfego coincidiram com os picos de MP2,5. Todavia, o restante dos pontos não apresentou esse mesmo comportamento de forma clara. Assim, há uma relação entre tráfego e MP2,5 em alguns pontos analisados, porém como o fenômeno de dispersão do material particulado é complexo, em outros pontos possivelmente outras variáveis influenciam nessa relação.

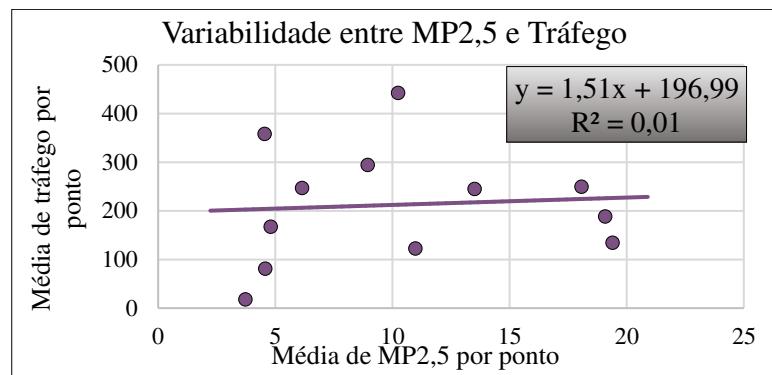
Figura 40 – Análise detalhada de MP2,5 e tráfego dos pontos 1, 4 e 12 no decorrer do dia



Fonte: Elaborada pela autora.

Aos se analisar o coeficiente de determinação entre o tráfego e o MP2,5 percebe-se que apenas 1% da variabilidade dos dados pode ser explicada pelo modelo, enquanto 99% da varia por interferência de outros fatores não inseridos na análise, conforme Figura 41. De acordo com a literatura, tráfegos mais elevados tendem a emitir mais poluentes, entretanto a infraestrutura de transporte e urbana em muitos casos pode interferir mais na concentração de material particulado.

Figura 41 – Variabilidade entre concentração de MP2,5 e volume de tráfego

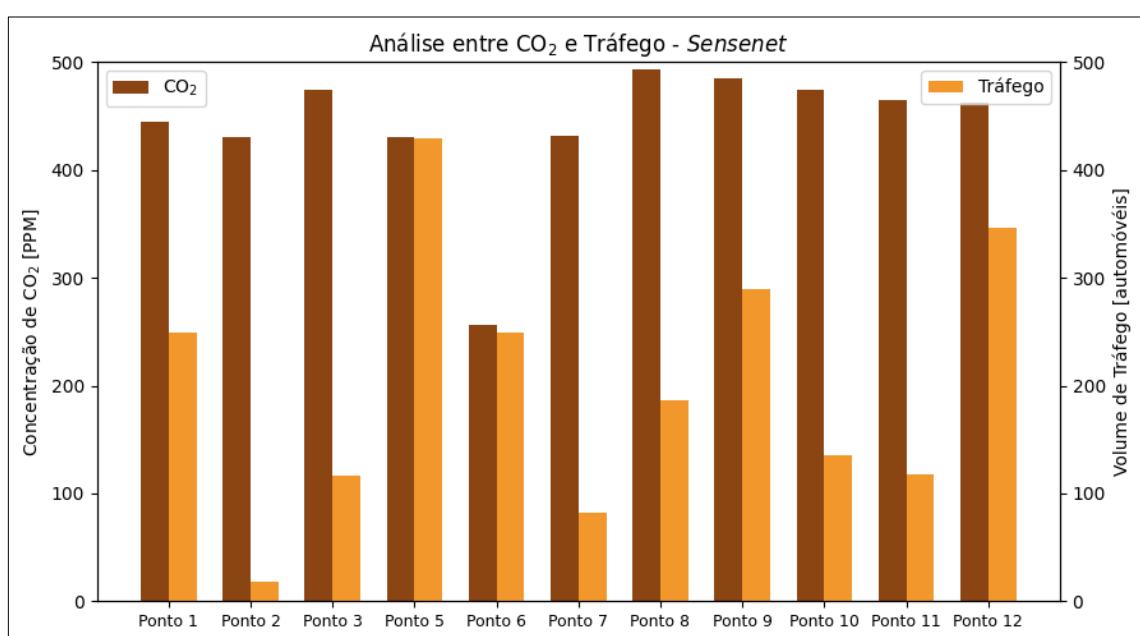


Fonte: Elaborada pela autora.

➤ Análise dos dados de CO₂ em relação ao tráfego

Da mesma maneira como ocorreu para o MP2,5, o CO₂ também não mostrou relação clara com o tráfego (Figura 42). Exemplifica-se o ponto 2 que teve o tráfego mais baixo e concentração de CO₂ muito próxima aos pontos com maiores valores. Em geral, variáveis secundárias como temperatura, umidade, velocidade e direção do vento podem apresentar maior influência nas concentrações de CO₂, mesmo em locais com baixo tráfego. O menor valor de CO₂ foi no ponto 6, 256ppm, enquanto o tráfego para este ponto se manteve acima da média geral, 249. Neste ponto, a via apresenta classificação local, portanto, comporta maior volume de tráfego e tem grande extensão. Essa via dá acesso à praia e interliga bairros distantes da cidade. É uma via larga que permite grande ventilação e dispersão da poluição gerada pelo tráfego e outras fontes.

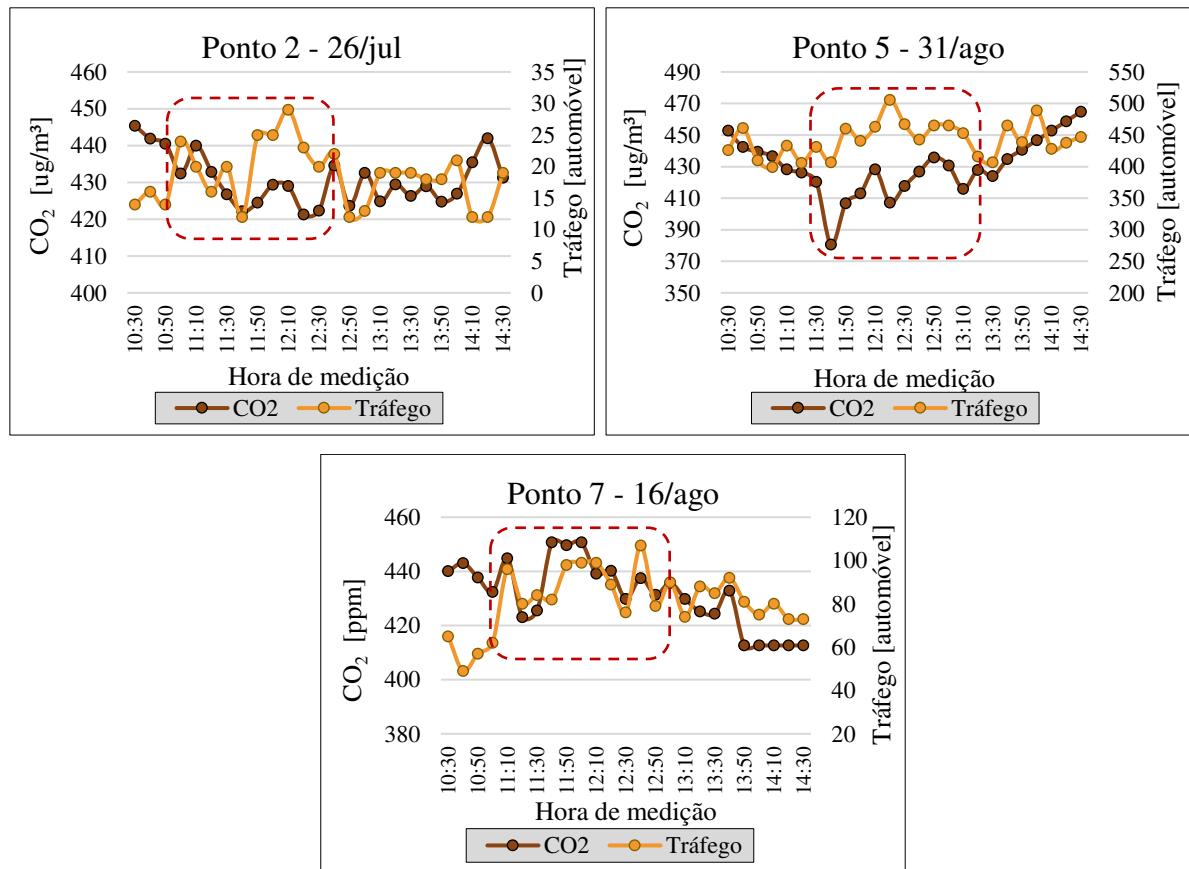
Figura 42 – Análise entre a concentração de CO₂ e volume de tráfego por ponto



Fonte: Elaborada pela autora.

Os pontos 2, 5 e 7, que apresentaram valores extremos para as variáveis (mínimos para tráfego e máximo para CO₂), foram detalhados por hora de medição na Figura 43, e indicam relações diretamente proporcionais em alguns períodos de coleta. Assim como o MP2,5, o CO₂ mostrou alguma relação com o tráfego em alguns pontos (2, 5 e 7), todavia nos demais não existe uma relação clara. Importante ressaltar que esses pontos (2, 5 e 7) que apresentaram alguma relação entre tráfego e CO₂ são diferentes daqueles que mostraram alguma relação entre tráfego e MP2,5 (1, 4 e 12). Esse resultado mostra que a dispersão do MP2,5 e do CO₂ deve ocorrer de maneira diferente, e uma das hipóteses para isso pode ser a interação que esses dois materiais têm com a umidade e com a temperatura e também a diferença da massa específica desses materiais pode ser um fator relevante para essa dispersão.

Figura 43 – Análise detalhada de CO₂ e tráfego dos pontos 2,5 e 7 no decorrer do dia

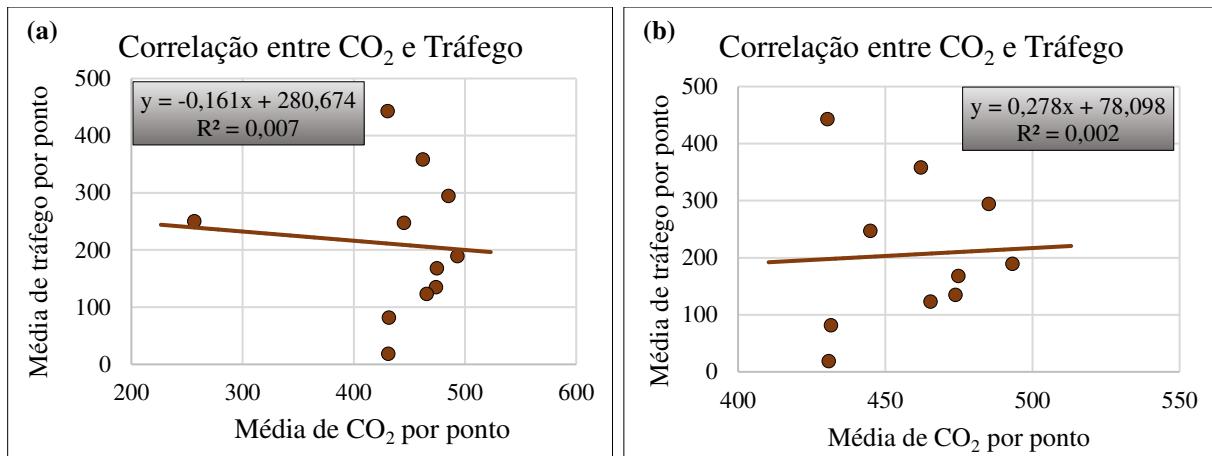


Fonte: Elaborada pela autora.

A mesma análise foi realizada entre o volume de tráfego e os índices de CO₂. Médias por ponto foram utilizadas para construir os gráficos de dispersão da Figura 44. Os dois gráficos contêm os mesmos dados, no entanto, a Figura 44(a) apresenta um possível *outlier*

representado pelo valor médio igual a 256ppm no ponto 6, já a Figura 46(b) foi construída para verificar a variabilidade dos dados sem este *outlier*, percebendo que o coeficiente de determinação não sofre alteração considerável, com R^2 igual a 0,007 e a 0,002, respectivamente.

Figura 44 – Variabilidade entre CO₂ e volume de tráfego



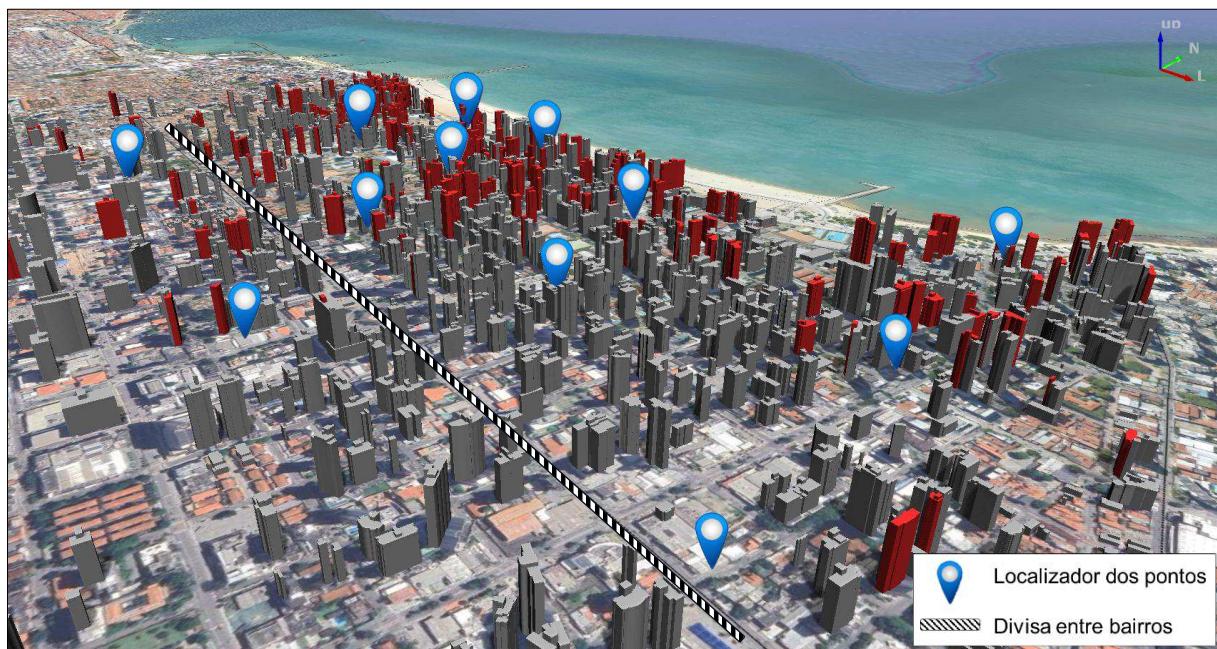
Fonte: Elaborada pela autora.

4.5 Relação entre variáveis

Este tópico apresenta análises entre variáveis, considerando os dados obtidos na Rodada 2 de ensaios com o *Sensenet* 3.0. Os valores obtidos em ambientes externos podem estar sujeitos a interferências de diversos fatores, como índices de velocidade e de direção dos ventos, que podem afetar a dispersão e concentração de poluição. Estas informações específicas não serão consideradas neste trabalho. Observações como a intensidade dos cânions, classificação das vias e vegetação podem ser inseridas em análises posteriores.

Um mapa foi construído e apresentado na Figura 45 com a representação da altura das edificações em 3D, os pontos de coleta e ainda características dos cânions urbanos. Para classificar uma estrutura como um cânion urbano profundo, a proporção entre a altura das edificações e a largura entre elas deve ser maior ou igual a 2. Na região examinada, essa proporção não foi alcançada. No entanto, sugerindo uma análise de cânions na área de estudo, os cânions maiores de 0,5 foram destacadas em vermelho.

Figura 45 – Visualização 3D das características urbanas, estrutura de cânions e localização dos pontos de coleta



Fonte: Elaborada pela autora.

Percebe-se que o bairro Meireles (à direita da linha de divisa entre bairros e com maior quantidade de pontos para verificação da influência da geometria) contém maior concentração de edifícios de maior altura e de cânions, enquanto o bairro Aldeota tem edificações altas espaçadas entre si.

Embora a altura das edificações influencie na concentração dos poluentes e a análise de correlação seja realizada, Ribeiro *et al.* (2019) salientam que a relação entre essas variáveis pode não ser direta, pois a análise por ponto indica que o impacto do gabarito pode ser suprimido pelo intenso tráfego, assim como gabaritos mais altos podem influenciar na dispersão dos poluentes pelo efeito de canalização dos ventos. Contudo, é crucial focar nas etapas de planejamento urbano e adotar práticas sustentáveis, para proteger a qualidade ambiental e a saúde pública proativamente, antes que os poluentes atinjam níveis alarmantes.

Na Tabela 16 está apresentado um resumo com todas as informações por ponto. Os índices de altura das edificações e cânions urbanos foram obtidos a partir de médias em um raio de até 100m. A classificação das vias em local ou arterial contribui na percepção da capacidade de tráfego, enquanto o tipo de pavimento é classificado em concreto asfáltico, intertravado e camada porosa de atrito (CPA). Este último, também envolve material asfáltico, mas sua estrutura é composta por vazios de ar que podem auxiliar na drenagem pluvial das vias. É possível que apresente um comportamento semelhante ao intertravado quando relacionado à

rugosidade superficial e maior deslocamento vertical dos veículos ao trafegar, gerando maiores emissões. No entanto, nos casos em que a manutenção não é adequada ou apresenta um longo tempo de uso (indicado aqui como “envelhecido”), seu comportamento pode ser semelhante ao revestimento asfáltico convencional, pois seus vazios estão preenchidos por partículas de poeira (da própria poluição atmosférica), areia e borracha de pneus (desgaste natural) e não cumprem a função inicialmente proposta, processo chamado de colmatação (Alecrim, 2021).

Tabela 16 – Resumo com média por ponto – *Sensenet 3.0*

Pontos	MP2,5 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	CO ₂ [ppm]	Tempera- tura [°C]	Umidade [%]	Tráfego	Altura das edificações [m]	Cânonis	Class. das vias	Pavimento
1	6	445	27	62	249	16	0,16	Local	Asfalto
2	4	431	33	50	18	18	0,13	Local	Asfalto
3	5	475	26	67	117	16	0,12	Local	Asfalto
4	14	0	0	0	241	16	0,12	Local	CPA (Envelhecido)
5	10	430	28	62	429	28	0,23	Arterial I	Asfalto
6	18	257	29	61	249	17	0,18	Local	Asfalto
7	5	432	26	59	82	23	0,15	Local	Asfalto
8	19	493	32	60	186	19	0,12	Local	Asfalto
9	9	485	28	57	290	9	0,04	Local	CPA (Envelhecido)
10	19	474	31	57	136	8	0,04	Local	Intertravado
11	11	465	29	58	118	17	0,16	Local	Asfalto
12	5	462	29	63	346	7	0,02	Arterial II	Asfalto

Fonte: Elaborada pela autora.

Os pontos 8 e 10 apresentaram os maiores índices de MP2,5 e estão associados à níveis altos de CO₂ e diferenças na variável de altura das edificações. Enquanto o ponto 8 tem médias de 19m na altura das edificações, influenciando na concentração dos poluentes, o ponto 10 apresenta prédios com cerca de 8m de altura e é composto pelo pavimento intertravado, sugerindo uma influência no aumento das emissões pelos veículos.

Nos demais casos, a interferência do tipo de pavimento não foi clara, ainda mais por não haver uma grande variação entre os pontos. Aqueles apresentados como “CPA (envelhecido)”, por ser um pavimento com mais tempo de uso e provavelmente colmatado,

assemelhando-se ao pavimento asfáltico convencional e não apresentando grande influência na poluição.

Os maiores índice de CO₂, nos pontos 1 e 8, estão associados a edificações mais altas. Embora os pontos estejam localizados em vias classificadas como locais, que dão acesso a residências e a comércios locais, estas são frequentemente utilizadas como rotas alternativas para o tráfego de vias maiores, o que tende a elevar os níveis de CO₂.

Os pontos 5 e 12 apresentam as maiores médias de tráfego associadas a vias arteriais que suportam maior número de veículos e facilitam a conexão entre áreas distantes da cidade. O ponto 5 também está associado a maior altura das edificações e cânion, 28m e 0,23 respectivamente. Porém, a via em que o ponto 5 está localizado é larga, justificando uma temperatura menor neste ponto, quando comparada às demais, pois uma maior área de circulação dos ventos permite uma redução do calor no ambiente.

Os pontos registrados com temperaturas semelhantes e baixas (pontos 3 e 7) apresentaram valores de umidade diferentes, de 67 e 59% respectivamente. Isso indica que a umidade pode ter sido afetada por variáveis divergentes entre os pontos.

4.5.1 Análises de correlação

Para tratar da relação entre as variáveis analisadas, uma matriz de correlação foi elaborada a partir dos valores de coeficiente de Pearson (r). Avaliar a significância de r representa um desafio nesta análise, dada a complexidade das relações entre as variáveis, o que pode dificultar a obtenção de valores elevados de r (próximos de -1 ou 1). Os valores são apresentados com base na média por ponto para todas as variáveis, conforme Figura 46. Ressalta-se que, para uma comparação rigorosa, os valores coletados no Ponto 4 foram retirados, pois os dados zerados de CO₂, temperatura e umidade poderiam mascarar os resultados de correlação.

A correlação negativa baixa entre MP2,5 e CO₂ pode representar uma relação inversamente proporcional entre as variáveis. No entanto, por ambas serem poluentes, esses resultados podem refletir em fontes diferentes de emissão ou processos distintos de dispersão dos poluentes no ambiente. Como esperado, as variáveis de temperatura e umidade apresentaram uma correlação inversamente proporcional relativamente alta ($r = -0,71$), ou seja, quanto mais alta a temperatura mais baixa a umidade, e vice-versa. Assim como, a altura das edificações e os cânions apresentam relação diretamente proporcional igual a 0,90, tendo em vista que uma variável é utilizada para calcular a outra.

Figura 46 – Matriz de correlação – Dados meteorológicos e poluentes

	MP2,5	CO ₂	Temperatura	Umidade	Tráfego	Altura das edificações	Cânilons urbano
MP2,5	1.00						
CO ₂	-0.23	1.00					
Temperatura	0.39	0.12	1.00				
Umidade	-0.06	-0.05	-0.71	1.00			
Tráfego	0.10	-0.11	-0.30	0.46	1.00		
Altura das edificações	-0.06	-0.24	-0.16	0.04	0.00	1.00	
Cânilons urbano	0.03	-0.46	-0.23	0.12	0.06	0.90	1.00

Fonte: Elaborada pela autora.

Parece haver uma proporcionalidade positiva entre tráfego e umidade ($r = 0,46$), indicando que maiores volumes de tráfego se relacionam com maiores índices de umidade, possivelmente justificado por fatores como o tempo nublado que podem levar a maior circulação de veículos, ou características específicas de cada ponto analisado, como vegetação abundante e corpos d'água nas proximidades (por estar próximo ao mar), que também aumentam a umidade na região.

Não foi possível justificar a correlação inversamente proporcional percebida entre CO₂ e cânilons, indicando que ambientes com cânilons mais baixos podem apresentar maiores concentrações de CO₂. Esta análise deve ser realizada juntamente com a obtenção de índices de ventilação, pois, mesmo que os cânilons sejam baixos, a concentração de fontes emissoras de CO₂ pode levar ao acúmulo de poluentes em áreas com menor ventilação, ou mesmo edifícios altos e distantes podem atuar como barreiras à circulação do vento ou redirecioná-lo.

O tráfego não parece ter uma forte correlação com a maioria dos indicadores ambientais; no entanto, seria esperado que um tráfego mais elevado resultasse em mais emissões. Outras fontes de emissões podem ser dominantes na região ou o tráfego pode não variar o suficiente entre os pontos para mostrar uma tendência significativa. Além disso, como já citado, as variáveis de velocidade e direção do vento interferem nas concentrações de poluentes mesmo com tráfego intenso, dependendo da estrutura urbana da região.

4.5.2 Regressão multilinear

Modelos de regressão multilinear foram usados para entender quais variáveis são mais significativas nos índices de poluição. Os valores coletados no ponto 4 foram retirados, pois os dados zerados de CO₂, temperatura e umidade poderiam mascarar a regressão. Foram testados seis modelos tendo MP2,5 e CO₂ como variáveis dependentes e diferentes combinações de variáveis independentes. Essa escolha se deu ao observar que os poluentes estudados não apresentaram grande relação entre si, ou seja, os maiores índices de MP2,5 nem sempre acompanham os maiores índices de CO₂, assumindo que as outras variáveis provavelmente contribuem mais para o comportamento de cada um deles.

Foi apresentado anteriormente que indicar a significância de um coeficiente de correlação (*r*) pode ser difícil ao avaliar relações complexas entre variáveis. Isso acontece com a poluição atmosférica, pois os fatores analisados não são os únicos influentes no comportamento dos poluentes e podem não ser suficientes para explicá-lo. O mesmo ocorre com a verificação do coeficiente de determinação (*R*²). Isso demonstra que a verificação de diferentes variáveis independentes é essencial para nortear as medições e coletas de dados futuros.

As Tabelas 17 e 18 resumem seis modelos de regressão multilinear para MP2,5 e CO₂, com diferentes variáveis independentes. Os modelos são avaliados por *R*² múltiplos, indicando quão bem o modelo prediz os resultados da variável dependente. A significância estatística das variáveis é indicada pelos valores de *p* < 0,05, juntamente com o erro padrão.

Tabela 17 – Regressão multilinear tendo MP2,5 como variável dependente

Variável Dependente MP2,5	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5	Modelo 6
Temperatura	9,003E-13*** (0,195)	-	-	1,402E-13*** (0,194)	5,111E-11*** (0,202)	1,393E-19*** (0,224)
Umidade	1,001E-06*** (0,104)	-	-	4,526E-05*** (0,110)	0,086* (0,142)	0,007*** (0,161)
Tráfego	-	-	0,605 (0,003)	0,454 (0,003)	0,489 (0,004)	3,194E-09*** (0,004)
Altura dos edifícios	-	0,002*** (0,136)	0,002*** (0,137)	7,425E-04*** (0,125)	-	1,829E-17*** (0,298)
Cânions urbanos	-	0,002*** (13,521)	0,003*** (13,671)	1,005E-04*** (12,496)	-	2,824E-15*** (35,519)
Vegetação 100m	-	-	-	-	0,231 (0,023)	9,422E-17*** (0,046)
Vegetação 250m	-	-	-	-	0,072* (0,007)	1,315E-10*** (0,019)
Vegetação 500m	-	-	-	-	0,013** (0,002)	3,281E-09*** (0,006)
R² múltiplo	0,415	0,192	0,195	0,469	0,457	0,634
Número de observações	275	275	275	275	275	275

Notas:

Erros padrão entre parênteses

* para p < 0,1; ** para p < 0,05; *** para p < 0,01

Os resultados mostraram que a concentração de MP2,5 (variável dependente) pode ser moderadamente explicada por variáveis independentes (como temperatura, umidade, tráfego, etc.) para os modelos 1 e 4, com R² múltiplo de 0,42 e 0,47 respectivamente. Além disso, as variáveis independentes são estatisticamente significativas (valor p < 0,01), exceto pelo tráfego, que não apresentou bons resultados de valor p nos modelos 3, 4 e 5.

Os modelos 2 e 3 apresentaram baixo R² múltiplo, igual a 0,19 para ambos, o que indica que os índices urbanos por si só não têm potencial explicativo para prever a variabilidade de MP2,5. No entanto, ao incorporar valores de temperatura e umidade na análise, houve uma melhora nos resultados, sugerindo que os fatores climáticos podem exercer uma influência mais significativa na explicação da variabilidade das concentrações de MP2,5 quando comparado aos índices urbanos.

Para os modelos 5 e 6 foram acrescentadas variáveis relacionadas a vegetação na área de estudo em um raio de 100, 250 e 500 metros do ponto de coleta. O modelo 5, com R² múltiplo de 0,45 se assemelha ao desempenho dos modelos 1 e 4, enquanto o modelo 6 tem destaque, com R² igual a 0,63 e valores p de todas as variáveis estatisticamente significativos (valor p < 0,01), inclusive o tráfego, que não se apresentou relevante nos demais modelos.

Em todos os casos, temperatura, umidade, altura dos edifícios e valores de cânion

mostraram relevância estatística para os modelos propostos, com valores p menores que 0,01. No entanto, essa relevância não foi suficiente para que os modelos se tornassem adequados para prever os valores de MP2,5, especialmente os modelos 2 e 3. O Apêndice B apresenta gráficos que comparam o valor medido com o valor previsto, considerando o modelo 6 (Equação 2) que se mostrou o mais adequado para explicar o comportamento do MP2,5.

$$MP2.5 = (-108,271) + (2,199 * \text{temperatura}) + (0,433 * \text{umidade}) + (0,029 * \text{tráfego}) + (-2,724 * \text{altura das edificações}) + (298,141 * \text{cânions}) + (0,405 * \text{vegetação 100m}) + (-0,133 * \text{vegetação 250m}) + (0,035 * \text{vegetação 500m}) \quad (2)$$

Tabela 18 – Regressão multilinear tendo CO₂ como variável dependente

Variável dependente: CO ₂	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5	Modelo 6
Temperatura	0,157 (2,285)	-	-	0,755 (1,902)	-	0,424 (2,370)
Umidade	0,444 (1,219)	-	-	0,080* (1,081)	-	0,893 (1,705)
Tráfego	-	-	0,828 (0,027)	0,251 (0,030)	4,847E-04*** (0,045)	0,0003*** (0,050)
Altura dos edifícios	-	2,277E-13*** (1,209)	4,440E-13*** (1,221)	1,111E-13*** (1,223)	0,665 (2,728)	0,906 (3,156)
Cânions urbanos	-	8,615E-23*** (120,008)	2,831E-22*** (121,391)	7,088E-23*** (122,244)	0,241 (310,879)	0,621 (375,515)
Vegetação 100m	-	-	-	-	0,005*** (0,412)	0,003*** (0,481)
Vegetação 250m	-	-	-	-	0,018** (0,165)	0,022** (0,210)
Vegetação 500m	-	-	-	-	0,001*** (0,049)	0,003*** (0,062)
R² múltiplo	0,088	0,579	0,579	0,588	0,642	0,644
Número de observações	275	275	275	275	275	275

Notas:

Erros padrão entre parênteses

* para p < 0,1; ** para p < 0,05; *** para p < 0,01

Quando o CO₂ é a variável dependente, os modelos 2, 3 e 4 apresentaram resultados semelhantes com R² múltiplos de 0,58, 0,58 e 0,59 respectivamente. O modelo 1, apenas com as variáveis temperatura e umidade, apresentou potencial explicativo muito baixo para o CO₂. Contudo, ao examinar os valores p associados às variáveis independentes, apenas os índices urbanos apresentam significância estatística (valor p < 0,01). Consequentemente, mesmo com

a inclusão de variáveis adicionais como temperatura, umidade e tráfego, seus resultados não impactaram a previsão das concentrações de CO₂.

Os modelos 5 e 6, com os índices de arborização, obtiveram maior poder explicativo para o CO₂, considerando o R² múltiplo igual a 0,63 e 0,64, respectivamente. No entanto, ambos apresentam variáveis não significativas estatisticamente (valor p > 0,1) e por isso o modelo mais adequado para este caso foi o modelo 2. O Apêndice C apresenta gráficos que comparam o valor medido com o valor previsto pelo modelo 2.

Essas análises reforçam a importância da verificação tanto dos índices climáticos quanto das características urbanas e vegetação para analisar a poluição atmosférica, considerando que o MP2,5 e o CO₂ foram influenciados de forma diferente por cada um. É necessária uma coleta de dados e informações mais aprofundadas e detalhadas sobre o tráfego e outros aspectos envolvidos na análise da infraestrutura de transporte, considerando que é uma das principais responsáveis pela emissão/concentração de poluição com base na literatura. Assim, seria possível identificar como incorporar o tráfego de forma significativa nos modelos de regressão multilinear.

Vale ressaltar também que as variáveis provavelmente não estão se comportando de forma linear, considerando o ambiente urbano complexo em estrutura e interferência, motivando estudos que demonstrem a relação não linear e modelos mais robustos para compreensão dos índices estudados.

Por fim, a obtenção dos modelos de regressão multilinear foi de grande importância para compreender os índices mais significativos para os poluentes. A inclusão de vegetação mostrou ser promissora, especialmente no modelo 6, que apresentou o melhor desempenho para a variável dependente MP2,5, enquanto o modelo 2 (Equação 3) foi o melhor para o CO₂, em que os índices urbanos demonstraram maior poder explicativo.

$$CO2 = (449,323) + (9,329 * \text{altura das edificações}) + (-1293,536 * \text{câmpions}) \quad (3)$$

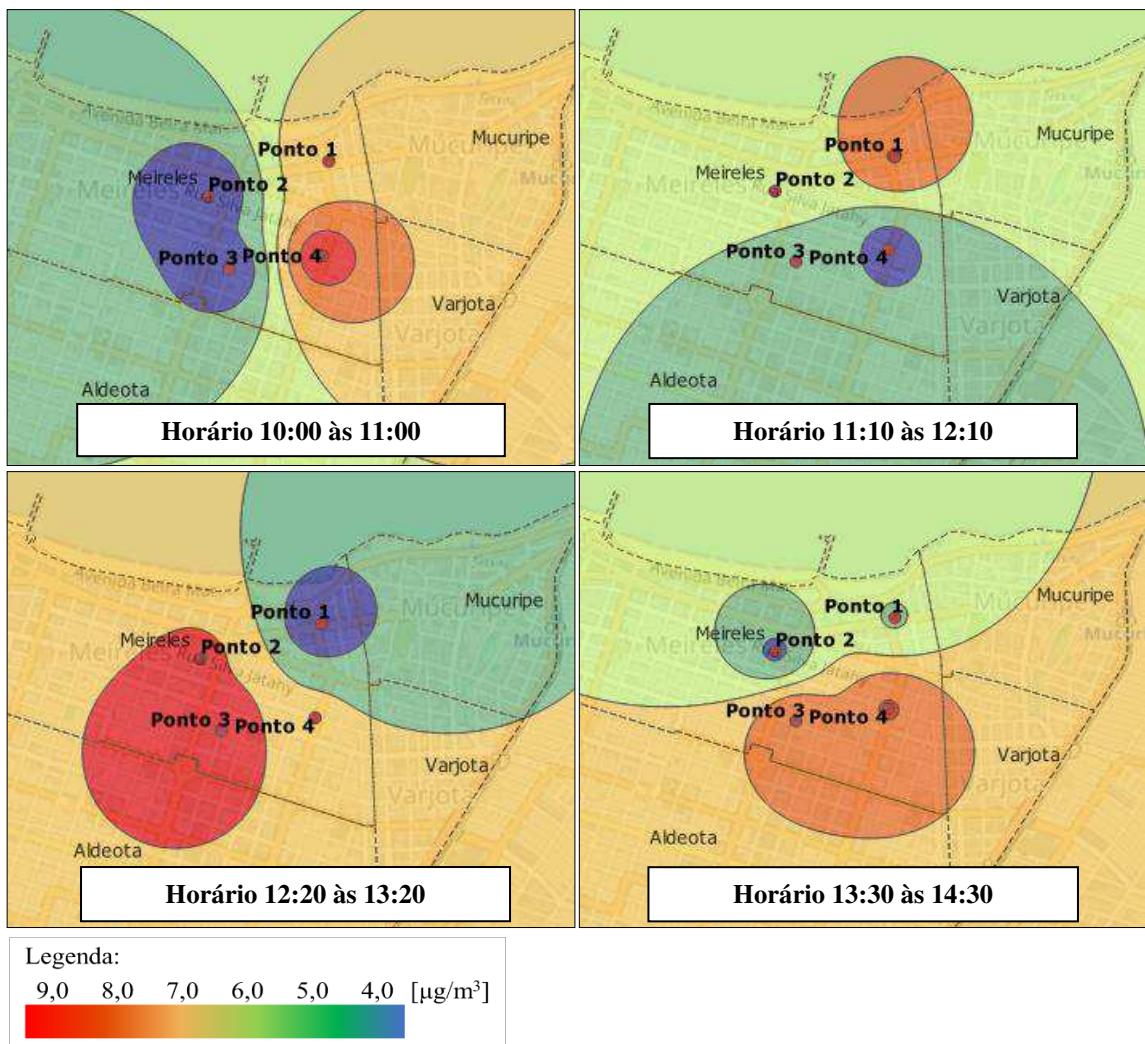
4.6 Mapas georreferenciados e comparação entre pontos

Este tópico tem como foco realizar uma análise espacial dos dados obtidos de cada variável. Inicialmente, os resultados da Rodada 1 são apresentados e explorados, seguido dos dados da Rodada 2, em que a estratégia de interpolação IDW foi otimizada.

4.6.1 Resultados obtidos na Rodada 1 – Mapas de calor com dados do Senenet 2.0

Os quatro pontos selecionados foram empregados na criação de mapas de calor de poluentes, calculados a partir da média dos valores obtidos durante 1h contínua de medição. A Figura 47 ilustra os mapas gerados a partir da simplificação dos valores obtidos (em $\mu\text{g}/\text{m}^3$) utilizando o método de interpolação IDW descrito na metodologia da pesquisa, permitindo estimar valores nas proximidades dos pontos de medição com base em suas distâncias.

Figura 47 – Mapa de concentração de MP2,5 por hora de coleta



Fonte: Elaborada pela autora.

Uma análise temporal da dispersão dos poluentes revela um aumento concêntrico nos valores de MP2,5. As medições realizadas às 10h tendem a se concentrar no ponto 4, localizado ao sul, onde há uma avenida que suporta maior tráfego e se caracteriza por apresentar muitos locais de trabalho, tornando-se um trajeto com tráfego constante durante todo o período de coleta, pois interliga a área de estudo no sentido sul à norte. Assim como no ponto 1,

localizado em uma avenida com pontos de comércio e de tráfego intenso, inclusive, de veículos pesados, que apresentou um aumento na concentração de poluição entre 10:00 e 12:10.

Ao longo da manhã, observa-se um deslocamento em direção ao oeste, possivelmente relacionado ao movimento de veículos durante o horário de almoço, quando as atividades se concentram na região comercial do centro do bairro Aldeota. Embora o ponto 2 apresente um pico de concentração em determinado momento, sua medição média permanece mais baixa, o que era esperado, pois está localizado em uma área com cânions pronunciados, que apresentam maior altura de edifícios e menor largura de vias, porém predominantemente residencial, com menor fluxo de veículos.

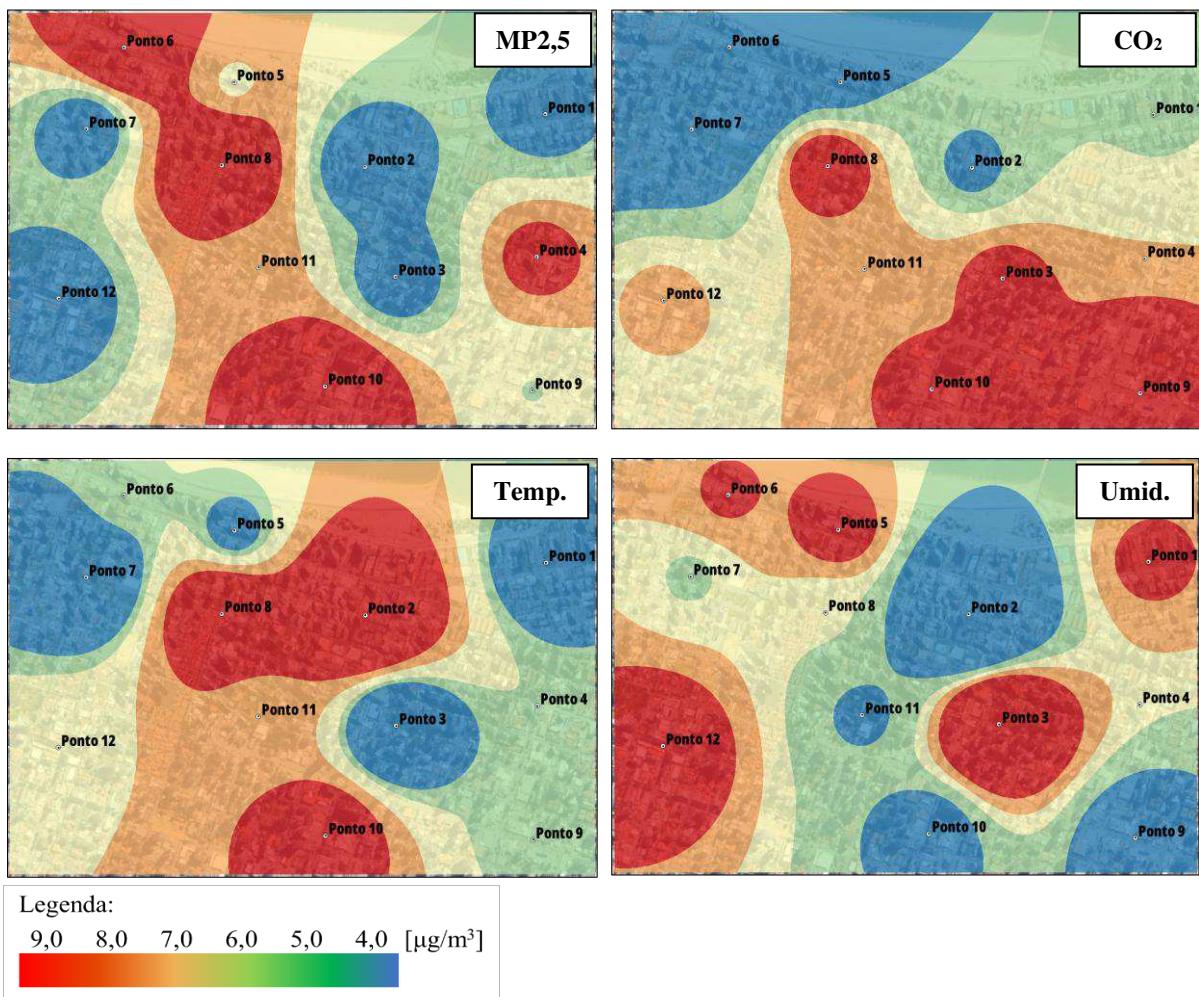
É importante enfatizar que os resultados apresentados baseiam-se em hipóteses formuladas a partir da compreensão do comportamento da poluição no ambiente urbano e características da cidade. Embora não sejam validados por dados reais relacionados, por exemplo, a porcentagens de edificações com fins comerciais e residenciais, ou trajeto com finalidade de trabalho ou turismo, entre outros aspectos que não foram retratados neste estudo. Essa abordagem a partir de hipóteses é crucial no desenvolvimento do conhecimento na área de poluição atmosférica e sua influência oriunda da infraestrutura urbana e viária, fornecendo base teórica para futuras investigações.

4.6.2 Resultados obtidos na Rodada 2 – Mapas de calor com dados do Sensenet 3.0

A grande diferença entre as Rodadas 1 e 2 para este tópico é que, na Rodada 1, não foram utilizados os polígonos de Voronoi nem critérios de buffer para estabelecer a área a ser interpolada. Já na Rodada 2, o procedimento segue estritamente o que foi descrito na metodologia.

As informações foram carregadas no QGIS para obtenção de mapas de calor de cada variável. Na Figura 48 estão apresentados os mapas de MP2,5, CO₂, Temperatura e Umidade, com médias por ponto durante todo o período de ensaio. A escala de cores dos mapas usa o vermelho para regiões com valores maiores e azul para os locais com valores menores, com variação entre elas de laranja, amarelo e verde. Ressalta-se que, para o mapa de CO₂, Temperatura e Umidade, o ponto 4 não é representado, pois não houve medição neste ponto.

Figura 48 – Mapas com Interpolação IDW para MP2,5, CO₂, temperatura e umidade



Fonte: Elaborada pela autora.

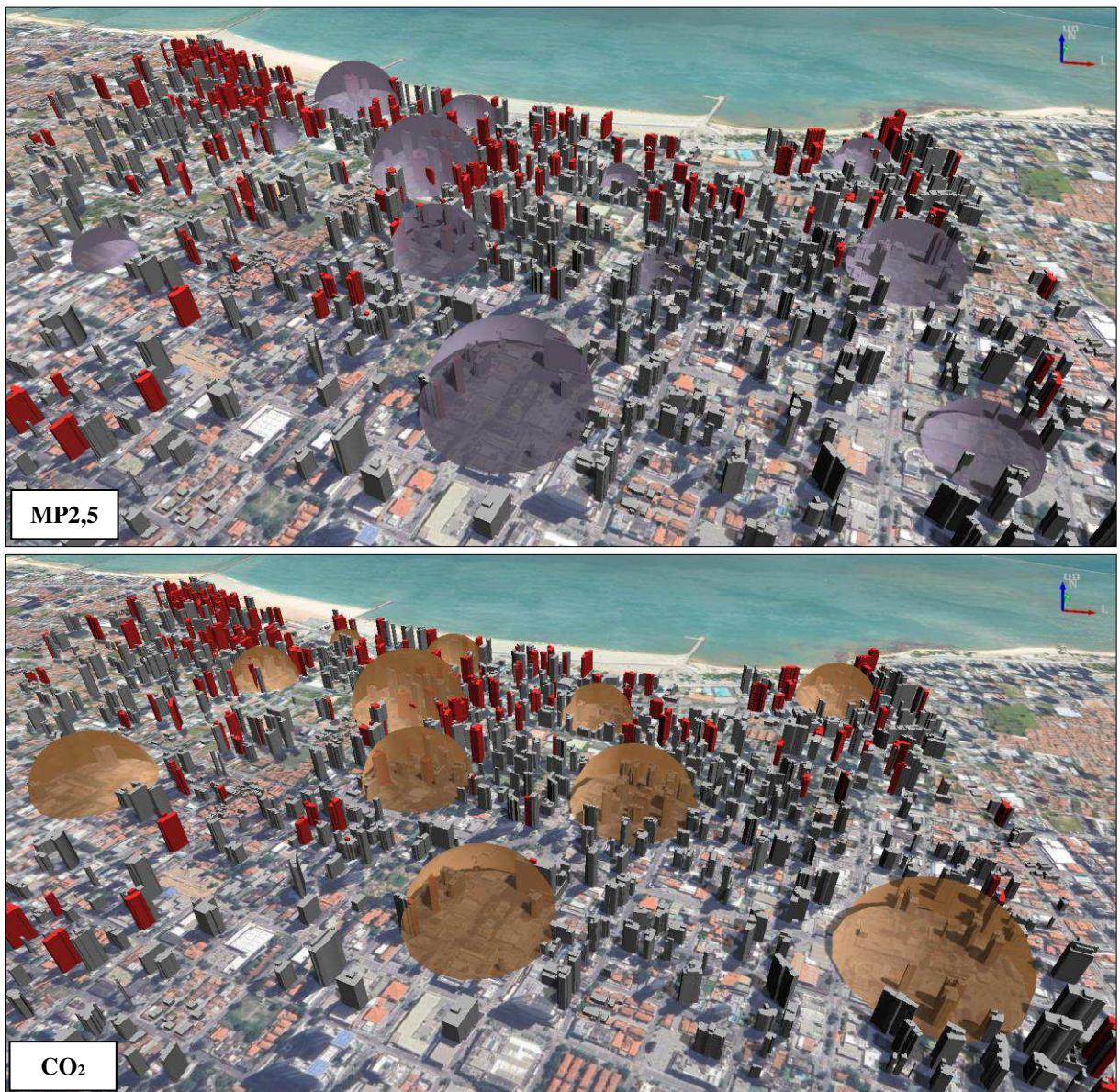
Percebe-se os pontos 6, 8 e 10 com destaque para o poluente MP2,5, médias entre 18 e 19 µg/m³. Para o CO₂, destaca-se o ponto 6, que apresentou o menor índice na faixa de 200ppm, suavizado no mapa após a interpolação, otimizando a visualização de seu impacto na área de estudo. Pode-se observar ainda as cores mais intensas nos pontos 8 e 9, com médias aproximadas de 480 e 490ppm, que interferem nos índices interpolados em seu entorno.

A temperatura e a umidade possuem escalas basicamente invertidas, no sentido de que onde a temperatura é mais alta, a umidade é mais baixa (pontos 2 e 3). Os pontos 7 e 8 apresentam picos de temperatura positivos e negativos que não são tão claramente vistos no gráfico de umidade, embora apresentem convergência entre as médias. A intensidade de umidade nesses pontos foi menor.

Em continuidade às análises de mapas realizadas nos tópicos anteriores, a Figura 49 traz um complemento da Figura 45, apresentando os mapas de poluição de MP2,5 e CO₂ em escala 3D, para análise da relação entre poluição e cânions. É perceptível que mesmo em regiões

onde as edificações estão mais próximas umas das outras, os níveis de poluição podem ser menores, demonstrando a interferência da ventilação no local, principalmente em um ambiente tão próximo da praia. Em áreas com cânions menores, alguns índices de poluição são elevados, o que pode indicar fontes estacionárias na área, não necessariamente provenientes do tráfego.

Figura 49 – Mapas com representação 3D da poluição atmosférica – Variáveis MP2,5 e CO₂



Fonte: Elaborada pela autora.

5 CONCLUSÕES

Este estudo foi concebido com o objetivo de entender a variação da concentração de poluentes e seus interferentes, sobretudo associados à infraestrutura e ao transporte urbano, identificando a melhor estratégia de coleta de dados em determinadas regiões de Fortaleza/CE, a partir da utilização de um equipamento de baixo custo construído para a coleta dos dados.

Uma das etapas do trabalho foi contribuir para o desenvolvimento de um equipamento de baixo custo para mensurar níveis de poluição, permitindo assim identificar como as características urbanas e variáveis meteorológicas podem influenciar no comportamento da poluição. Foram coletados dados de poluentes atmosféricos, variáveis meteorológicas e volume de tráfego em doze pontos distribuídos em dois bairros da cidade de Fortaleza, além de classificação das vias, tipo de pavimento e altura das edificações para entender suas influências na concentração de poluentes.

De acordo com a metodologia utilizada e os locais escolhidos para coleta de dados as seguintes conclusões foram obtidas:

- O desenvolvimento de um equipamento de baixo custo se mostrou uma alternativa eficaz na coleta de dados de poluentes atmosféricos e variáveis meteorológicas. Essa conclusão é embasada na comparação dos resultados obtidos pelo equipamento construído e estudos anteriores realizados em áreas com características semelhantes em Fortaleza. Além da eficiência técnica do equipamento desenvolvido, seu desenvolvimento custou 4,8% do valor de mercado do equipamento Casella e 1,1% do valor estimado para o equipamento Hi-Vol 3000.
- Coletar os dados de poluição em um ponto específico em um único dia mostrou maior regularidade do que a coleta de diferentes pontos no mesmo dia. Os dados de poluição não mostraram variação significativa com a mudança da hora de coleta, ou seja, os valores coletados durante o período matutino se mostraram próximos aos valores coletados no período vespertino.
- O volume de tráfego não se mostrou um interferente da concentração de material particulado e dióxido de carbono, havendo uma grande dispersão e uma baixa correlação entre essas variáveis. Acredita-se que a velocidade e a direção dos ventos, não coletados neste trabalho, podem influenciar de maneira diferente na concentração medida em cada um dos pontos analisados, por exemplo, uma maior velocidade do vento em um ponto causa uma maior dispersão dos poluentes neste ponto que pode mascarar a influência do tráfego.

- Os modelos de regressão indicaram maior influência das características meteorológicas na previsão do material particulado no ambiente, enquanto a infraestrutura urbana por si só não explicou a variabilidade do MP2,5. Quanto aos índices de CO₂, foi possível identificar um efeito significativo das variáveis de infraestrutura urbana na poluição atmosférica medida, indicando a importância de analisar diferentes variáveis com vistas a obter modelos de previsão confiáveis.
- Para a área estudada, a concentração de MP2,5 e de CO₂ tiveram valores condizentes com a literatura e ficaram abaixo dos valores permitidos pelas regulamentações do CONAMA e da ANVISA.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

A seguir, estão apresentadas sugestões para trabalhos futuros, relacionados à otimização de sensores de baixo custo, como o *Sensenet*, e ao aprofundamento da temática:

- **Otimização e coleta de dados:** Aprimorar versões futuras de um sensor como o *Sensenet* para coleta de dados de MP2,5, CO₂, temperatura, umidade, incluindo correção de valores de MP10 e adicionar a obtenção de informações de velocidade e direção do vento para uma análise detalhada sobre poluição e ilhas de calor.
- **Análise integrada de vias urbanas:** Investigar o impacto dos materiais do revestimento do pavimento, a idade da via e as características do tráfego na poluição atmosférica, além de classificar as vias em termos de qualidade e condições de manutenção. Esses fatores são importantes para entender a economia de combustível, o desempenho veicular e a ressuspensão de partículas.
- **Análise e modelagem urbana com dados de satélite:** Ampliar as análises do ambiente urbano com uso de imagens de satélite, áreas impermeabilizadas e ocupadas pela pavimentação, além das características físicas de vegetação e de corpos d'água. A presença de vegetação e corpos d'água, como lagoas artificiais, contribuem significativamente para o conforto térmico nas áreas urbanas, auxiliando na purificação do ar, na redução da temperatura local e na mitigação das ilhas de calor. Essas análises deverão ser acompanhadas pelo uso de ciência de dados e de modelos climáticos, para compreensão dos efeitos em conjunto das variáveis nas mudanças climáticas e na poluição atmosférica urbana, além de previsão de cenários futuros diante das ações a serem implementadas. Cabe ainda um esforço para investir na obtenção de dados sintéticos, sendo informações criadas por algoritmos e simulações que imitam dados do

mundo real, para serem implementados em modelos de previsão e suprimir a problemática da falta de dados.

- **Expansão da coleta de dados e monitoramento:** Ampliar a área de estudo com a instalação de múltiplos dispositivos em locais variados e por tempos prolongados. Distribuir *Sensenets* para coleta contínua de dados por usuários em veículos ou em pontos fixos como residências e comerciais, com foco em monitorar áreas de alta poluição e avaliar o conforto ambiental urbano. Esta sugestão está de acordo com as próximas etapas a serem desenvolvidas no projeto de colaboração entre a Universidade Federal do Ceará e a Samsung.

Essas informações poderiam ser utilizadas para manutenção de praças e vias, validação da urbanização local e identificação de áreas críticas de temperatura e poluição, fornecendo *insights* essenciais para o planejamento urbano e desenvolvimento da cidade. O monitoramento é fundamental para prevenir eventos naturais extremos, cada vez mais comuns, ajudando a entender como podem acontecer e a motivar governos e comunidades a adotarem práticas sustentáveis.

REFERÊNCIAS

- ABVE. Associação Brasileira de Veículo Elétrico. **Elétricos crescem em todas as regiões do Brasil.** 2024. Disponível em: <http://www.abve.org.br/veiculos-eletricos-crescem-em-todo-o-pais/>. Acesso em: 17 fev. 2024.
- ABVE. Associação Brasileira de Veículo Elétrico. **Eletrificados fecham 2022 com novo recorde.** 2023. Disponível em: <http://www.abve.org.br/eletrificados-fecham-2022-com-novo-recorde-de-vendas/>. Acesso em: 17 fev. 2024.
- AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (Brasil). **Resolução-RE nº 9, de 16 de janeiro de 2003.** Disponível em: https://antigo.anvisa.gov.br/documents/10181/2718376/RE_09_2003_.pdf/8ccafc91-1437-4695-8e3a-2a97deca4e10. Acesso em: 05 set. 2023.
- AGROSENSORES. *Estação Meteorológica Davis Vantage Vue.* Disponível em: <https://www.agrosensores.com.br/estacoes/estacao-meteorologica-davis-vantage-vue-300m-tem-umid-vento-chuva-e-bar>. Acesso em: 05 nov. 2022.
- AGUIAR, L. M.; SILVA, M. V.; GANDU, A. W.; ROCHA, C. A.; CAVALCANTE, R. M. Caracterização de cânions urbanos e seus efeitos climáticos em área com intenso processo de verticalização na cidade de Fortaleza-CE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [s.l.], v. 10, n. 4, p. 1046, 16 maio 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.26848/rbgf.v10.4.p1046-1058>.
- AGUIAR, S. O.; ARAÚJO, R. S.; CAVALCANTE, F. S. A.; LIMA, R. K. C.; BERTONCINI, B. V.; LIMA, R. K. C.; OLIVEIRA, M. L. M. Avaliação das emissões de escapamento veicular em condições específicas do motor: partida e marcha-lenta. **Transportes**, [s.l.], v. 23, n. 3, p. 35, 23 dez. 2015. Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes. DOI: <http://dx.doi.org/10.14295/transportes.v23i3.896>.
- AHN, H.; LEE, J.; HONG, A. Does urban greenway design affect air pollution exposure? A case study of Seoul, South Korea. **Sustainable Cities and Society**, [s.l.], v. 72, p. 1-14, set. 2021. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2021.103038>. Acesso em: 13 mar. 2024.
- AKBARI, H.; CARTALIS, C.; KOLOKOTSA, D.; MUSCIO, A.; PISELLO, A. L.; ROSSI, F.; SANTAMOURIS, M.; SYNNEF, A.; WONG, N. H.; ZINZI, M. Local climate change and urban heat island mitigation techniques – The State of the Art. **Journal of Civil Engineering and Management**, [s.l.], v. 22, n. 1, p. 1-16, 18 dez. 2015. Vilnius Gediminas Technical University. DOI: <http://dx.doi.org/10.3846/13923730.2015.1111934>.
- AKBARI, H; POMERANTZ, M; TAHA, H. Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. **Solar Energy**, [s.l.], v. 70, n. 3, p. 295-310, 2001. Elsevier BV. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/s0038-092x\(00\)00089-x](http://dx.doi.org/10.1016/s0038-092x(00)00089-x).
- ALECRIM, C. M. C. **Avaliação da utilização de camada porosa de atrito em vias do meio urbano.** 2021. 185 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/60371/1/2021_dis_cmcalecrim.pdf. Acesso em: 23 jun. 2023.

ANDRADE FIALHO, M. H. S.; BERTONCINI, B. V. Logística verde, roteirização verde e eficiência energética: uma análise de oportunidades a partir da evolução conceitual. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES. 34º., 2020, 100% Digital. Anais [...], [s.l.]: Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2020. p.1921-1932.

AQI. [Índice de Qualidade do Ar]. Disponível em: <https://www.aqi.in/pt>. Acesso em: 14 nov. 2023.

ARI, D.; ALAGOZ, B. B. An effective integrated genetic programming and neural network model for electronic nose calibration of air pollution monitoring application. **Neural Computing and Applications**, [s.l.], v. 34, n. 15, p. 12633-12652, 14 mar. 2022. Springer Science and Business Media LLC. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00521-022-07129-0>.

ARMBRUST, M.; FOX, A.; GRIFFITH, R.; JOSEPH, A. D.; KATZ, R.; KONWINSKI, A.; LEE, G.; PATTERSON, D.; RABKIN, A.; STOICA, I. A view of cloud computing. **Communications of the ACM**, [s.l.], v. 53, n. 4, p. 50-58, abr. 2010. Association for Computing Machinery (ACM). DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/1721654.1721672>.

AZEVEDO, J. A. H.; CASTRO, A. H. S.; LIMA, R. M.; CASSIANO, D. R.; BRITO, P. H. F.; NASCIMENTO, R. S. B.; OLIVEIRA, M. L. M.; ARAÚJO, R. S. Monitoramento atmosférico de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos em uma área de intenso fluxo veicular da cidade de Fortaleza - Ceará. In: XX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 20., 2015, Florianópolis. Anais [...]. Florianópolis: Edgard Blücher, 2015. v. 1, p. 7183-7190. DOI: <http://dx.doi.org/10.5151/chemeng-cobeq2014-0481-25280-146036>.

BACHECHI, C.; PO, L.; ROLLO, F. Big Data Analytics and Visualization in Traffic Monitoring. **Big Data Research**, [s.l.], v. 27, p. 1-40, fev. 2022. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.bdr.2021.100292>. Acesso em: 05 ago. 2023.

BALES, M. P.; SILVA, S. R.; DIAS, C.; SANTOS, W. O. A avaliação do programa brasileiro de etiquetagem veicular demonstra a necessidade da melhoria contínua. **Blucher Engineering Proceedings**, [s. l.], v. 2, n. 1, p. 583-593, set. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5151/engpro-simea2015-PAP199>. Acesso em: 10 nov. 2023.

BERINGUI, K.; QUIJANO, M.; JUSTO, E.; VENTURA, L.; GIODA, A. Avaliação da concentração e composição inorgânica do material particulado coletado no estado do Rio de Janeiro. **Química Nova**, [s.l.], v. 44, n. 6, p. 737-754, 18 fev. 2021. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). DOI: <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170717>.

BONSU, N. O. Towards a circular and low-carbon economy: insights from the transitioning to electric vehicles and net zero economy. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 256, p. 1-14, maio 2020. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120659>. Acesso em: 14 fev. 2024.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Guia técnico para o monitoramento e avaliação da qualidade do ar**. 2019. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/agenda-ambiental-urbana/qualidade-do-ar.html>. Acesso em: 03 jan. 2023.

- BRASIL. Senado Federal. Agência Senado. **Política Nacional de Qualidade do Ar vai à sanção**. 2024. Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2024/03/26/politica-nacional-de-qualidade-do-ar-vai-a-sancao>. Acesso em: 27 abr. 2024.
- BRASÍLIA AMBIENTAL. Governo do Distrito Federal. Disponível em: <https://www.ibram.df.gov.br/programa-de-monitoramento-da-qualidade-do-ar-do-df/>. Acesso em: 14 nov. 2023.
- CARVALHO, C. H. R. **Emissões relativas de poluentes do transporte motorizado de passageiros nos grandes centros urbanos brasileiros**. 2011. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/1578/1/td_1606.pdf. Acesso em: 15 mar. 2022.
- CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/padroes-de-qualidade-do-ar/>. Acesso em: 14 nov. 2023.
- CETIN, M. The effect of urban planning on urban formations determining bioclimatic comfort area's effect using satellitia imagines on air quality: a case study of Bursa city. **Air Quality, Atmosphere & Health**, [s.l.], v. 12, n. 10, p. 1237-1249, 31 ago. 2019. Springer Science and Business Media LLC. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11869-019-00742-4>.
- CHAU, P. N.; ZALAKEVICIUTE, R.; THOMAS, I.; RYBARCZYK, Y. Deep Learning Approach for Assessing Air Quality During COVID-19 Lockdown in Quito. **Frontiers In Big Data**, [s.l.], v. 5, p. 1-13, 4 abr. 2022. Frontiers Media SA. DOI: <https://doi.org/10.3389/fdata.2022.842455>.
- CHE, W.; ZHANG, Y.; LIN, C.; FUNG, Y. H.; FUNG, J. C. H.; LAU, A. K. H. Impacts of pollution heterogeneity on population exposure in dense urban areas using ultra-fine resolution air quality data. **Journal of Environmental Sciences**, [s.l.], v. 125, p. 513-523, mar. 2023. Elsevier BV. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.02.041>.
- CHIU, C.; CHEN, M.; CHANG, F. Carbon Dioxide Concentrations and Temperatures within Tour Buses under Real-Time Traffic Conditions. **Plos One**, [s.l.], v. 10, n. 4, p. 1-12, 29 abr. 2015. Public Library of Science (PLoS). DOI: <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0125117>.
- CHOJER, H.; BRANCO, P.T.B.S.; MARTINS, F.G.; ALVIM-FERRAZ, M.C.M.; SOUSA, S.I.V. Development of low-cost indoor air quality monitoring devices: recent advancements. **Science of the Total Environment**, [s.l.], v. 727, p. 1-18, jul. 2020. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138385>. Acesso em: 26 mar. 2024.
- CLEAN ENVIRONMENT BRASIL. *Catálogo do Produto*. Disponível em: <https://www.clean.com.br/Arquivos/Produto/catalogo-163056.pdf>. Acesso em: 05 nov. 2022.
- CLIMAINFO. **Londres se prepara para expandir restrições a carros poluentes**. 2023. Disponível em: <https://climainfo.org.br/2023/08/27/londres-se-prepara-para-expandir-restricoes-a-carros-poluentes/>. Acesso em: 22 nov. 2023.
- CLIMATEWATCH. **Quais compromissos climáticos o Brasil apresentou?** 2023. Disponível em:

https://www.climatewatchdata.org/countries/BRA?end_year=2020&start_year=1990. Acesso em: 05 dez. 2023.

COELHO, S.; FERREIRA, J.; RODRIGUES, V.; LOPES, M. Source apportionment of air pollution in European urban areas: lessons from the ClairCity project. **Journal of Environmental Management**, [s.l.], v. 320, p. 1-10, jul. 2022. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115899>. Acesso em: 26 mar. 2023.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (Brasil). **Resolução CONAMA nº 491, de 19 de novembro de 2018**. Disponível em: <https://conama.mma.gov.br/atos-normativos-sistema>. Acesso em: 23 jul. 2023.

COSTA, J. O. P. D. Normalização para a inovação: o programa brasileiro de etiquetagem veicular (PBE-V). 2017. Disponível em: <http://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/8943>. Acesso em: 02 nov. 2022.

COWELL, N.; CHAPMAN, L.; BLOSS, W.; SRIVASTAVA, D.; BARTINGTON, S.; SINGH, A. Particulate matter in a lockdown home: evaluation, calibration, results and health risk from an IoT enabled low-cost sensor network for residential air quality monitoring. **Environmental Science: Atmospheres**, [s.l.], v. 3, n. 1, p. 65-84, 2023. Royal Society of Chemistry (RSC). DOI: <http://dx.doi.org/10.1039/d2ea00124a>.

DIAS, H. L. F. **Methodology for air pollution impact assessment of low emission zones in urban areas of Brazil - The case study of Fortaleza**. 2019. 197 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019. Acesso em: 07 set. 2023.

DÍEZ, B. Por que Los Angeles está pintando o asfalto da cidade de cinza claro. **BBC News Brasil**, 29 set. 2017. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/geral-41440507>. Acesso em: 20 mar. 2024.

DORNELLES, K. A. Cor de telhados e fachadas pode influenciar temperatura das cidades. **Jornal da USP**. 2019. Disponível em: <https://jornal.usp.br/?p=222988>. Acesso em: 06 fev. 2024.

ECOTECH. *Equipamento Ecotech*. Disponível em: <https://www.directindustry.com/pt/prod/ecotech/product-50178-1300969.html>. Acesso em: 05 nov. 2022.

EXAME. **Município de SP pinta ruas de azul para atenuar calor**. 2019. Disponível em: <https://exame.com/brasil/municipio-de-sp-pinta-ruas-de-azul-para-atenuar-calor/>. Acesso em: 25 mar. 2024.

FARAJI, M.; NADI, S.; GHAFFARPASAND, O.; HOMAYONI, S.; DOWNEY, K. An integrated 3D CNN-GRU deep learning method for short-term prediction of PM2.5 concentration in urban environment. **Science of the Total Environment**, [s.l.], v. 834, p. 1-12, ago. 2022. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155324>. Acesso em: 10 abr. 2022.

FARRELL, W. J.; CAVELLIN, L. D.; WEICHENTHAL, S.; GOLDBERG, M.; HATZOPOULOU, M. Capturing the urban canyon effect on particle number concentrations across a large road network using spatial analysis tools. **Building and Environment**, [s.l.], v. 92, p. 328-334, out. 2015. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.05.004>.

FEPM. Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luis Roessler. Disponível em: <http://ww3.fepam.rs.gov.br/qualidade/poluentes.asp>. Acesso em: 16 nov. 2022.

FORTALEZA. Prefeitura de Fortaleza. **Desenvolvimento Humano, por Bairro de Fortaleza**. 2022. Disponível em: <https://dados.fortaleza.ce.gov.br/dataset/>. Acesso em: 11 mar. 2024.

FORTALEZA. Prefeitura de Fortaleza. **Prefeitura lança política e rede de monitoramento da qualidade do ar de Fortaleza**. 2023a. Disponível em: <https://www.fortaleza.ce.gov.br/noticias/prefeitura-lanca-politica-e-rede-de-monitoramento-da-qualidade-do-ar-de-fortaleza>. Acesso em: 02 abr. 2023.

FORTALEZA. Secretaria Municipal de Urbanismo e Meio Ambiente. **Canal urbanismo e Meio Ambiente**. 2023b. Disponível em: <https://urbanismoemeioambiente.fortaleza.ce.gov.br/urbanismo-e-meio-ambiente/1027-painel-do-monitoramento-da-qualidade-do-ar>. Acesso em: 24 out. 2022.

FRUTUOSO, F. S.; ALVES, C. M.A.C.; ARAÚJO, S. L.; SERRA, D. S.; BARROS, A. L. B.P.; CAVALCANTE, F. S. Á.; ARAÚJO, R. S.; POLICARPO, N. A.; OLIVEIRA, M. L. M. Assessing light flex-fuel vehicle emissions with ethanol/gasoline blends along an urban corridor: a case of fortaleza/brazil. **International Journal of Transportation Science and Technology**, [s.l.], v. 12, n. 2, p. 447-459, jun. 2023. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijtst.2022.04.001>.

GARCÍA-CHAN, N.; ALVAREZ-VÁZQUEZ, L. J.; MARTÍNEZ, A.; VÁZQUEZ-MÉNDEZ, M. E. **Bilevel optimal control of urban traffic-related air pollution by means of Stackelberg strategies**. Optimization and Engineering, [s.l.], v. 23, n. 2, p. 1165-1188, 6 maio 2021. Springer Science and Business Media LLC. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11081-021-09636-w>.

GOMES, C.; SILVA, M. L.; SILVA, A. C. Monitoramento da qualidade do ar e conforto ambiental urbano da avenida treze de maio em Fortaleza, Ceará. **Brazilian Journal of Development**, [s.l.], v. 5, n. 10, p. 22589-22602, 2019. Brazilian Journal of Development. DOI: <http://dx.doi.org/10.34117/bjdv5n10-373>.

GOMES, F. C. M.; ZAIDAN, R. T.; ROCHA, C. H. B. Análise comparativa entre a aplicação de métodos de interpolação, para a geração de modelos digitais de elevação. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [s.l.], v. 15, n. 5, p. 2448, 29 ago. 2022. Revista Brasileira de Geografia Física. DOI: <http://dx.doi.org/10.26848/rbgf.v15.5.p2448-2462>.

GULZAR, S.; GOENAGA, B.; UNDERWOOD, B. S. Novel Index for Vulnerability Assessment of Flexible Pavement Infrastructure to Temperature Rise: case study of developing countries. **Journal of Infrastructure Systems**, [s.l.], v. 28, n. 1, p. 1-17, mar.

2022. American Society of Civil Engineers (ASCE). DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)is.1943-555x.0000669](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)is.1943-555x.0000669).
- GUSTAFSSON, M.; BLOMQVIST, G.; GUDMUNDSSON, A.; DAHL, A.; SWIETLICKI, E.; BOHGARD, M.; LINDBOM, J.; LJUNGMAN, A. Properties and toxicological effects of particles from the interaction between tires, road pavement and winter traction material. **Science of The Total Environment**, [s.l.], v. 393, n. 2-3, p. 226-240, abr. 2008. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.12.030>.
- IEMA. **Plataforma de Qualidade do Ar**. 2022. Disponível em: <https://energiaeambiente.org.br/qualidadedoar>. Acesso em: 05 mar. 2024.
- INMETRO. **Veículos Leves 2022**. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/avaliacao-da-conformidade/programa-brasileiro-de-etiquetagem/tabelas-de-eficiencia-energetica/veiculos-automotivos-pbe-veicular/pbe-veicular-2022.pdf/view>. Acesso em: 09 out. 2022.
- IPECE. **Boletim sobre a emissão de gases do efeito estufa no estado do Ceará 2021**. 2021. Disponível em: https://www.ipece.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/45/2023/01/Boletim_Emissao_Gases_Efeito_Estufa_2021_.pdf. Acesso em: 12 abr. 2024.
- IQAir. **Air quality in Brazil**. Disponível em: <https://www.iqair.com/brazil>. Acesso em: 12 fev. 2024
- JARDIM, C. H. Relações entre temperatura, umidade relativa do ar e pressão atmosférica em área urbana. **Revista Geografias**, [s.l.], v. 7, n. 1, p. 128-142, 1 jan. 2011. Universidade Federal de Minas Gerais – Pró-Reitoria de Pesquisa. DOI: <https://doi.org/10.35699/2237-549X..13313>.
- JAWORSKI, A.; MADZIEL, M.; LEJDA, K. Creating an emission model based on portable emission measurement system for the purpose of a roundabout. **Environmental Science and Pollution Research**, [s. l], v. 26, p. 21641–21654, 25 mai. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05264-1>. Acesso em: 10 mar. 2024
- JI, C.; ZHANG, C.; HUA, L.; MA, H.; NAZIR, M. S.; PENG, T. A multi-scale evolutionary deep learning model based on CEEMDAN, improved whale optimization algorithm, regularized extreme learning machine and LSTM for AQI prediction. **Environmental Research**, [s.l.], v. 215, p. 1-6, set. 2022. Elsevier BV. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114228>. Acesso em: 15 fev. 2024.
- KIM, Y.; WU, Y.; SEIGNEUR, C.; ROUSTAN, Y. Multi-scale modeling of urban air pollution: development and application of a street-in-grid model (v1.0) by coupling munich (v1.0) and polair3d (v1.8.1). **Geoscientific Model Development**, [s.l.], v. 11, n. 2, p. 611-629, 15 fev. 2018. Copernicus GmbH. DOI: <https://doi.org/10.5194/gmd-11-611-2018>.
- KOUSIS, I.; PISELLO, A. L. Evaluating the performance of cool pavements for urban heat island mitigation under realistic conditions: a systematic review and meta-analysis. **Urban Climate**, [s.l.], v. 49, p. 1-26, maio 2023. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101470>. Acesso em: 27 abr. 2024.

LEAL, T. A. C. B.; CONSONI, F. L. **Emissões Poluentes dos Veículos: impactos dos combustíveis utilizados e potencialidades da mobilidade elétrica.** Brasília: Núcleo de Estudos e Pesquisas/CONLEG/Senado, janeiro 2021 (Texto para Discussão, nº293). Disponível em: https://www.unicamp.br/unicamp/sites/default/files/2021-03/TD293_TulioAugusto_FlaviaConsoni.pdf. Acesso em: 24 jul. 2023.

LEITE, V. P.; DEBONE, D.; MIRAGLIA, S. G. E. K. Emissões de gases de efeito estufa no estado de São Paulo: análise do setor de transportes e impactos na saúde. **Vittalle - Revista de Ciências da Saúde**, v. 32, n. 3, p. 143–153, 2020. DOI: <https://doi.org/10.14295/vittalle.v32i3.12220>.

LELIEVELD, J.; EVANS, J.; FNAIS, M.; GIANNADAKI, D.; POZZER, A. The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. **Nature**, v. 525, p. 367–371, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature15371>.

LI, G.; WU, Z.; LIU, N.; LIU, X.; WANG, Y.; ZHANG, L. A Variational Bayesian Blind Calibration Approach for Air Quality Sensor Deployments. **IEEE Sensors Journal**, [s.l.], v. 23, n. 7, p. 7129-7141, 1 abr. 2023. **Institute of Electrical and Electronics Engineers** (IEEE). DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3212009>.

LI, L.; ZHU, A.; HUANG, L.; WANG, Q.; CHEN, Y.; OOI, M. C. G.; WANG, M.; WANG, Y.; CHAN, A. Modeling the impacts of land use/land cover change on meteorology and air quality during 2000–2018 in the Yangtze River Delta region, China. **Science of the Total Environment**, [s.l.], v. 829, p. 1-16, jul. 2022. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154669>. Acesso em: 10 abr. 2023.

LIANG, L.; GONG, P. Urban and air pollution: a multi-city study of long-term effects of urban landscape patterns on air quality trends. **Scientific Reports**, v. 10, p. 1-13, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-74524-9>.

LIMA, J. R.; SALGADO, B. C. B.; CAVALCANTE, F. S. A.; OLIVEIRA, M. L. M. E.; ARAÚJO, R. S. Avaliação da poluição atmosférica na área do distrito industrial de Maracanaú (CE), Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 25, n. 3, p. 521-530, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522020175292>.

LINARES, M. P.; CASANOVAS, J.; ARMENGOL, J. M.; BENAVIDES, J.; SORET, A.; JORBA, O.; TENA, C.; GARCÍA-PANDO, C. P. To what extent the traffic restriction policies applied in Barcelona city can improve its air quality? **Science of the Total Environment**, [s.l.], v. 807, p. 1-13, fev. 2022. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150743>.

LIU, X.; JAYARATNE, R.; THAI, P.; KUHN, T.; ZING, I.; CHRISTENSEN, B.; LAMONT, R.; DUNBAIN, M.; ZHU, S.; GAO, J. Low-cost sensors as an alternative for long-term air quality monitoring. **Environmental Research**, [s.l.], v. 185, p. 1-11, jun. 2020. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envres.2020.109438>. Acesso em: 26 mar. 2024.

LIU, Y.; TAN, J. Green Traffic-Oriented Heavy-Duty Vehicle Emission Characteristics of China VI Based on Portable Emission Measurement Systems. **IEEE Access**, [s.l.], v. 8, p. 106639-106647, 2020. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/access.2020.3000665>.

LOU, C.; JIANG, F.; TIAN, X.; ZOU, Q.; ZHENG, Y.; SHEN, Y.; FENG, S.; CHEN, J.; ZHANG, L.; JIA, M. Modeling the biogenic isoprene emission and its impact on ozone pollution in Zhejiang province, China. **Science of The Total Environment**, [s.l.], v. 865, p. 1-12, mar. 2023. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161212>. Acesso em: 03 mar. 2023.

MAIA, J. L. M.; NETTO, V. M.; COSTA, B. L. G. Forma urbana e poluição atmosférica: impactos na cidade do Rio de Janeiro. **Urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana**, [s.l.], v. 11, p. 1-20, 2019. FapUNIFESP (SciELO). DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/2175-3369.011.001.e20180145>. Acesso em: 05 abr. 203.

MARQUES, E. V.; ROCHA, C. A.; SANTOS, R. P.; RAMOS, F. C. L.; LIMA, J. L. R.; CATTONY, C. M.; SILVA, M. V. C.; ZANELLA, M. E.; CAVALCANTE, R. M. Influência da arborização e da edificação na dispersão de material particulado respirável em cidade costeira altamente urbanizada (Fortaleza, CE-Brasil). **Revista Brasileira de Geografia Física**, [s.l.], v. 12, n. 3, p. 913-928, 11 out. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.26848/rbgf.v12.3.p913-928>.

MARTINS, T. A. L.; BONHOMME, M.; ADOLPHE, L. Análise do impacto da morfologia urbana na demanda estimada de energia das edificações: um estudo de caso na cidade de Maceió, AL. **Ambiente Construído**, [s.l.], v. 13, n. 4, p. 213-233, dez. 2013. FapUNIFESP (SciELO). DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212013000400015>.

MIRANDA, L. F. F. **Tecnologias para cidades inteligentes: estudo para coleta de dados sobre qualidade do ar utilizando sensores ambientais de baixo custo**. 2015. 108 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Gestão Ambiental, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Recife, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ifpe.edu.br/xmlui/handle/123456789/52>. Acesso em: 12 nov. 2023.

MORENO, T.; RECHE, C.; RIVAS, I.; MINGUILLÓN, M. C.; MARTINS, V.; VARGAS, C.; BUONANNO, G.; PARGA, J.; PANDOLFI, M.; BRINES, M. Urban air quality comparison for bus, tram, subway and pedestrian commutes in Barcelona. **Environmental Research**, [s.l.], v. 142, p. 495-510, out. 2015. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envres.2015.07.022>.

MOUSSA, R. R. Reducing carbon emissions in Egyptian roads through improving the streets quality. **Environment, Development and Sustainability**, [s.l.], v. 25, n. 5, p. 4765-4786, 28 fev. 2022. Springer Science and Business Media LLC. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10668-022-02150-8>.

MUELLER, N.; ROJAS-RUEDA, D.; KHREIS, H.; CIRACH, M.; ANDRÉS, D.; BALLESTER, J.; BARTOLI, X.; DAHER, C.; DELUCA, A.; ECHAVE, C. Changing the urban design of cities for health: The superblock model. **Environment International**, [s.l.], v.134, p.1-13, jan.2020. Elsevier BV. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105132>. Acesso em: 13 out. 2022.

NAKATA-OSAKI, C. M.; SOUZA, L. C. L.; RODRIGUES, D. S. Impacto da geometria do cânion urbano na intensidade de ilha de calor noturna: análise através de um modelo simplificado adaptado a um SIG. **Ambiente Construído**, [s.l.], v. 16, n. 3, p. 73-87, set. 2016. FapUNIFESP (SciELO). DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212016000300093>.

NEVES, C. J. T.; SILVA, M. L.; LIMA, J. R.; SILVA, A. C.; COSTA, A. G.; ARAÚJO, R. S. Avaliação da poluição atmosférica em uma área urbana na cidade de Fortaleza, Ceará, Brasil. **Revista Aidis de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, Desarrollo y Práctica**, [s.l.], p. 888-905, 6 dez. 2023. Universidad Nacional Autonoma de Mexico. DOI: <http://dx.doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2023.16.3.83568>.

NEVES, C. J. T.; SILVA, M. L.; MARQUES, S. G. F.; SÁ, G. G.; SILVA, A. C. Avaliação de indicadores ambientais urbanos em um espaço público da cidade de Fortaleza-CE. **Revista Tecnologia**, [s.l.], v. 40, n. 2, p. 1-17, 12 set. 2019. Fundacao Edson Queiroz. DOI: <http://dx.doi.org/10.5020/23180730.2019.9485>.

OKE, T. R. Canyon Geometry and the Nocturnal Urban Heat Island: comparison of scale model and field observations. **Journal of Climatology**, 1981. v.1, n.1/4, p.237-254, 1981. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/joc.3370010304>.

OLIVEIRA, C. J. S.; SANTOS, P.; NUNES, T.; PIO, C.; CASEIRO, A.; WÄHLIN, P. Contribuição das emissões rodoviárias na qualidade do ar da cidade do Porto. In: Conferência, 2004, Porto. Anais... Porto: [s.n.], 2004. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/317004942>. Acesso em: 20 ago. 2023.

OLIVEIRA, M. L. M.; LOPES, M. H. P. S.; POLICARPO, N. A.; ALVES, C. M. A. C.; ARAÚJO, R. S.; CAVALCANTE, F. S. A. Avaliação de poluentes do ar em áreas de recreação urbana da cidade de Fortaleza. Urbe. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, [s.l.], v. 11, p. 1-15, 12 set. 2019. FapUNIFESP (SciELO). DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/2175-3369.011.e20180187>.

OLIVEIRA, V. C.; BERTONCINI, B. V.; CASTELO BRANCO, V. T. F. Avaliação da relação entre a emissão de poluentes veiculares e superfícies rodoviárias. In: ANAIS DO 36º CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 2022, Fortaleza. **Anais eletrônicos...** Campinas, Galoá, 2022. Disponível em: <https://proceedings.anpet-2022/trabalhos/avaliacao-da-relacao-entre-emissao-de-poluentes-veiculares-e-superficies-rodovia?lang=pt-br>. Acesso em: 20 nov. 2023.

OLIVEIRA-FONOFF, A. M. DE; MADY, C.; PESSOA, F. G.; FONSECA, K. C. B.; SALEMI, V. M. C.; FERNANDES, F.; SALDIVA, P. H. N.; RAMIRES, F. J. A. The role of air pollution in myocardial remodeling. **PloS One**, [s.l.], v. 12, n. 4, p. 1-14, 20 abr. 2017. **Public Library of Science** (PLoS). DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176084>. Acesso em: 15 out. 2023.

OMS. **Barcelona: Using urban design to improve urban health.** World Health Organization, 2021b. Disponível em: <https://www.who.int/news-room/feature-stories/detail/barcelona-using-urban-design-to-improve-urban-health>. Acesso em: 05 jan. 2024.

OMS. **Novos dados da OMS revelam que bilhões de pessoas ainda respiram ar insalubre.** World Health Organization. 2022. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/176864-novos-dados-da-oms-revelam-que-bilh%C3%B5es-de-pessoas-ainda-respiram-ar-insalubre>. Acesso em: 05 jan. 2024.

OMS. **WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide.** World Health Organization, 2021a. Disponível em: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>. Acesso em: 13 fev. 2024.

ONU. **Objetivos de desenvolvimento Sustentável.** 2023. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 06 jun. 2023.

PEREIRA, A. L. S.; FREDERICO, C. S. Os ônibus de Londres: estudo de um caso notável. **Revista dos Transportes Públicos**, v. 151, p. 51-97, abr. 2019. Disponível em: <http://files.antp.org.br/2019/4/10/rtp151-e.pdf#page=27>. Acesso em: 12 jul. 2023.

PERILLO, H. A.; BRODERICK, B. M.; GILL, L. W.; MCNABOLA, A.; KUMAR, P.; GALLAGHER, J. Spatiotemporal representativeness of air pollution monitoring in Dublin, Ireland. **Science of the Total Environment**, [s.l.], v. 827, p. 1-11, jun. 2022. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154299>.

POLICARPO, N. A.; SILVA, C.; LOPES, T. F. A.; ARAÚJO, R. S.; CAVALCANTE, F. S. Á.; PITOMBO, C. S.; OLIVEIRA, M. L. M. Road vehicle emission inventory of a Brazilian metropolitan area and insights for other emerging economies. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, [s.l.], v. 58, p. 172-185, jan. 2018. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2017.12.004>.

PONETTE-GONZÁLEZ, A. G.; CHEN, D.; ELDERBROCK, E.; RINDY, J. E.; BARRETT, T. E.; LUCE, B. W.; LEE, J.; KO, Y.; WEATHERS, K. C. Urban edge trees: urban form and meteorology drive elemental carbon deposition to canopies and soils. **Environmental Pollution**, [s.l.], v. 314, p. 1-9, dez. 2022. Elsevier BV. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120197>.

POTENZA, R. F.; QUINTANA, G. O.; CARDOSO, A. M.; TSAI, D. S.; CREMER, M. S.; SILVA, F. B.; CARVALHO, K.; COLUNA, I.; SHIMBO, J.; SILVA, C.; SOUZA, E.; ZIMBRES, B.; ALENCAR, A.; ANGELO, C.; AZEVEDO, T. **Análise das emissões brasileiras de gases do efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil 1970 – 2020.** SEEG, 2021. Disponível em: <https://energiaeambiente.org.br/produto/analise-das-emissoes-brasileiras-de-gases-de-efeito-estufa-e-suas-implicacoes-para-as-metas-climaticas-do-brasil-1970-2020>. Acesso em: 16 abr. 2023.

PRZEYBILOVICZ, E.; CUNHA, M. A.; MACAYA, J. F. M.; ALBUQUERQUE, J. P. D. A Tale of two "Smart Cities": Investigating the echoes of new public management and governance discourses in Smart City Projects in Brazil. **51ST Hawaii International Conference on System Sciences**. 2018. <http://hdl.handle.net/10125/50202>.

PURWANTO, P.; ASTUTI, I. S.; ROHMAN, F.; UTOMO, K. S. B.; ALDIANTO, Y. E. Assessment of the dynamics of urban surface temperatures and air pollution related to COVID-19 in a densely populated City environment in East Java. **Ecological Informatics**, [s.l.], v. 71, p. 1-17, nov. 2022. Elsevier BV. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101809>. Acesso em: 28 mar. 2023.

RÉQUIA, W. J.; ROIG, H. L. Avaliação espacial entre poluição do ar e saúde em áreas com limitação de dados. **Boletim de Ciências Geodésicas**, [s.l.], v. 22, n. 4, p. 807-821, dez. 2016. FapUNIFESP (SciELO). DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1982-21702016000400046>.

RIBEIRO, J. P.; CASSIANO, D. R.; BERTONCINI, B. V.; BRANCO, V. T. F. C.; SOUSA, F. F. L. M.; QUINTANILHA, W. F. L.; CAVALCANTE, R. M.; SANTIAGO, I. S.; FERNANDES, G. M. Compreensão da formação de NO₂ proveniente das operações de transporte urbano e suas relações com agentes causais. **Transportes**, [s.l.], v. 27, n. 2, p. 209-223, 31 ago. 2019. Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo. DOI: <http://dx.doi.org/10.14295/transportes.v27i2.1728>.

ROCHA, C. A. Índice de qualidade ambiental de áreas utilizadas para prática de atividades físicas e lazer na cidade de Fortaleza, CE. 2017. 185 f. Dissertação (Mestrado) - Pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/23894>. Acesso em: 19 jan. 2023.

ROCHA, C. A.; MARQUES, E. V.; SANTOS, R. P.; SANTIAGO, I. S.; CAVALCANTE, C. L. A.; CASSIANO, D. R.; RIBEIRO, J. P.; BERTONCINI, B. V.; NOBRE, J. S.; FREITAS, J. V. B. A better understanding of air quality resulting from the effects of the 2020 pandemic in a city in the equatorial region (Fortaleza, Brazil). **Environmental Science and Pollution Research**, [s.l.], v. 29, n. 14, p. 20921-20938, 8 nov. 2021. Springer Science and Business Media LLC. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-021-16697-y>.

RODRIGUEZ-REY, D.; GUEVARA, M.; LINARES, M. P.; CASANOVAS, J.; ARMENGOL, J. M.; BENAVIDES, J.; SORET, A.; JORBA, O.; TENA, C.; GARCÍA-PANDO, C. P. To what extent the traffic restriction policies applied in Barcelona city can improve its air quality? **Science of the Total Environment**, [s.l.], v. 807, p. 150743, fev. 2022. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150743>.

SAKTI, A. D.; ANGGRAINI, T. S.; IHSAN, K. Y.; MISRA, P.; TRANG, N. T. Q.; PRADHAN, B.; WENTEN, I. G.; HADI, P. O.; WIKANTIKA, K. Multi-air pollution risk assessment in Southeast Asia region using integrated remote sensing and socio-economic data products. **Science of the Total Environment**, [s.l.], v. 854, p. 1-18, jan. 2023. Elsevier BV. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158825>. Acesso em: 25 set. 2023.

SANT'ANNA, A.; ALENCAR, A.; PINHEIRO, B.; ARAÚJO, C.; VORMITTAG, E.; WICHER, H.; BORGES, K.; FARIA, M.; ANDRADE, M. F.; PORTO P.; ARTAXO, P.; ROCHA, R.; ESTURBA, T.; DE SIMONI, W. "O Estado da Qualidade do Ar no Brasil". **Working Paper**. 2021. São Paulo, Brasil: WRI Brasil. Disponível em: https://www.wribrasil.org.br/sites/default/files/wri-o-estado-da-_qualidade-do-ar-no-brasil.pdf

SANTOS, A. S.; FACCINI, L. G.; MARTE, C. L.; CINTRA, J. P. Emprego de componentes móveis de IoT para análises espaço temporais de alta resolução para avaliar a qualidade do ar em cidades médias brasileiras. In: **Workshop de Computação Urbana (COURB)**, 2., 2018, Campos do Jordão. Anais [...]. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2018. ISSN 2595-2706. Disponível em: <https://sol.sbc.org.br/index.php/courb/article/view/2342>.

SANTOS, R. P. Influência dos cânions urbanos, tráfego veicular e variáveis meteorológicas na concentração de NO₂ em área com intenso processo de verticalização (Fortaleza – CE). 2018. 80 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Instituto de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/40987>.

SATYANARAYANAN, M. Mobile Computing. **ACM Sigmobile Mobile Computing and Communications Review**, [s.l.], v. 15, n. 2, p. 2-10, ago. 2011. Association for Computing Machinery (ACM). DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/2016598.2016600>.

SEATON, M.; O'NEILL, J.; BIEN, B.; HOOD, C.; JACKSON, M.; JACKSON, R.; JOHNSON, K.; OADES, M.; STIDWORTHY, A.; STOCKER, J. A Multi-Model Air Quality System for Health Research: road model development and evaluation. **Environmental Modelling & Software**, [s.l.], v. 155, p. 1-19, set. 2022. Elsevier BV. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105455>. Acesso em: 04 mar. 2023.

SEMACE. **Índice de Qualidade do Ar**. 2020. Disponível em: <https://www.troposfera.es/br/referencias-2/siam-estado-de-ceara/indice-de-qualidade-do-ar.html>. Acesso em: 15 jan. 2024.

SILVA, L. T.; MENDES, J. F. G. Determinação do índice de qualidade do ar numa cidade de média dimensão. In: Anais do 2º Congresso Luso-Brasileiro de Planeamento Urbano Regional Integrado Sustentável, 2006, Braga. [CD-ROM]. [s.l. : s.n., 2006]. ISBN 85-85205-67-9. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1822/7177>. Acesso em: 17 jul. 2023.

SISAM. **Poluentes e Saúde**. Disponível em: <https://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/sisam/v2/poluentes-saude/>. Acesso em: 03 jan. 2023.

SUNBELT RENTALS. *Casella Measurement CEL-712 Microdust Pro*. Disponível em: <https://www.inlec.com/casella-measurement-cel-712-microdust-pro>. Acesso em: 05 nov. 2022.

TELLA, A.; BALOGUN, A. GIS-based air quality modelling: spatial prediction of pm10 for Selangor state, Malaysia using machine learning algorithms. **Environmental Science and Pollution Research**, [s.l.], v. 29, n. 57, p. 86109-86125, 17 set. 2021. Springer Science and Business Media LLC. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16150-0>.

THORPE, A.; HARRISON, R. M. Sources and properties of non-exhaust particulate matter from road traffic: a review. **Science of the Total Environment**, [s.l.], v. 400, n. 1-3, p. 270-282, ago. 2008. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.06.007>.

TONG, Z.; CHEN, Y.; MALKAWI, A.; LIU, Z.; FREEMAN, R. B. Energy saving potential of natural ventilation in China: the impact of ambient air pollution. **Applied Energy**, [s.l.], v. 179, p. 660-668, out. 2016. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.019>.

UNDERWOOD, B. S.; GUIDO, Z.; GUDIPUDI, P.; FEINBERG, Y. Increased costs to US pavement infrastructure from future temperature rise. **Nature Climate Change**, [s.l.], v. 7, n. 10, p. 704-707, 18 set. 2017. Springer Science and Business Media LLC. DOI: <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate3390>.

VARDOULAKIS, S.; FISHER, B. E.A; PERICLEOUS, K.; GONZALEZ-FLESCA, N. Modelling air quality in street canyons: a review. **Atmospheric Environment**, [s.l.], v. 37, n. 2, p. 155-182, jan. 2003. Elsevier BV. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/s1352-2310\(02\)00857-9](http://dx.doi.org/10.1016/s1352-2310(02)00857-9).

VIEIRA, E. V. R.; ROSARIO, N. E.; YAMASOE, M. A.; MORAIS, F. G.; MARTINEZ, P. J. P.; LANDULFO, E.; MIRANDA, R. M. Chemical Characterization and Optical Properties of the Aerosol in São Paulo, Brazil. **Atmosphere**, [s.l.], v. 14, n. 9, p. 1-21, 20 set. 2023. MDPI AG DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/atmos14091460>.

VORMITTAG, E. M. P. A. A.; CIRQUEIRA, S. S. R.; WICHER NETO, H.; SALDIVA, P. H. N. Análise do monitoramento da qualidade do ar no Brasil. **Estudos Avançados**, [s.l.], v. 35, n. 102, p. 7-30, ago. 2021. FapUNIFESP (SciELO). DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-4014.2021.35102.002>.

WANG, G., BOSCH, F. V. D., KUFFER, M. Modelling Urban Traffic Air Pollution Dispersion. The International Archives of the Photogrammetry, **Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Beijing, v. 36, n. 8, p. 153-158, 2008. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/228674133_Modelling_Urban_Traffic_Air_Pollution_Dispersion.

WAQI. World Air Quality Index. Disponível em: <https://aqicn.org/map/world/>. Acesso em: 16 fev. 2023.

WEI, J.; LIU, S.; LI, Z.; LIU, C.; QIN, K.; LIU, X.; PINKER, R. T.; DICKERSON, R. R.; LIN, J.; BOERSMA, K. F. Ground-Level NO₂ Surveillance from Space Across China for High Resolution Using Interpretable Spatiotemporally Weighted Artificial Intelligence. **Environmental Science & Technology**, [s.l.], v. 56, n. 14, p. 9988-9998, 29 jun. 2022. American Chemical Society (ACS). DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c03834>.

XIE, M.; LU, X.; DING, F.; CUI, W.; ZHANG, Y.; FENG, W. Evaluating the influence of constant source profile presumption on PMF analysis of PM2.5 by comparing long- and short-term hourly observation-based modeling. **Environmental Pollution**, [s.l.], v. 314, p. 1-15, dez. 2022. Elsevier BV. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120273>. Acesso em: 12 jun. 2022.

YANG, L.; ZHANGA, L.; STETTLERB, M. E. J.; SUKITPANEENITB, M.; XIAOC, D.; DAM, K. H. Supporting an integrated transportation infrastructure and public space design: a coupled simulation method for evaluating traffic pollution and microclimate. **Sustainable Cities and Society**, [s.l.], v. 52, p. 1-20, jan. 2020. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2019.101796>. Acesso em: 13 abr. 2023.

YIN, C.; XIONG, Z.; CHEN, H.; WANG, J.; COOPER, D.; DAVID, B. A literature survey on smart cities. **Science China Information Sciences**, [s.l.], v. 58, n. 10, p. 1-18, 26 ago. 2015. Springer Science and Business Media LLC. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11432-015-5397-4>.

ZHANG, B.; LU, Y.; QIN, D.; ZOU, G. A Multi-Site Joint Air Pollution Prediction Model Based on Convolutional Auto-Encoder Deep Learning[J]. **Acta Electronica Sinica**, 2022, v. 50, n.6, p.1410-1427. DOI: <https://doi.org/10.12263/DZXB.20200258>.

ZHANG, S.; ZHANG, Z.; LI, Y.; DU, X.; QU, L.; TANG, W.; XU, J.; MENG, F. Formation processes and source contributions of ground-level ozone in urban and suburban Beijing using

the WRF-CMAQ modelling system. **Journal of Environmental Sciences**, [s.l.], v. 127, p. 753-766, maio 2023. Elsevier BV. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.06.016>

ZHENG, T.; JIA, Y.; ZHANG, S.; LI, X.; WU, Y.; WU, C.; HE, H.; PENG, Z. Impacts of vegetation on particle concentrations in roadside environments. **Environmental Pollution**, [s.l.], v. 282, p. 1-10, ago. 2021. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117067>. Acesso em: 02 nov. 2023.

APÊNDICE A – DETALHAMENTO DOS PONTOS DE COLETA

Tabela A-1 – Detalhamento dos pontos de coleta com endereço, coordenadas e descrição.

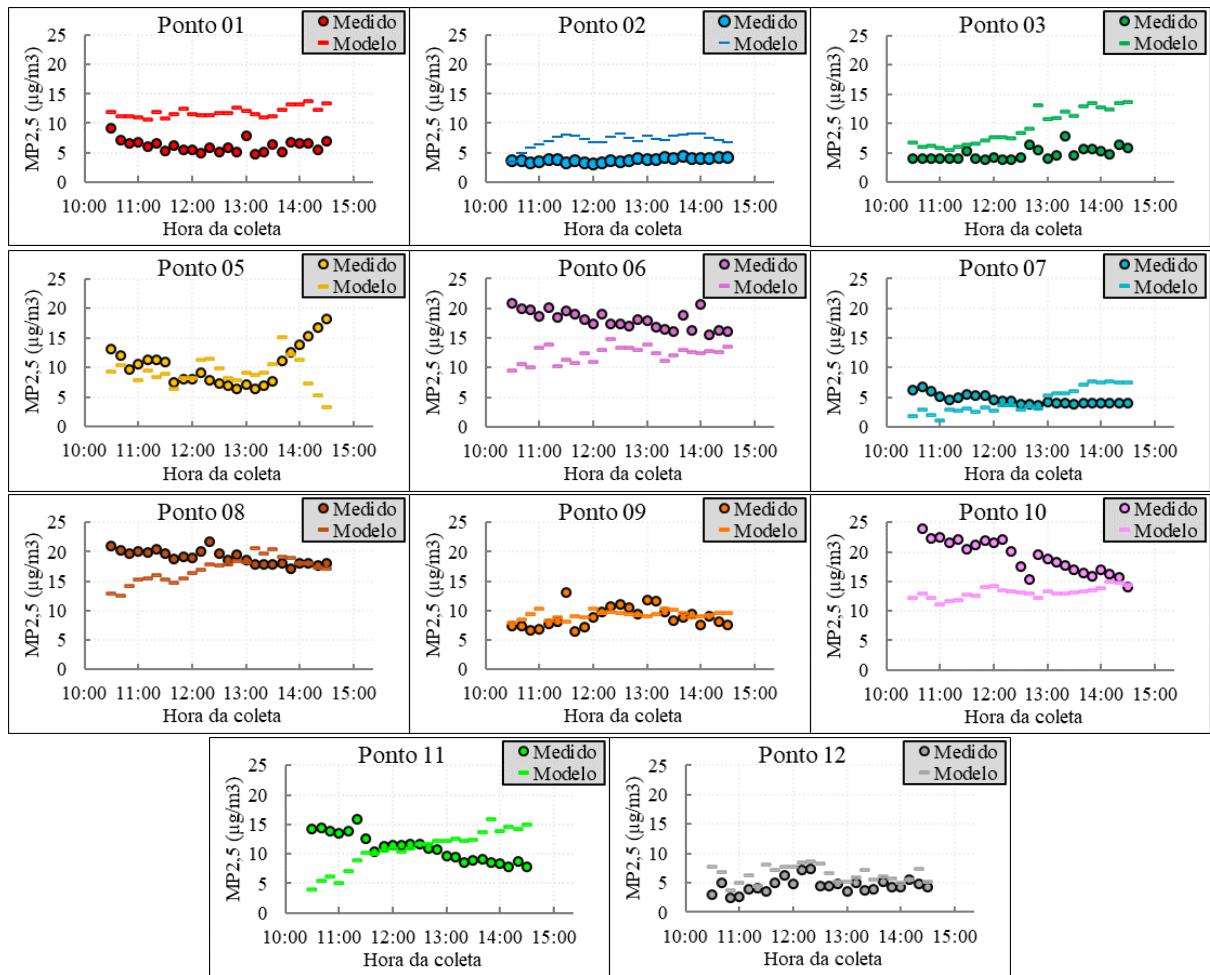
Localização	Coordenadas		Descrição
	Latitude	Longitude	
Ponto 1 - LABOMAR Avenida da Abolição com Rua Júlio Ibiapina (estacionamento)	-3.726521	-38.491097	Ambiente arborizado com pequenas barreiras de ventilação e alto tráfego de veículos, contabilizado apenas da Avenida da Abolição.
Ponto 2 Rua Silva Jatahy com Rua Visconde de Mauá (edifício residencial)	-3.728146	-38.496643	Ambiente com barreiras de ventilação caracterizadas pelos prédios em frente do edifício. A região apresenta baixo tráfego de veículos, contabilizado apenas da rua Silva Jatahy.
Ponto 3 Rua República do Líbano com Rua Barbosa de Freitas (calçada)	-3.731589	-38.495712	Ambiente bem arborizado e sombreado, com alto tráfego de veículos contabilizando o fluxo das duas vias.
Ponto 4 Avenida Senador Virgílio Távora com Rua Ana Bilhar (calçada)	-3.730940	-38.491363	Local com ventilação reduzida, apesar de não apresentar barreiras físicas. Poucas árvores, ampla área asfaltada e tráfego intenso contabilizado nas duas vias, podendo contribuir para a alta sensação térmica.
Ponto 5 Avenida da Abolição com Rua Nunes Valente (edifício residencial)	-3.725535	-38.500662	Ambiente apresenta pouca arborização, ventos fortes e elevado tráfego, contabilizado na Avenida da Abolição. A grande largura da via pode auxiliar na ventilação.
Ponto 6 Avenida Monsenhor Tabosa com Rua Antônio Lima (calçada)	-3.724464	-38.504064	Local com tráfego intenso coletado das duas vias, apresenta pouca arborização, mas boa ventilação, beneficiada pela maior largura da via.
Ponto 7 Rua Deputado Moreira da Rocha com Rua Antônio Lima (edifício residencial)	-3.726983	-38.505211	Ambiente bem arborizado e ventilado, apresentando baixo tráfego, contabilizado apenas da rua Deputado Moreira da Rocha.
Ponto 8 Rua Deputado Moreira da Rocha com Rua Nunes Valente (edifício comercial)	-3.728099	-38.501055	Local com pouca ventilação, pouca arborização e tráfego intenso contabilizado das duas vias da intercessão. Apresenta altas edificações no entorno, podendo funcionar como barreiras de ventilação.
Ponto 9 Avenida Dom Luís com Rua Professor Dias da Rocha (calçada)	-3.735064	-38.491492	Local com ventilação considerável e boa arborização, próximo a ambientes comerciais e de lazer. Apresenta tráfego intenso, contabilizado das duas vias.
Ponto 10 Avenida Desembargador Moreira com Rua Maria Tomásia (calçada)	-3.734939	-38.497861	Ambiente com boa arborização e ventilação, contendo centros comerciais, de lazer e de alimentação, com alta circulação de pessoas e de veículos. Único ponto com pavimento do tipo intertravado.
Ponto 11 Rua Pereira Valente com Rua Joaquim Nabuco (calçada)	-3.731264	-38.499918	Ambiente com tráfego moderado, contabilizado das duas vias. Local não apresenta grande circulação de pessoas, com pouca ventilação e arborização, podendo ser motivado por altas edificações no entorno.
Ponto 12 Avenida Barão de Studart com Rua Costa Barros (calçada)	-3.732226	-38.506059	Ambiente com alto tráfego contabilizado pelas duas vias, grande circulação de pessoas, boa ventilação e boa arborização por conter árvores de grande porte. Proximidade com pontos comerciais e restaurantes.

APÊNDICE B – RESULTADOS DO MODELO 6 PARA MP2,5

Figura B-1 – Comportamento real e ajustado pelo modelo do MP2,5 no decorrer do dia

Equação Modelo 6 ($R^2 = 0,63$)

$$MP2,5 = (-108,271) + (2,199 * \text{Temperatura}) + (0,433 * \text{Umidade}) + (0,029 * \text{Tráfego}) + (-2,724 * \text{Altura das edificações}) + (298,141 * \text{Câñions}) + (0,405 * \text{Vegetação 100m}) + (-0,133 * \text{Vegetação 200m}) + (0,035 * \text{Vegetação 500m})$$

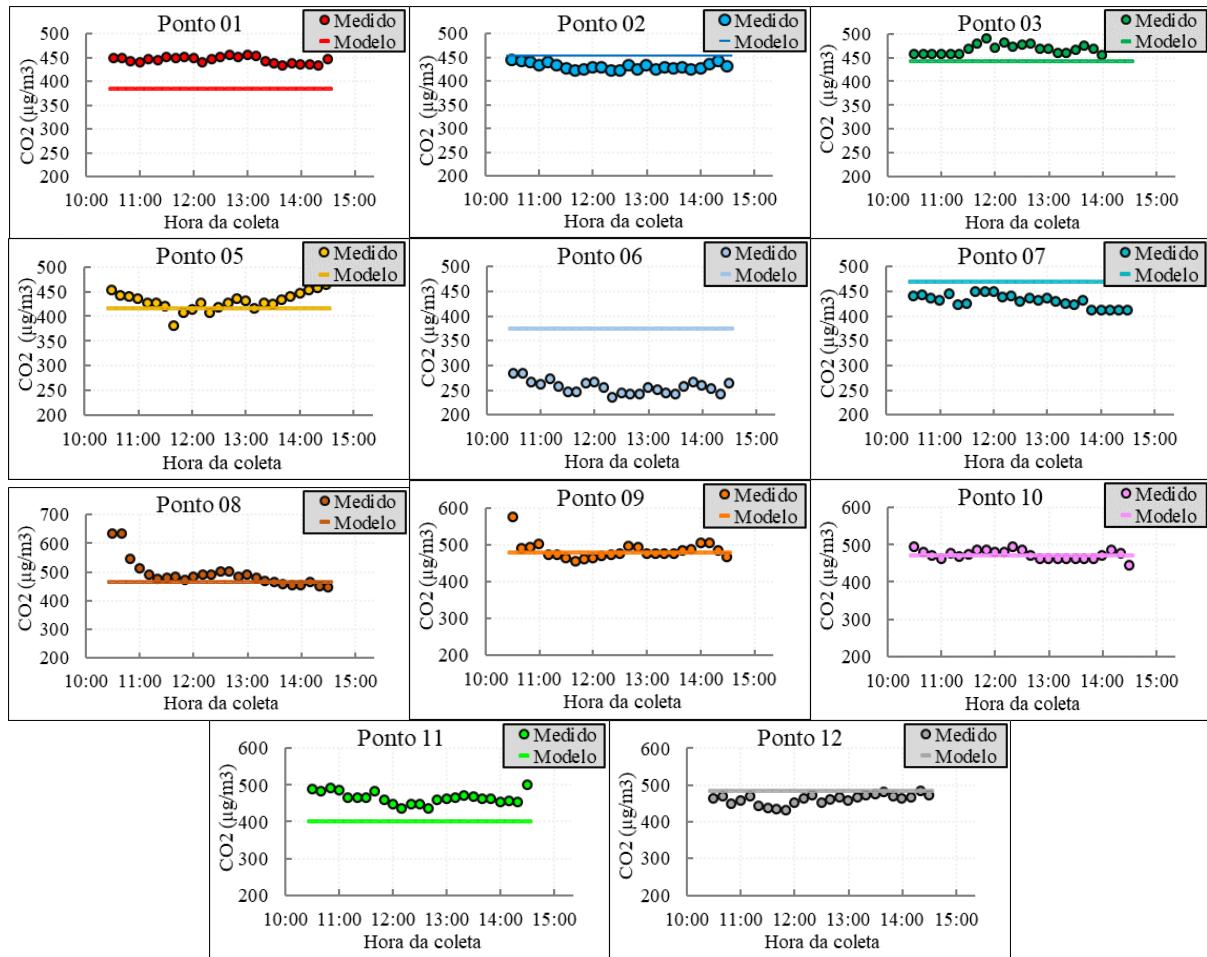


APÊNDICE C – RESULTADOS DO MODELO 2 PARA CO₂

Figura C-1 – Comportamento real e ajustado pelo modelo do CO₂ no decorrer do dia

Equação Modelo 2 (R² = 0,58)

$$CO_2 = (449,323) + (9,329 * Altura\ das\ edificações) + (-1293,536 * Cânions)$$



APÊNDICE D – PROPOSTAS PARA GESTORES PÚBLICOS

Informações sobre qualidade do ar para a tomada de decisão de gestores públicos

Este trabalho mostrou que há uma escassez na coleta de dados de poluição atmosférica no Brasil, e que é possível produzir equipamentos de baixo custo para coletar esses dados. Essa informação é crucial para tomada de decisão dos gestores públicos sobre a temática da poluição atmosférica. Essa afirmação fica mais evidente analisando-se o conteúdo presente na plataforma IQAir (2023), que menciona os monitores de baixo custo como ferramentas valiosas para reduzir as desigualdades no monitoramento da qualidade do ar ao redor do mundo. A Figura D-1 exemplifica a desigualdade do monitoramento da qualidade do ar, bem como a escassez de coleta em algumas regiões.

Figura D-1 – Mapas mundiais de monitoramento da qualidade do ar



Fonte: IQAir (2023).

O uso desses equipamentos de baixo custo pode embasar políticas públicas sobre qualidade do ar, bem como disseminar o conhecimento sobre seus efeitos no ambiente e na saúde pública. Este trabalho analisou uma área reduzida de Fortaleza, em um esforço de compreensão dos efeitos do transporte e da infraestrutura urbana na poluição atmosférica. A conscientização da importância desse tema pelos gestores públicos pode viabilizar estudos em uma área mais abrangente de Fortaleza, que facilitarão o entendimento do problema. Como efeitos positivos secundários, os cidadãos terão maiores informações sobre as regiões de Fortaleza com melhor qualidade do ar e poderão decidir quais rotas seguirão.

Com foco na cidade de Fortaleza/CE, área de estudo dessa pesquisa, este trabalho fornece esclarecimentos para (i) complementaridade dos dados de poluição, tendo em vista que pode auxiliar coletas realizadas atualmente pela prefeitura, inclusive abrangendo uma maior

diversidade de regiões da cidade; (ii) inovação e acessibilidade, assumindo que uma solução de baixo custo se torna eficaz para uso em regiões com menos recursos; (iii) transparência e engajamento comunitário, com a elaboração de mapas/gráficos/imagens de fácil compreensão para cidadãos, com o objetivo de educar e conscientizar sobre ações para melhoria da qualidade do ar; e (iv) flexibilidade e adaptação, com a possibilidade de realocação do equipamento de coleta de dados em diferentes regiões da cidade. Um exemplo da participação ativa dos cidadãos pode se dar por meio da escolha de rotas baseadas em uma plataforma que indique pontos com boa e má qualidade do ar em diferentes regiões elaborada pelos gestores públicos, conforme exemplificado na Figura D-2.

Figura D-2 – Exemplos de sistemas de apoio a decisão



(a) Mapa de calor de poluição
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

(b) Esquema de áreas mais afetadas

Neste sentido, este trabalho abrange o desenvolvimento de uma plataforma *online* para visualização dos dados coletados no ambiente urbano, apresentando mapas de calor de poluição, interpolação dos dados e o índice de qualidade do ar por ponto, de acordo com os padrões da EPA (2018). A plataforma, representada na Figura D-3, é um exemplo de visualização e divulgação dos dados de forma clara e de fácil entendimento, podendo ser explorada em trabalhos futuro para apresentação de informações em tempo real.

Figura D-3 – Apresentação dos dados por meio de um dashboard



Aos agentes públicos como tomadores de decisão cabe fomentar e coordenar ações como:

- Envolver órgãos públicos, iniciativas privadas e academia em projetos sobre qualidade do ar e seus efeitos na saúde dos cidadãos;
- Aplicação de políticas voltadas para a implementação de sistemas inteligentes de coleta e visualização de dados de poluição, estabelecendo metas para redução das emissões industriais e do tráfego;
- Lançamento de programas com incentivo para obtenção de meios de transporte menos poluentes, como bicicletas, transportes públicos e carros elétricos, paralelamente ao replanejamento da infraestrutura de transportes e mobilidade urbana;
- Estabelecer metas claras de limites de concentração de poluentes e incentivo à preservação de áreas verdes na cidade.