

**UNIVERSIDADE NOVE DE JULHO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
CIDADES INTELIGENTES E SUSTENTÁVEIS**

ULISSES LÍRIO DO NASCIMENTO

**POTENCIAL DE REMOÇÃO DOS POLUENTES ATMOSFÉRICOS POR
ARBUSTOS URBANOS: UM ESTUDO DE MICROESCALA NA CIDADE DE
SÃO PAULO**

São Paulo

2021

Ulisses Lírio do Nascimento

**POTENCIAL DE REMOÇÃO DOS POLUENTES ATMOSFÉRICOS POR
ARBUSTOS URBANOS: UM ESTUDO DE MICROESCALA NA CIDADE DE
SÃO PAULO.**

**ATMOSPHERIC POLLUTANTS REMOVAL POTENTIAL BY URBAN
BUSHES: A MICROSCALE STUDY IN THE CITY OF SÃO PAULO.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Cidades Inteligentes e Sustentáveis da Universidade Nove de Julho – UNINOVE, como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Cidades Inteligentes e Sustentáveis**

ORIENTADOR: PROF^a DR^a ANDREZA
PORTELLA RIBEIRO

São Paulo

2021

Nascimento, Ulisses Lírio do.

Potencial de remoção dos poluentes atmosféricos por arbustos urbanos: um estudo de microescala na cidade de São Paulo. / Ulisses Lírio do Nascimento. 2021.

100 f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Nove de Julho - UNINOVE, São Paulo, 2021.

Orientador (a): Prof^a. Dr^a. Andreza Portella Ribeiro.

1. Poluentes atmosféricos. 2. Carbono. 3. Material particulado. 4. Arbustos.

I. Ribeiro, Andreza Portella. II. Título.

CDU 711.4

**POTENCIAL DE REMOÇÃO DOS POLUENTES ATMOSFÉRICOS POR
ARBUSTOS URBANOS: UM ESTUDO DE MICROESCALA NA CIDADE DE
SÃO PAULO**

Por

Ulisses Lírio do Nascimento

Qualificação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Cidades Inteligentes e Sustentáveis da Universidade Nove de Julho – UNINOVE, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Cidades Inteligentes e Sustentáveis, sendo a banca examinadora formada por:

Prof.^a Dr.^a Carolina Yume Sawamura Theophilo – Instituto de pesquisas Energéticas Nucleares – Universidade de São Paulo (IPEN-USP)

Prof.^a Dr.^a. Andreza Portella Ribeiro – Universidade Nove de Julho – UNINOVE

Prof.^o Dr. ^o Edson Gonçalves Moreira – Instituto de pesquisas Energéticas Nucleares – Universidade de São Paulo (IPEN-USP)

São Paulo, 01 de dezembro de 2021.

“...ao meu país Brasil, ó terra varonil! de matas virginais, e rios sem rivais e lindos litorais tu tens sem par!...” (CANTOR CRISTÃO 574)

AGRADECIMENTOS

A Deus acima de tudo, sem Ele não teria conseguido vencer tantas dificuldades físicas e na alma. Como uma bússola me mostrou o caminho paulatino para superar barreiras, e como um aferidor de medida me orientou com crivo as escolhas.

A minha esposa e família, mãe e pai que sofreram comigo partes dessa jornada e sofreram com minha ausência, mas nunca me deixaram desistir.

Aos conselheiros pessoais que tiveram trabalho dobrado e paciência Prof^o Mauricio Abreu de Carvalho, e o Dr^o Antônio José de Souza Pinto

Agradeço a Universidade Nove de Julho (UNINOVE) que acreditou e investiu em mim e na minha pesquisa, dando oportunidade de fazer um curso stricto sensu gratuitamente, conhecer e vivenciar experiências acadêmicas intangíveis subindo no ombro de gigantes.

Agradeço a cada professor do curso Cidades Inteligentes e Sustentáveis do Brasil e do módulo em Israel sendo o Dr^o Wilson Levy Braga da Silva Neto, Dr^o João Alexandre Paschoalin Filho e o Dr^o Gustavo S. Mesch os que estiveram mais próximos da nossa turma no exterior, e em especial a Dr^a Andreza Portella Ribeiro, pela paciência, apoio, orientações e superação as vicissitudes.

Agradeço a equipe do Metrô-SP Dorival Guimarães de Oliveira, Aclauri D'Angelo, Ricardo Savacini Pandolfi e de empresa Praça Unitha, Ediléia Ferro e Helder Oliveira, que se interessaram por esta pesquisa viabilizando autorizações e acessos a locais restritos.

Agradeço a todos que me ajudaram direta e indiretamente e sabem que o fizeram, mesmo não estando seus nomes aqui, o meu muito obrigado!

“...E apliquei meu coração a esquadrihar e estudar com ciência tudo o quanto sucede na terra e esta difícil ocupação deu Deus aos homens para nos exercitar... (ECLESIASTES 1:13). E descobri que não há nada melhor para o homem do ser feliz e praticar o bem enquanto vive...” (ECLESIASTES 3:12)

RESUMO

Como resultado das ações antropogênicas descontroladas, os meios urbanos vivem problemas relacionados à poluição ar, sobretudo oriundos de emissões veiculares. São problemas que assumem diferentes escalas e cenários dentro de uma mesma cidade, o que afeta a saúde e o meio ambiente local de formas diferentes. O entendimento sobre a existência de poluentes em microambientes urbanos, combinado com técnicas passivas de mitigação, possibilita uma resiliência urbana em microescala. O objetivo deste trabalho é verificar a existência e os níveis de concentração de Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Carbono (CO)₂, Ozônio (O₃), Dióxido de enxofre (SO₂), Material Particulado (MP₁₀) e (MP_{2,5}), Óxido Nítrico (NO) e Dióxido de Nitrogênio (NO₂), de origem veicular, no terminal Norte da Companhia Paulista de Trens Metropolitanos (CPTM) no Tatuapé, em microescala por Método Equivalente. Propõe-se uma alternativa sustentável para mitigação dos poluentes e visa-se indicar qual o potencial que uma infraestrutura verde possui como barreira e filtro para estes contaminantes. Para se entender qual o potencial que uma infraestrutura verde possui ao atuar como barreira e filtro para contaminantes, foram feitas modelagens computacionais com o programa I-TREE CANOPY, projetando-se um telhado verde com arbustos sobre toda a cobertura da estação CPTM do Tatuapé, em seus terminais Norte e Sul. Após análises, identificou-se a presença e concentrações dos poluentes sendo: CO 631ppm, CO₂ 4.573ppm, O₃ 59µg/m³, MP₁₀ 1.398µg/m³, MP_{2,5} 403µg/m³, e os poluentes NO, NO₂ e SO₂ não apresentaram concentrações significativas. Verificou-se, também, que o potencial dos arbustos urbanos em atuar como barreira natural a contaminantes oriundos das emissões veiculares foram: aproximadamente 25 toneladas por ano de CO_{2eq} e, para os demais poluentes: 5,62 Kg de CO; 30,67 Kg de NO₂; 305,55 Kg de O₃; 19,32 Kg de SO₂; 14,85 Kg de MP_{2,5}; 102,35 Kg de MP₁₀ anualmente, em uma área de 25 mil metros quadrados. Dentro das condições analisadas, este estudo concluiu que existem contaminantes atmosféricos no ar do terminal Tatuapé Norte e que as concentrações de CO, CO₂, O₃ e MP estão acima do recomendado pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) e pela Organização Mundial da Saúde (OMS), e a presença e concentrações dos NO, NO₂ e SO₂ estão abaixo dos limites de tolerância; e, por fim, os arbustos urbanos possuem potencial em atuar como barreira natural a contaminantes oriundos das emissões veiculares.

Palavras-chave: Poluentes atmosféricos, carbono, material particulado, arbustos.

ABSTRACT

As a result of uncontrolled anthropogenic actions, urban areas experience problems related to air pollution, mainly arising from vehicular emissions. Problems at different scales and scenarios within the same city, which affect health and the local environment in different ways. Understanding the existence of pollutants in urban microenvironments combined with passive mitigation techniques enables urban resilience on a microscale. The objective of this work was to verify the existence and concentration levels of Carbon Monoxide (CO), Carbon Dioxide (CO₂), Ozone (O₃), Sulfur dioxide (SO₂), Particulate Material (MP₁₀) and (MP_{2.5}), Nitric Oxide (NO) and Nitrogen Dioxide (NO₂), of vehicle origin, in the North terminal of the Companhia Paulista de Trens Metropolitanos (CPTM) in Tatuapé on a microscale by Equivalent Method. Propose a sustainable alternative for the mitigation of pollutants and indicate the potential that a green infrastructure has as a barrier and filter for these contaminants. In order to understand the potential that a green infrastructure has to act as a barrier and filter for contaminants, computational modeling was carried out with the I-TREE CANOPY program, projecting a green roof with shrubs, over the entire coverage of the CPTM station in Tatuapé and its North and South terminals. After analysis, the presence and concentrations of pollutants were identified: CO 631ppm, CO₂ 4.573ppm, O₃ 59µg/m³, MP₁₀ 1.398µg/m³, MP_{2.5} 403µg/m³, and the pollutants NO, NO₂ and SO₂ did not show significant concentrations. It was also verified that the potential of urban shrubs to act as a natural barrier to contaminants arising from vehicle emissions are: Approximately 25 tons of CO_{2eq} per year, and for other pollutants: 5.62 Kg of CO; 30.67 kg of NO₂; 305.55 kg of O₃; 19.32 kg of SO₂; 14.85 kg of MP_{2.5}; 102.35 kg of PM₁₀ annually in an area of 25 thousand square meters. Within the conditions analyzed, this study concluded that there are atmospheric contaminants in the air at the Tatuapé Norte terminal and that the concentrations of CO, CO₂, O₃ and MP are above those recommended by the Environmental Company of the State of São Paulo (CETESB) and by the World Organization of Health (WHO), and the presence and concentrations of NO, NO₂ and SO₂ are below the tolerance limits and urban shrubs have the potential to act as a natural barrier to contaminants from vehicle emissions.

Keywords: Air pollutants, carbon, particulate matter, shrubs.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Absorção do MP no corpo humano	27
Figura 2 - A e B) Natação urbana - Cidade do México.....	35
Figura 3 - A e B Cobertura Extensiva	37
Figura 4 - Cobertura Intensiva.....	37
Figura 5 - Cobertura Semi-intensiva	37
Figura 6 - Fluxograma com as etapas da pesquisa	40
Figura 7 - Vista aérea da estação Tatuapé	42
Figura 8 - Terminal Sul Tatuapé e Figura 9 - Terminal Norte Tatuapé	43
Figura 10 - Cobertura da estação Tatuapé com terminais Norte e Sul.....	43
Figura 11 - Local da coleta e Figura 12 - Local da coleta (Noturno).....	48
Figura 13 - Montagem do amostrador no suporte IOM e Figura 14 - Bombas e amostradores.....	48
Figura 15 - Bomba e acessório e Figura 16 - Local da coleta (em vermelho).....	49
Figura 17 - Local de coleta de O ₃ e Figura 18 - Amostrador	50
Figura 19 - Posicionamento da coleta e Figura 20 - Coleta de Dióxido de enxofre.....	51
Figura 21 - Armazenagem refrigerada e Figura 22 - Ligação em série dos amostradores	52
Figura 23 - Local da coleta.....	52
Figura 24 - Coleta de Monóxido e Dióxido de carbono.....	53
Figura 25 - Coleta de Monóxido e Dióxido de carbono.....	54
Figura 26 - Escada telescópica de alumínio Nagano.....	54
Figura 27 - Fluxograma do uso I-TREE CANOPY	56
Figura 28 - Planta baixa com representação do locais de coleta de poluentes	58
Figura 29 - Interface da área analisada, gerada pelo I-Tree com arbustos. Sem escala.	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Grupos de poluentes	22
Tabela 2 - Intervalos de tolerância dos agentes controlados pela CETESB relacionados a qualidade do ar.....	22
Tabela 3 - Guia de qualidade do ar da OMS e meta provisória de O ₃ : concentrações de oito horas	22
Tabela 4 – Informações sobre O ₃	23
Tabela 5 - Informações sobre NO ₂	24
Tabela 6 - Informações sobre NO.....	24
Tabela 7 – Informações sobre SO ₂	25
Tabela 8 – Informações sobre CO	26
Tabela 9 – Equivalência em carbono GWP (Potencial de Aquecimento Global) e GTP (Potencial de Temperatura Global).....	31
Tabela 10 - Desvantagens.....	36
Tabela 11- Altimetria para fixação de amostradores.....	45
Tabela 12 - Distância x quantidade de veículos para coleta de O ₃	45
Tabela 13 - Atributos e descrição do Índice de Qualidade do Ar (IQAr)	46
Tabela 14 – Condições relevantes para coleta.....	47
Tabela 15 - Condições relevantes para coleta	50
Tabela 16- Condições relevantes para coleta	51
Tabela 17- Condições relevantes para coleta	52
Tabela 18 – Condições relevantes para coleta.....	53
Tabela 19 - Concentrações de MP ₁₀	59
Tabela 20 - Concentrações de MP _{2,5}	60
Tabela 21 - Concentração de Ozônio	64
Tabela 22 – Concentração de Dióxido de enxofre	67
Tabela 23 - Concentrações de óxido nítrico e dióxido de nitrogênio	70
Tabela 24 - Concentrações de monóxido de carbono e dióxido de carbono	73
Tabela 25 - Percentual de cobertura dos pontos em relação ao hectare	77
Tabela 26 - Estimativas de benefícios por arbustos.	77
Tabela 28 - Estimativas de benefícios hidrológicos por arbustos. Litros por hectare por ano	78
Tabela 29 - Projeção de emissões anuais de contaminantes com a projeção de remoções anuais com a cobertura verde sobre o telhado do terminal Norte Tatuapé.....	80

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - MP fontes e fisiopatologias	27
Quadro 2 - Efeitos agudos e crônicos dos poluentes sobre o sistema respiratório	29
Quadro 3 - Relação entre valor do IQAr e possíveis efeitos à vida.....	46

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Tipos de coberturas na amostra e hectares analisados	76
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

Agência de Proteção Ambiental Estadunidense – EPA

Avenida Radial Leste - RL

Camada de Cobertura Urbana - CCU

Camada Limite Urbana – CLU

Carbono Negro - CN

Chemical Abstracts Service - CAS

Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - CETESB

Companhia de Engenharia de Tráfego - CET

Companhia Paulista de Trens Metropolitanos – CPTM

Desvio Padrão – DP.

Dióxido de Carbono - CO₂

Dióxido de enxofre - SO₂

Dióxido de Nitrogênio - NO₂

Fundação Jorge Duprat Figueiredo - FUNDACENTRO

Gases de Efeito Estufa - GEE

Ilha de Calor Urbano – ICU

Institute of Occupational Medicine - IOM

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE

Material Particulado - MP₁₀ e MP_{2,5}

Metano - CH₄

Methods for the Determination of Hazardous Substances - MDHS

Guia Técnico de Monitoramento da Qualidade do Ar – GTMQAr

Monóxido de Carbono - CO

National Institute for Occupational Safety and Health - NIOSH

Occupational Safety and Health Administration - OSHA

Organização Mundial da Saúde - OMS

Óxido Nítrico - NO

Óxido Nitroso - N₂O

Ozônio - O₃

Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas - IPCC

Plano Municipal de Arborização Urbana - PMAU

Região Metropolitana de São Paulo - RMSP

Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa – SEEG

Trietilamina - TEA

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 OBJETIVO GERAL	19
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
2 REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1 POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA NAS CIDADES	19
2.2 CARBONO EQUIVALENTE – CO _{2eq}	30
2.3 ILHAS DE CALOR.....	31
2.4 INFRAESTRUTURA VERDE	33
2.5 COBERTURA VERDE.....	36
2.6 I-TREE CANOPY	39
3 MÉTODOS DE PESQUISA	40
3.1 ÁREA DE ESTUDO	41
3.2 TRABALHO DE CAMPO	44
3.3 COLETA DE MP	47
3.4 COLETA DE O ₃	49
3.5 COLETA DE SO ₂	50
3.6 COLETA DE NO ₂ E NO.....	51
3.7 COLETA DE CO E CO ₂	53
.....	54
3.8 ESTIMATIVA DE BENEFÍCIOS COM COBERTURA VERDE.....	55
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	56
4.1 AMOSTRAS DE MP.	59
4.2 AMOSTRA DE O ₃	63
4.3 AMOSTRA DE SO ₂	67
4.4 AMOSTRA DE NO ₂ e NO.....	69
4.5 AMOSTRA DE CO e CO ₂	72
4.6 RESULTADOS DO I-TREE CANOPY	75
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	84
5.1 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS.....	85
REFERÊNCIAS	86

1 INTRODUÇÃO

O estado de São Paulo, assim como o Brasil, passou, nos últimos anos, por muitas mudanças de cunho econômico, como industrialização e demográfica, como as ondas de migrações de pessoas saídas do campo para buscar melhores condições de vida em cidades, mudanças essas que impactaram o ar atmosférico e, conseqüentemente, a saúde dos usuários das cidades. Sabendo, pois, que não há pesquisa de campo para poluentes atmosféricos na Estação Tatuapé em seu Terminal Norte, localizado na Zona Leste da cidade de São Paulo, esta pesquisa apresentará, em microescala, dados relevantes, referentes ao ar do local.

A forma como a partir da qual os espaços urbanos são apropriados tem influência direta nos ecossistemas, o que, por vezes, pode nos dar uma percepção errada de que cidade e natureza estão em um antagonismo, cujo crescimento do espaço urbano degrada e se opõe ao ecossistema natural. Os ambientes artificiais, e os naturais, podem se relacionar de maneira harmônica e benéfica (ABBUD, 2006).

A quantidade de pessoas nos grandes centros urbanos ao redor do mundo, após a revolução industrial, aumentou de forma significativa (LUIZ, 2017). Esse crescimento não foi diferente no Brasil; como exemplo, indica-se a cidade de São Paulo - SP, considerada o centro do processo de industrialização do país e uma das cidades mais populosas do mundo; (SECRETARIA MUNICIPAL DE URBANISMO, 2021).

A aglomeração urbana em São Paulo - SP continua em expansão; o avanço é sobretudo evidenciado em bairros da periferia, onde há disponibilidade de moradias mais acessíveis economicamente. Por outro lado, acompanhando o padrão de desenvolvimento urbano, a maior oferta de emprego e infraestrutura encontra-se no centro expandido de São Paulo - SP, o que resulta no deslocamento da maior parte da população que vive na periferia em direção ao centro para chegar aos locais de trabalho. Inevitavelmente, esse deslocamento também reflete na mobilidade urbana e gera impactos ambientais.

Sob essa perspectiva, merece destaque a Zona Leste de São Paulo, que contribui, diariamente, com o deslocamento de 3,5 milhões de habitantes, por meio de diferentes modais de transporte (SEADE, 2020).

Uma das mais importantes conexões é feita pela Avenida Radial Leste, uma via arterial praticamente em linha reta, com intenso fluxo de veículos automotores: carros, motos, ônibus, caminhões dentre outros.

Apesar de necessária, a tradicional concepção do sistema de mobilidade urbana prioriza veículos movidos a combustão, o que culmina em poluição. No caso de São Paulo – SP, em diversos trechos urbanos, é perceptível a prevalência de uma infraestrutura urbana que não tem como prioridade os usuários da cidade. As cidades onde as infraestruturas não priorizam seus usuários são tidas, como infraestruturas cinzas, e favorecem a poluição (BUCKERIDGE, 2015).

Os veículos automotores são os maiores responsáveis pela emissão de gases de efeito estufa (GEE), como o dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), dentre outros poluentes gasosos e materiais particulados (MP), (EPA,2021).

Os GEE, quando não controlados, contribuem para o aquecimento global, que, por sua vez, interfere nos processos naturais de ecossistemas no planeta (CETESB, 2020). De acordo com o relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática (IPCC, 2018), com um incremento de apenas 2°C na temperatura ambiente, quase todos os corais deixariam de existir, e seriam observadas com mais frequência ondas de calor, incêndios florestais, inundações de regiões costeiras, aumento dos casos de dengue e malária.

Em relatório mais recente, o IPCC ainda destacou que a ação humana fez com que oceanos e terra aquecessem; o planeta está alterado e menos estável e irá aquecer $1,5^\circ\text{C}$ até 2030. Portanto, o lançamento de GEE precisa ser controlado em curto prazo, uma vez que, em função deste já inevitável aquecimento, os oceanos e outros ecossistemas estarão com capacidade limitada no que diz respeito à recuperação natural do meio ambiente (IPCC, 2021).

As consequências das ações humanas e as alterações climáticas também são verificadas na qualidade do ar e na saúde. Por exemplo, altas concentrações de poluentes atmosféricos estão relacionados com o aumento da incidência de doenças respiratórias e diminuição das funções pulmonares (MISSAGIA *et al.*, 2018).

Por outro lado, por meio de ações corretas de manejo de árvores, arbustos e forrações verdes, é possível que se consiga a remoção, o sequestro e o armazenamento de carbono e GEE, o que favorece o equilíbrio climático, (Plano Municipal de Arborização Urbana (PMAU), 2019). Segundo Escobedo *et al.* (2010), as árvores, arbustos e forrações verdes são peças-chaves no processo de recuperação da qualidade ambiental nos centros urbanos. O uso destas no planejamento urbano pode trazer benefícios comprovados por muitos estudos técnicos científicos em todo o mundo e podem, sistematicamente, serem utilizadas por governos para promoção do bem-estar nas cidades.

Portanto, considerando-se os desafios relacionados à poluição ambiental e o gerenciamento de cidades, este estudo busca responder à seguinte questão de pesquisa: Qual o

potencial de árvores, arbustos e coberturas verdes em atuar como barreira natural a contaminantes oriundos das emissões veiculares?

Para responder ao questionamento, o trabalho se fundamentará em pesquisas científicas sobre o papel das soluções urbanas sustentáveis, sobretudo infraestrutura verde, para monitorar e minimizar os impactos da poluição atmosférica em área de estudo com intensa influência de emissões veiculares, inserida na cidade de São Paulo. Espera-se que parte significativa das análises e discussões, realizadas a partir desta pesquisa, possa evidenciar a importância da infraestrutura verde como ferramenta ao planejamento urbano sustentável.

1.1 OBJETIVO GERAL

Determinar a existência e níveis de contaminantes aéreos que podem ser removidos da atmosfera por meio de uma infraestrutura verde e evidenciar seu potencial em atuar como filtro natural aos poluentes atmosféricos CO, CO₂, O₃, SO₂, MP₁₀, MP_{2,5} NO, NO₂ em área influenciada por intenso tráfego veicular, em São Paulo - SP

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1.2.1 A partir de amostras do ar, determinar a existência e concentrações de poluentes atmosféricos encontrados em um terminal de transporte público em São Paulo – SP;

1.2.2 Comparar as concentrações experimentais com os valores de referência de qualidade, recomendados, principalmente, pela CETESB e Organização Mundial da Saúde (OMS);

1.2.3 Apresentar proposta de solução sustentável e indicar seu potencial em atuar como filtro natural para os contaminantes estudados por meio de modelagens computacionais.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA NAS CIDADES

A expansão urbana é um dos fenômenos predominantes do último século (BAKLANOV; MOLINA; GAUSS, 2016). Com isso, tem-se uma maior oferta de empregos, de renda e de serviços públicos que propiciaram o crescimento global das cidades, sobretudo após a segunda metade do século XX (SILVA et al., 2019). A situação fez com que 55% da população mundial passasse a viver em um contexto essencialmente urbano (MEYERSON; MERINO; DURAND, 2007).

A aglomeração de novos habitantes nas cidades fez com que as mesmas adotassem novos hábitos de uso e ocupação do solo, o que resultou na redução dos ecossistemas naturais e no aumento excessivo de problemas ambientais (SETO; FRAGKIAS; GÜNERALP, 2011). Essas mudanças afetaram a biodiversidade, os ciclos biogeoquímicos e o clima (GRIMM *et al.*, 2008). Com isso, as cidades ficaram cada vez mais vulneráveis aos efeitos das mudanças climáticas (ESTRADA; BOTZEN; TOL, 2017).

Esta vulnerabilidade é ainda mais evidente em cidades com mais de dez milhões de habitantes, chamadas de “megacidades” (SILVA *et al.*, 2019), pois nelas se concentra a maior parte dos problemas ambientais urbanos (ENDRENY *et al.*, 2017). Em estimativas, estudos revelam que cerca de 10% da população mundial está exposta aos problemas ambientais ocasionados em megacidades (FOLBERTH *et al.*, 2015); e que 82% desses problemas ocorrem nos países em desenvolvimento e de baixa renda.

A cidade de São Paulo é o quinto maior conglomerado do mundo, e, da mesma forma que as demais “megacidades”, sofreu processo intenso de urbanização fomentado pela aceleração do crescimento espacial e populacional após 1950 (BUCKERIDGE, 2015).

O processo de urbanização caracterizou-se, sobretudo, com a substituição do ambiente natural pela superfície construída que, por sua vez, apresentou potencial de modificar o clima das cidades de forma intensa (ABBUD, 2006).

Nesse sentido, concebe-se que a formação de ilhas de calor (ICU) que são alterações climáticas emblemáticas do processo de urbanização (SILVA *et al.*, 2019). Dentre os problemas verificados com as ICU estão.

- (I) A falta do mínimo controle de microclimas, o que promove a redução da vegetação;
- (II) O uso de materiais com maior capacidade de reter calor;
- (III) As atividades humanas que emitem poluentes (BAKLANOV; MOLINA; GAUSS, 2016);

As ICU contribuem para o aumento da temperatura nas cidades, o qual é, em média, duas vezes maior do que a registrada na Terra, desde o ano de 1950. Para Estrada, Botzen e Tol (2017), esse aumento fez com que 60% da população urbana mundial ficasse vulnerável aos efeitos do aquecimento global. Especificamente sobre o contexto paulista, no último século, a capital vivenciou um aumento de temperatura de até 3°C, valor superior à média global, de 0,76°C e à média verificada em todo o Hemisfério Sul, de 0,61°C (SILVA *et al.*, 2019).

Em consequência do aumento da temperatura, cumpre chamar também a atenção para o padrão de ocorrências de precipitações.

O volume de chuvas não sofreu variações significativas; porém, a distribuição dos eventos não é equilibrada; ou seja, menos ocorrências e de forma bastante intensa (BAKLANOV; MOLINA; GAUSS, 2016).

As alterações nos parâmetros climáticos das cidades, somadas ao aumento da poluição ambiental urbana, integram preocupação crescente nos grandes centros urbanos (GRIMM *et al.*, 2008).

A poluição atmosférica trata-se do quinto maior fator de risco de morte que afeta todos os gêneros e faixas de idade (OMS, 2021).

Poluente atmosférico é toda substância presente no ar que pode se tornar imprópria, nociva ou ofensiva à saúde e que causa algum inconveniente ao bem-estar público. Os poluentes são divididos de forma qualitativa em duas classes: primários e secundários, conforme indicado pela CETESB, 2019.

- (I) Primários: aqueles emitidos diretamente pelas fontes de emissão;
- (II) Secundários: aqueles formados na atmosfera por meio da reação química entre poluentes primários e componentes naturais da atmosfera.

A compreensão sobre as classes e grupos de poluentes é importante para determinar os métodos mais adequados nas diferentes tratativas com poluentes (OMS, 2005), assim como a compreensão exata sobre o composto. Para isso, pode-se utilizar o número *Chemical Abstracts Service* (CAS), que se trata de uma identidade numérica única e específica para o composto. Esse número não possui significado químico, o que ajuda evitar erros de nomenclaturas e facilita a compreensão do tipo de composto (CAS, 2021).

Os principais grupos de poluentes emitidos em cidades como São Paulo, e utilizados para fins de avaliação da qualidade do ar, são: os indicados na Tabela 01 e os intervalos de tolerância recomendados, apresentados na Tabela 02, conforme preconiza a agência ambiental do estado (CETESB, 2019).

Tabela 1 - Grupos de poluentes

Compostos de Enxofre	Compostos de Nitrogênio	Monóxido de Carbono	Material Particulado	Oxidantes Fotoquímicos
SO ₂	NO	CO	Mistura de compostos no estado sólido ou líquido.	O ₃
	NO ₂			

Fonte: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/poluentes/> Acesso 26/11/2021

Tabela 2 - Intervalos de tolerância dos agentes controlados pela CETESB relacionados a qualidade do ar

MP ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 24h	MP _{2,5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 24h	O ₃ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 8h	CO Partes por milhão (ppm) 8h	NO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 1h	SO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 24h
0 - 50	0 - 25	0 - 100	0 - 9	0 - 200	0 - 20

Fonte: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/poluentes/>

Tabela 3 - Guia de qualidade do ar da OMS e meta provisória de O₃: concentrações de oito horas

	Média máxima diária de oito horas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Fundamento do nível escolhido
Níveis altos	240	Efeitos significativos na saúde; parte substancial da população vulnerável afetada.
Alvo intermediário-1 (OI-1)	160	Efeitos significativos na saúde; não proporciona proteção adequada da saúde pública. A exposição a este nível está associada a: <ul style="list-style-type: none"> Efeitos fisiológicos e inflamatórios nos pulmões de adultos jovens saudáveis que se exercitam expostos durante períodos de 6,6 horas; Efeitos na saúde das crianças (com base em vários estudos de acampamentos de verão em que as crianças foram expostas a níveis ambientais de ozônio); Aumento estimado de 3-5% da mortalidade diária (com base nos resultados de estudos de séries cronológicas diárias).
Índice -Guia da qualidade do ar. OMS	100	Proporciona uma proteção adequada da saúde pública, embora possam ocorrer alguns efeitos na saúde abaixo deste nível. A exposição a este nível de ozônio está associada com: <ul style="list-style-type: none"> aumento estimado de 1-2% da mortalidade diária (com

		<p>base nos resultados de estudos de séries cronológicas diárias);</p> <ul style="list-style-type: none"> • extrapolação a partir de estudos laboratoriais e de campo, com base na probabilidade de que a exposição na vida real tende a ser repetitiva e que sejam excluídas dos estudos laboratoriais as pessoas muito sensíveis ou com problemas clínicos, bem como as crianças; • a probabilidade de ozônio ambiental ser um marcador para os oxidantes com ele relacionados.
--	--	---

Mortes atribuíveis ao O₃. Os estudos de séries cronológicas indicam um aumento da mortalidade diária da ordem de 0,3-0,5% por cada aumento de 10 µg/m³ nas concentrações de O₃ durante oito horas acima de um nível de referência estimado de 70 µg/m³.

Dentre os poluentes recomendados pela CETESB e OMS como alvo de monitoramento a Tabela 4 apresenta características do O₃.

Tabela 4 – Informações sobre O₃

Tipo de composto.	Ozônio
Representação gráfica do composto.	O ₃
Aspectos	Gás colorido em tons azulados. Composto por 3 átomos de oxigênio.
Solubilidade	Em água
Ocorrência	Na estratosfera de forma natural. Em nível do solo por reações fotoquímicas entre óxidos de nitrogênio (NO _x), compostos orgânicos voláteis (VOC) e luz solar.
Número CAS.	10028-15-6

Fonte: [https:// www.epa.gov/ground-level-ozone-pollution/ground-level-ozone-basics#formation](https://www.epa.gov/ground-level-ozone-pollution/ground-level-ozone-basics#formation)

Até o início do ano 2000, a recomendação da OMS para níveis de O₃ era de 120 µg/m³ por oito horas. A partir de 2005, o nível recomendado passou a ser de 100 µg/m³ pelas mesmas oito horas, devido ao aumento de emissões, conforme mostra a Tabela 3. O mesmo valor apresentado na Tabela 3 pela OMS é apresentado na Tabela 2 (CETESB).

A seguir, para melhor compreensão sobre NO₂ e NO, as Tabelas 5 e 6 sintetizam características dos compostos.

Tabela 5 - Informações sobre NO₂

Tipo de composto.	Dióxido de nitrogênio
Representação gráfica do composto.	NO ₂
Aspectos	Gasoso castanho. Composto por 2 átomos de oxigênio e 1 átomo de nitrogênio.
Solubilidade	Em água
Ocorrência	Na atmosfera pela queima de combustíveis, principalmente de veículos automotores.
Número CAS.	10102-44-0

Fonte: <https://www.epa.gov/no2-pollution/basic-information-about-no2#What%20is%20NO2>

Tabela 6 - Informações sobre NO

Tipo de composto.	Óxido nítrico
Representação gráfica do composto.	NO
Aspectos	Gasoso incolor. Composto por nitrogênio e oxigênio.
Solubilidade	Em Lipídeos
Ocorrência	Através da elevação de temperatura de Nitrogênio e Oxigênio e aminoácidos de arginina
Número CAS.	10102-43-9

Fonte: https://www.crq4.org.br/quimica_viva_oxido_nitrico/https://pt.wikipedia.org/wiki/%C3%93xido_n%C3%ADtrico. Funções biológicas do óxido nítrico

Como contaminante do ar, o NO₂ atua de forma multifuncional, de modo que muitas vezes é difícil identificar o processo de contaminação nos organismos vivos. Em animais irracionais e em seres humanos, concentrações do composto (acima de 200 µg/m³), mesmo em um curto tempo de exposição, podem causar toxicidade e danos à saúde. O NO₂ contaminante consegue viabilizar a associação com partículas ultrafinas e óxido nitroso N₂O (OMS, 2005). Os poluentes primários NO₂ e o óxido nítrico (NO) viabilizam a formação do ozônio e são de difícil separação e, normalmente, quando identificados na atmosfera, estão juntos (CETESB, 2019).

O principal meio de absorção humana de NO₂ é pelo trato respiratório, mas a absorção tóxica cutânea também acontece, principalmente nos locais com concentrações acima dos limites de tolerância. Devido à baixa solubilidade em água, grande parte do NO₂ pode atingir os alvéolos sem ser absorvida pelas paredes do trato respiratório, causando lesões pulmonares, irritação nas mucosas e disfunção pulmonar crônica. A gravidade dos efeitos depende mais da concentração do poluente estar acima dos limites de tolerância do que do tempo que a pessoa

fica exposta, porém, tratando-se de animais irracionais, é válido mencionar que a exposição a longo prazo causa anormalidades no sangue e potencial dano genético (IFA, 2021); além da capacidade de alterar a acidez natural, o NO₂ também viabiliza a formação de chuvas ácidas, impactando corpos d'águas e tecidos vegetais (IAP, 2013).

O SO₂ é um composto químico e algumas de suas características podem ser observadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Informações sobre SO₂

Tipo de composto.	Dióxido de enxofre.
Representação gráfica do composto.	SO ₂
Aspectos	Gasoso incolor. Composto dois átomos de oxigênio e um de enxofre.
Solubilidade	Em água
Ocorrência	Através da queima de combustíveis fósseis por ação antrópica e naturais ex: erupções vulcânicas
Número CAS.	7446-09-5

Fonte: <https://www.epa.gov/so2-pollution/sulfur-dioxide-basics#what%20is%20so2->
https://pt.wikipedia.org/wiki/Di%C3%B3xido_de_enxofre

E relação ao SO₂, a principal fonte de ingestão é o trato respiratório (IFA, 2021). Também é um poluente primário do grupo dos compostos de enxofre e suas emissões devem ser monitoradas, privilegiando-se locais com emissão de queima de combustíveis fósseis, sobretudo locais com predominância de veículos movidos a diesel (CETESB, 2019).

Para Hedley *et al.* (2002), a redução das emissões de SO₂ está relacionada diretamente à redução de mortes em seres humanos por doenças respiratórias e cardiovasculares; a redução do uso de combustíveis ricos em enxofre impacta diretamente de forma positiva na saúde humana, evidenciado pelo seu experimento em Hong Kong, cujas usinas de energias e veículos usaram por um tempo óleo combustível com baixo teor de enxofre e, durante o mesmo período, as taxas de mortalidades diminuiram. Segundo a OMS (2019), a diminuição das emissões de SO₂ por veículos e indústrias conduziria a uma melhora significativa da qualidade de vida e da saúde, principalmente aos efeitos danosos causados ao trato respiratório humano.

Irritação crônica e inflamação do trato respiratório com redução do olfato e, mais raramente, conjuntivite, são consequências da exposição ao longo prazo a SO₂; os fumantes e asmáticos são, particularmente, os mais afetados pelos efeitos de concentrações de SO₂ em relação aos problemas respiratórios, no entanto, existe o risco de dano fetal em mulheres grávidas expostas (IAP, 2013).

De relevância para estudos ambientais, tem-se, também, o CO e algumas de suas características podem ser observadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Informações sobre CO

Tipo de composto.	Monóxido de carbono.
Representação gráfica do composto.	CO
Aspectos	Gasoso incolor. Composto de um óxido de carbono
Solubilidade	Em água, etanol, benzeno dentro outros.
Ocorrência	Através da queima de combustíveis fósseis por ação antrópica e naturais ex: erupções vulcânicas
Número CAS.	630 08 8

Fonte: <https://www.epa.gov/co-pollution/basic-information-about-carbon-monoxide-co-outdoor-air-pollution#What%20is%20CO://> https://pt.wikipedia.org/wiki/Mon%C3%B3xido_de_carbono

O CO é uma substância gasosa, considerada um poluente primário, que tem como fonte principal emissões veiculares (CETESB, 2019). Para humanos, sua absorção ocorre por meio do trato respiratório (IFA, 2021). Uma vez inalado, tem potencial de inibir a capacidade do sangue em trocar oxigênio com tecidos vitais. Assim, afeta, principalmente, o sistema cardiovascular e o sistema nervoso. Mesmo em concentrações abaixo dos limites de tolerância estabelecidos pelas agências internacionais de saúde, ainda é susceptível de gerar problemas cardiovasculares em doentes coronários; enquanto em teores mais elevados que os limites de tolerância estabelecidos pelas agências reguladoras, pode levar a tonturas dores de cabeça e fadigas (IAP, 2013).

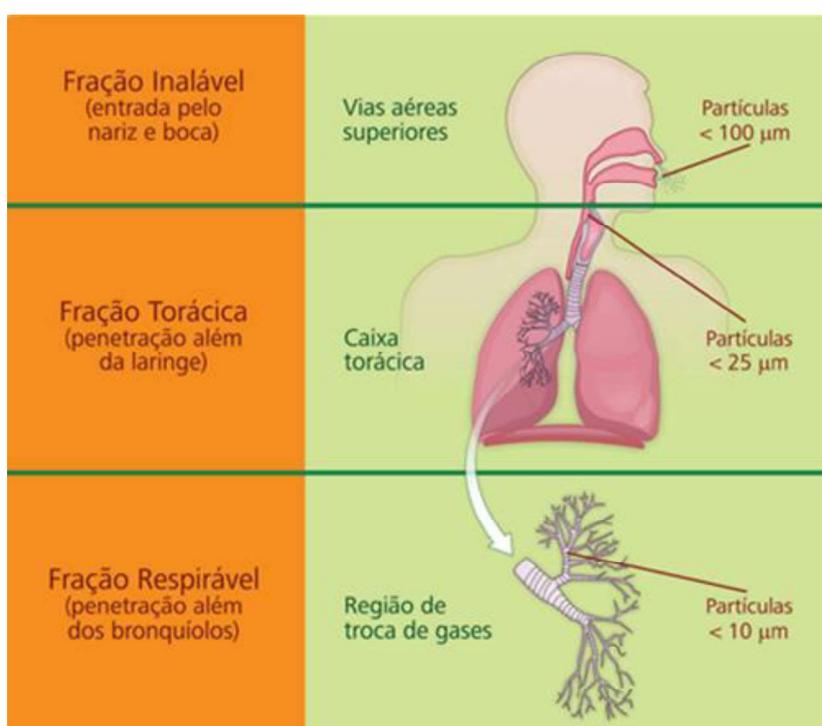
Os MP podem ter origem primária ou secundária; apresentam variações de formato, tamanho e composição química, dependendo da fonte emissora. A classificação dos MP leva em consideração o tamanho da partícula (ARBEX *et al.*, 2012). Os MP, além de serem partículas que sedimentam no trato respiratório em sua composição, apresentam uma variedade de compostos potencialmente tóxicos, como metais pesados e compostos orgânicos e o *Black Carbon (BC)* ou Carbono Negro (CN) (PETZOLD *et al.*, 2013).

No caso da agência ambiental paulista, os MP são definidos como partículas totais em suspensão (PTS), com diâmetro igual ou menor que 50µm, as quais são desfavoráveis à qualidade de vida, bem como interferem nas condições estéticas do meio ambiente e classificadas em:

- (I) Partículas inaláveis (ou fração torácica MP_{10}), com diâmetro igual ou menor que $10\mu m$, podem ficar retidas na parte superior do sistema respiratório e podem alcançar alvéolos pulmonares;
- (II) Partículas inaláveis finais (ou fração respirável $MP_{2,5}$), com diâmetro igual ou menor que $2,5\mu m$, penetram profundamente no sistema respiratório;
- (III) Fumaça, material particulado suspenso advindo de processos de combustão, resultam em fuligem na atmosfera (CETESB 2019).

Na Figura 01, apresenta-se um esquema referente à penetração dos MP pelo organismo humano, considerando-se o tamanho de partículas, enquanto o Quadro 01 apresenta as fontes mais comuns de MP, assim como apresenta dados quanto a sua penetração e fisiopatologia associada.

Figura 1 - Absorção do MP no corpo humano



Fonte: <https://www.ufsm.br/app/uploads/sites/342/2020/04/HIGIENE-OCUPACIONAL-III.pdf>

Quadro 1 - MP fontes e fisiopatologias

Poluentes	Fontes	Penetração no sistema respiratório	Fisiopatologia
PTS	Fontes antropogênicas: poeira	Nariz, garganta.	Diminui a atividade

MP10	da rua e de estradas, atividades agrícolas e de construções. Fontes naturais: sal marinho, pólen, esporos, fungos e cinzas vulcânicas.	Traqueia, brônquios, bronquíolos.	mucociliar e dos macrófagos. Produz irritação nas vias respiratórias. Causa estresse oxidativo e, em consequência, inflamação pulmonar e sistêmica. Exposição crônica produz remodelamento brônquico e Doenças Pulmonar Obstrutiva Crônica (DPOC). Pode ser cancerígeno.
MP2,5	Queima de combustíveis fósseis e de biomassa, usinas termoeletricas.	Alvéolos	
MP0,1		Alvéolos, tecido pulmonar, corrente sanguínea	

Fonte: Marcos Abdo Arbex (2012)

O Quadro 01 indica que os MP afetam o sistema respiratório, causando inflamações com repercussões sistêmicas com efeitos nocivos adversos, as quais podem ser agudas ou crônicas. Os efeitos agudos podem se manifestar em poucas horas ou dias; já os crônicos, comumente, manifestam-se após anos ou décadas. Crianças, idosos e pessoas com doenças crônicas pré-existent são mais suscetíveis às doenças associadas à poluição atmosférica. (ARBEX *et al.*, 2012).

Conforme supracitado, um dos elementos que integram o MP é o CN, termo empregado para referenciar o constituinte carbonáceo do material particulado atmosférico (PTEZOLD *et al.*, 2013). O CN é formado a partir da queima de combustíveis a base de carbono (CHEN *et al.*, 2020). Além disso, a queima de biomassa a céu aberto, como florestas, gramados e resíduos agrícolas, tem possibilitado o incremento desse poluente, agravando efeitos adversos da poluição atmosférica (BRIGGS; LONG, 2016)

O CN pode permanecer na atmosfera por dias – ou semanas (OZDEMIR *et al.*, 2014) e, ainda, pode interagir com todos os comprimentos de onda da radiação solar que integram a troposfera (ZHENG *et al.*, 2017), o que modifica a quantidade e o padrão de chuvas. Portanto, é um poluente de preocupação global, frente às mudanças climáticas (LACK *et al.*, 2014).

Em relação à aparência, as partículas de CN possuem tonalidade escura e variam em termos de tamanho, porém, são predominantes no MP_{2,5} e na fração ultrafina (inferior a 100µm) (MA; BIRMILI, 2015, SEGALIN; GONÇALVES; FORNARO, 2016). Portanto, o contaminante pode atingir porções inferiores no trato respiratório, que resultam em problemas cardiovasculares e pulmonares (YAMINEVA; LIU, 2019). O tamanho diminuto faz com que as partículas de CN possuam uma grande área de superfície; ou seja, tais partículas podem absorver ou adsorver uma ampla gama de substâncias de alto teor de toxicidade.

Para fins de exemplificação, no Quadro 02, apresentam-se os efeitos adversos que os poluentes atmosféricos podem causar ao sistema respiratório (ARBEX *et al.* 2012).

Quadro 2 - Efeitos agudos e crônicos dos poluentes sobre o sistema respiratório

Efeitos da exposição aguda (horas e dias após a elevação da poluição)
Aumento da mortalidade; Exacerbação dos sintomas em indivíduos com DPOC e asma; Maior frequência de infecções respiratórias agudas; Aumento do número de internações hospitalares por pneumonia; Aumento da prevalência de sintomas e sinais de irritação nos olhos, narinas e garganta; Aumento da prevalência de sintomas respiratórios agudos (sibilância, tosse e expectoração); Necessidade de aumentar a dose de uso de medicamentos; Alterações agudas na função pulmonar; Aumento do número de consultas médicas, de atendimento de emergência e de internações; Maior taxa de absenteísmo no trabalho e na escola.
Efeitos da exposição crônica (anos de exposição crônica)
Aumento da mortalidade por doenças respiratórias; Aumento da incidência e prevalência de asma e DPOC; Aumento da incidência e mortalidade por câncer de pulmão; Aumento da incidência e de mortalidade por pneumonia e influenza; Alterações crônicas na função pulmonar; Redução crônica do Volume Expiratório Forçado (VEF) e Capacidade Vital Forçada (CVF); Menor desenvolvimento pulmonar em crianças e jovens; Aumento da prevalência de pessoas com VEF1 abaixo da normalidade; Aumento na taxa de declínio do VEF1.
Outros efeitos
Recém-nascidos com baixo peso; Partos prematuros; Alteração no desenvolvimento cognitivo das crianças.

Fonte: Marcos Abdo Arbex (2012)

Sob a perspectiva dos GEE, segundo o Ministério do Desenvolvimento da Indústria e Comércio Exterior (2009), expõe-se que o efeito estufa é influenciado pela radiação solar que perpassa a atmosfera, de modo a aquecer a superfície terrestre. Sendo assim, ainda que parte dessa radiação seja refletida de volta para o espaço, os GEE, que se encontram na atmosfera, absorvem parte dessa radiação e resultam no aquecimento do planeta.

Segundo Brander (2012), os denominados gases de efeito estufa (GEE) são todos aqueles que têm capacidade de absorver e reemitir calor, fazendo com que a atmosfera do planeta se mantenha mais quente do que seria se não houvesse determinada quantidade desses gases, sendo os principais GEE que se encontram na atmosfera do planeta Terra os seguintes: dióxido de carbono (CO₂); óxido nitroso (N₂O); metano (CH₄); ozônio (O₃) e vapor d'água. Os

GEE existem de maneira natural na atmosfera terrestre, contudo, certos atos da humanidade, como, por exemplo, a combustão de combustíveis fósseis, acabam ocasionando um aumento das taxas de GEE que se encontram na atmosfera.

Nesse contexto, o tratado internacional, chamado de Protocolo de Kyoto, é um tratado que objetiva controlar a emissão de GEE gerados pelos atos do ser humano. Assinado e ratificado em 11/12/1997, o Protocolo de Kyoto é um dos meios utilizados para combater as alterações climáticas e diminuir a liberação de dióxido de carbono. Entrou em atuação no ano de 2005 (BEŞE; FRIDAY, 2021).

Conclui-se que a poluição do ar nas cidades infere uma grande complexidade, pois, fora de controle, ela pode impactar e produzir efeitos em toda a biota. Além disso, refletem-se não apenas nos ecossistemas urbanos, mas nos padrões climáticos globais, sobretudo quando consideramos poluentes com capacidade de acumular e retransmitir calor, exemplo: Carbono Negro.

A poluição incide sobre o efeito estufa; de modo que o controle de emissões dos poluentes como MP, O₃, SO₂, NO₂, CO, -em cidades como São Paulo, é válido para prevenir impactos na saúde e no meio ambiente, assim como o fomento aos recursos e tecnologias que sejam capazes de sequestrar os excessos desses poluentes já lançados na atmosfera.

2.2 CARBONO EQUIVALENTE – CO_{2eq}

Em virtude da sua importância para o efeito estufa, o dióxido de carbono (CO₂) foi adotado como referência para o cálculo de emissões, desenvolvendo-se, portanto, o denominado “Carbono equivalente” (CO_{2eq}) (BRASIL, 2009).

De acordo com Nobre *et al.* (2012), o CO_{2eq} é o nome dado à medida métrica que objetiva fazer uma comparação dos (GEE), segundo o seu potencial de aquecimento global.

Na literatura, são indicadas diferentes formas de "CO₂ equivalente", "CO_{2eq}" ou mesmo "CO_{2e}". Brander (2012), por sua vez, define o CO_{2eq} como um termo utilizado para retratar diferentes GEE em uma única unidade expressa por meio da multiplicação da quantidade de GEE pelo seu potencial de aquecimento global. Sendo assim, ele acrescenta que o emprego deste termo possibilita a identificação de “pacotes” de GEE em uma única medida, permitindo, desta forma, a fácil comparação de diferentes “pacotes” de GEE, a fim de verificar o seu impacto no aquecimento global. Na Tabela 09, apresenta-se o CO_{2eq} de alguns gases de efeito estufa mencionados no protocolo de Kyoto:

Tabela 9 – Equivalência em carbono GWP (Potencial de Aquecimento Global) e GTP (Potencial de Temperatura Global)

Gás	GTP - 100	GWP - 100
CO ₂	1	1
CH ₄	5	21
N ₂ O	270	310

Fonte: SEEG Brasil (2009)

Nesse contexto, o SEEG (2009) menciona que cada gás de efeito estufa é mensurado e convertido em CO_{2eq} de acordo com o seu potencial de aquecimento. Assim, usando como exemplo o CH₄ apresentado na Tabela 04, menciona-se que ele possui potencial de aquecimento global que é aproximadamente 21 vezes maior do que o CO₂, portanto, que o “Carbono Equivalente do-CO_{2eq}” do CH₄ a 21. Outro exemplo seria o N₂O, que possui 310 vezes mais potencial de aquecimento global do que o CO₂.

Em 2018, a cidade de São Paulo emitiu quase 18×10^6 t CO_{2eq}, sendo o setor de energia o maior responsável. Em contrapartida, teve uma remoção aproximada de pouco mais de 73×10^3 t CO_{2eq} em razão do investimento em vegetações secundárias da cidade (SEEG 2020).

2.3 ILHAS DE CALOR

Segundo Costa, Silva e Peres (2010), é possível compreender que as ilhas de calor obtiveram tal denominação devido a um fenômeno que ocorre em áreas urbanizadas, nas quais existe grande concentração de calor. É possível perceber isso quando essas áreas urbanas têm sua temperatura comparada à temperatura de áreas naturais.

Para Costa, Silva e Peres (2010), ocorre aumento de temperatura devido ao grande crescimento de áreas urbanas, que são caracterizadas pela infraestrutura cinza: com edifícios, avenidas e ruas, o que resulta em aumento da impermeabilização das superfícies e a difusão do calor em direção a atmosfera, gerando, assim, áreas consideradas como ilhas de calor urbanas (ICU).

Além de empreendimentos e edificações impermeáveis, Barros e Lombardo (2016) indicam que as alterações nas temperaturas locais também são influenciadas pela poluição atmosférica; por exemplo, com lançamento de GEE e MP na atmosfera, o resultado disso é as cidades criarem o seu próprio campo climático, diferente do que seria se a área não fosse urbanizada.

As ICU demonstram uma variedade temporal e costumam ter maior evidência na parte da noite, comumente entre 3 e 5 horas depois do sol se pôr, por isso, é considerado um fenômeno

noturno (OKE, 1981 e 1982). Outros estudos, realizados em Vancouver – Canadá (RUNNALS; OKE, 2000) e em Szeged – Hungria (SÜMEGHY; UNGER, 2003) também indicaram que a intensificação da ICU pode ocorrer entre 6 e 7 horas depois do pôr do sol. Por outro lado, em cidades tropicais, como Antofagasta - Chile, Rio de Janeiro e Juiz de Fora, no Brasil, e em Toluca - México, o maior pico de temperatura na ICU acontece no intervalo diurno (NAVARRETE *et al.*, 2001).

Fialho (2012) enfatiza que, possivelmente, estas variantes de períodos nos quais ocorrem o fenômeno são devidas à localização latitudinal, um fator relevante para variabilidade sazonal do tempo de extensão do dia e da noite e, conseqüentemente, da variação diária da temperatura; bem como devido à escala topoclimática; isto é, a direção das vertentes. Trata-se de um elemento que tem a capacidade de auxiliar (ou não) o acesso dos raios solares ao decorrer do dia, devido à interferência da sombra e da concentração de ar frio na parte mais baixa de regiões com formação em vales.

Em relação a ICU vertical, também influenciada pela latitude, o clima da área demonstra uma variação de temperatura em duas camadas:

- (I) Camada Limite Urbana (CLU): Uma camada de calor que se estende do limite médio dos telhados até o limite de influência da cidade em relação à atmosfera. (OKE, 1981 e 1982);
- (II) Camada de Cobertura Urbana (CCU): Uma camada de calor que se estende desde o solo até aproximadamente o nível médio da cobertura das edificações (OKE, 1981 e 1982).

Na CCU, o processo de calor se intensifica em função de processos em microescalas, que acontecem entre ruas e prédios, sobretudo atividades antropogênicas (OKE, 1981 e 1982).

No entanto, tratando-se de CLU, tal fenômeno teve o seu desenvolvimento intensificado em áreas de concentração topográfica artificial. Essa topografia artificial, por sua vez, influencia na direção natural dos ventos onde a celeridade natural do vento diminui, porém, há um aumento da turbulência e da aerodinâmica, o que faz com que haja maior atrito do vento nas estruturas artificiais. Aumenta-se, assim, a energia estática e a própria temperatura (OKE, 1981 e 1982).

Segundo Costa, Silva e Peres (2010), em seu estudo realizado em Ilha Solteira – SP, é possível observar nas áreas urbanas de lazer com predominância de vegetação uma grande diferença de temperatura em relação às áreas urbanas com predominância de edifícios e

pavimentação; as temperaturas nos locais com vegetação predominante chegam no máximo aos 23°C; e, nas áreas urbanas abundantes, em pavimentações e edifícios, existem temperaturas registradas de até 44° C.

Segundo Barros e Lombardo (2016), em seu estudo realizado na cidade de São Paulo, além de problemas relacionados à concentração de poluentes, inundações e ondas de frio, as ICU também fazem parte da rotina de moradores de cidades grandes, como São Paulo, e, de fato, existe uma ligação das alterações de temperatura com a taxa de mortalidade da cidade, sendo que, na amostra realizada, o aumento de 1° C na temperatura mediana significa um crescimento de 3,46% da taxa de mortalidade como um todo e 3,26% daquelas que são devidas à problemas cardiovasculares e respiratórios.

2.4 INFRAESTRUTURA VERDE

A infraestrutura verde desempenha papel importante à qualidade ambiental, pois, com ela, as cidades conseguem diminuir a pegada de carbono, ou seja, os carbonos emitidos no contexto urbano, visto que propõem alternativas para um menor consumo de energia, capturam carbono, evitam a sedimentação dos corpos d'água e protegem e aumentam a biodiversidade (HERZOG, 2009).

Fornecem, ainda, serviços ecossistêmicos que evitam ou diminuem a poluição das águas, do ar e do solo (BIANCHI *et al.*, 2006). As cidades precisam proporcionar qualidade de vida, e, para tanto, os espaços verdes públicos são essenciais. Portanto, devem ser bem planejados e de fácil acesso (HERZOG; ROSA, 2010).

A maior parte das grandes cidades se encontram e vulneráveis aos efeitos causados por uma urbanização que não levou em conta aspectos e impactos ambientais durante sua implantação. A exemplo cita-se os episódios de chuvas que, normalmente, resultam em enchentes, em razão do excesso de impermeabilização do solo (BRANDÃO, 2004). Além disso, as áreas consideradas como de risco, como as encostas íngremes, os topos de morros, as baixas e as áreas alagáveis e margens de corpos d'água têm sido ocupadas pelo mercado formal e informal (HERZOG; ROSA, 2010). Causa-se perdas econômicas, sociais e ambientais (COELHO NETTO, 2005).

A infraestrutura verde faz parte de uma rede multifuncional de fragmentos permeáveis e vegetados, sobretudo arborizados, capaz de atenuar os efeitos adversos do processo de urbanização, em virtude dos eventos climáticos. Para tanto, a arborização deve incluir as ruas e as propriedades em geral, sejam elas públicas ou privadas. Esta interconexão deve compor o

“mosaico da paisagem” (HERZOG; ROSA, 2010), que tem como objetivo o restabelecimento dos processos naturais e culturais que asseguram a qualidade de vida urbana (BENEDICT; MCMAHON, 2006).

Todavia, o “mosaico da paisagem” não está ligado apenas aos aspectos geográficos, biológicos e físicos, mas também aos processos de uso e ocupação (HERZOG, 2009). Ademais, a infraestrutura verde também é designada como “infraestrutura ecológica”; isto é, pauta-se em princípios ecológicos, com ênfase na paisagem. Tais princípios afetam a estrutura, função e o clima da cidade (IGNATIEVA, 2010).

Enquanto infraestrutura verde, as árvores exercem funções ecológicas que não podem ser substituídas por nenhum outro mecanismo. Dentre os seus principais benefícios cita-se que contribuem significativamente para a prevenção da erosão; assessoram os corpos d’água; promovem a infiltração das águas das chuvas; reduzem o impacto das gotas que compactam o solo; capturam GEE; são habitat natural para múltiplas espécies; promovem a biodiversidade; e mitigam os efeitos das ICU (HERZOG; ROSA, 2010).

A presença de uma floresta urbana resulta do somatório de árvores em espaços públicos e privados diversos que integram a cidade, como, por exemplo, os parques, praças, propriedades, ruas e fragmentos de matas. O objetivo de uma infraestrutura verde é a integração desses espaços com o cenário verde para que a cidade seja, de fato, sustentável (NEWMAN *et al.*, 2009).

Na implantação significativa das infraestruturas verdes, devemos considerar a *naturação urbana* como uma aliada aos processos que engendram a recuperação biótica dos meios urbanos (ROLA, 2008). Factível e viável nos grandes centros urbanos, a *naturação urbana* é um tipo de infraestrutura verde que consiste no processo de incorporação de vegetação no ambiente urbano construído, tais como: estruturas de pontes, pontilhões, viadutos, colunas, cobertura, fachadas de equipamentos públicos e privados dentre outros. O objetivo é que essa nova natureza urbana instalada sobre uma infraestrutura artificial possa mitigar aspectos e impactos ambientais urbanos por meio dos seus processos naturais, como retenção de escoamento de águas pluviais, controle de gases e materiais particulados (URBANO, 2013).

O processo de *naturação urbana* deverá sempre levar em conta as vegetações mais adequadas ao meio que se deseja inseri-la. Considera-se questões quanto ao posicionamento das espécies que podem ocupar espaços urbanos verticais e horizontais e a relação do tipo vegetal com a biota local. Em outras palavras, espécies totalmente adaptadas ao meio, como

são as nativas de uma região que logo precisarão de menos manutenção, contribuem, assim, para o microclima, atuando como atenuantes de ICU (BOENTE, 2010).

As estratégias de *naturação urbana*, quando bem inseridas, podem contribuir de forma significativa à redução de custos com gestão urbana, visto que diminuem o tempo de escoamento das águas, mitigando pontos de alagamento. Elas ainda podem sequestrar carbono e GEE responsáveis por efeitos nocivos à saúde humana, internações e aquecimento global. Além disso, propiciam efeitos positivos à qualidade de vida como sombreamento, oferta de áreas recreacionais e embelezamento da paisagem urbana (ROJAS, 2015).

Figura 2 - A e B) Naturação urbana - Cidade do México



Fonte: <https://mac.arq.br/naturacao-urbana-vantagens-clima-ar-e-biodiversidade-local/>

Na figura 02 (A e B) são apresentados trechos do projeto de *naturação urbana* realizado na cidade do México, em 2016, com o intuito de ajudar a combater as ICU e doenças cardiorrespiratórias; os pilares dos viadutos recebem sistema estrutural para plantas por cima do concreto e, posteriormente, receberam manta geotêxtil, onde foram plantadas vegetações típicas do local. Foram instalados em conjunto com as mantas geotêxteis captadores de água da chuva com capacidade de captação de 32 milhões de metros cúbicos por ano. A prefeitura da cidade do México instalou 60.000 m² de jardins verticais, por mais de 1.000 colunas de um anel viário, ao longo de 30 km. Trata-se do maior projeto de *naturação urbana* do planeta, com potencial de filtrar mais de 27.000 toneladas de gases tóxicos, mais de 5 toneladas de MP e 10 toneladas de metais pesados (MEIO AMBIENTE E CONSTRUÇÃO 2021).

A implantação - bem projetada - de infraestrutura verde gera mais benefícios do que os custos com manutenções e manejos, como: benefícios estéticos, psicológicos, conforto térmico, o que influencia diretamente na saúde. Por outro lado, deve-se destacar que, sem planejamento

e com manejo errado, a infraestrutura verde pode conduzir a desserviços ecossistêmicos (MARBOURB, 2021).

Na cidade de São Paulo, em 2015, teve início a instalação de algumas infraestruturas verdes cognominadas de “Jardins Verticais” e, dentre estes, menciona-se o Jardim vertical, nas imediações do elevador presidente João Goulart no edifício Santa Filomena, e o Jardim Vertical, localizado na Avenida 23 de Maio, que apresentaram desvantagens (G1, 2017). Para se compreender algumas de suas desvantagens a Tabela 10 apresenta uma elucidação.

Tabela 10 - Desvantagens

Requerimento de reforço estrutural e impermeabilizações de qualidade
Manutenção aumentando custos
Precisa ser irrigado por todo ciclo de vida
Criação de biodiversidade indesejada, dependendo do tipo de vegetação utilizada
Alteração na aparência da vegetação em função da mudança da estação do ano, ou pela falta de manutenção
Custo para instalação e manutenções iniciais e morosidade para retorno de investimento.

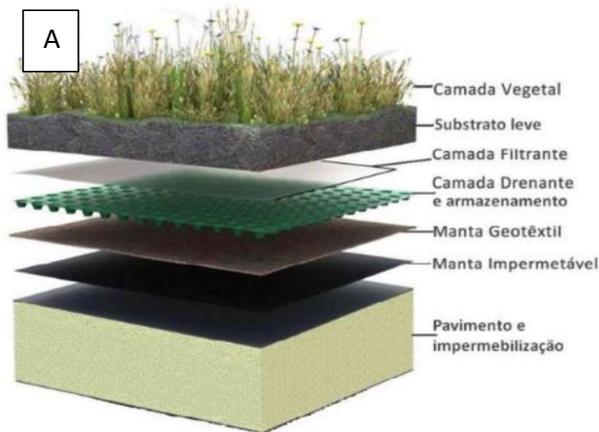
Fonte: próprio autor, com base na reportagem do G1 de 13/07/2019

2.5 COBERTURA VERDE

Dentre os métodos sustentáveis para construção, existem as coberturas verdes, compondo-se, em sua maioria, de camada vegetal acima da última vedação horizontal das edificações (CASTRO; GOLDENFUM, 2008). Elas podem ser “extensivas” (Figura 03 A e B) nas quais os seus substratos são utilizados de 0,02 a 0,20 cm; pesando, em média, de 60 kg/m² até 170 kg/m², caracterizadas por baixa manutenção. Outra forma de classificá-las é como “intensivas”, como ilustrado na Figura 04, nas quais as cargas nas estruturas variam entre 150 e 500 kg/m², com substratos variando de 0,20 a 0,40 cm ou mais, com manutenção mais custosa (VECCHIA, 2016).

Ainda assim, de acordo com Rola (2008), a aplicação de cobertura verde sobre estrutura construída pode ser feita diretamente em uma cobertura de suporte estrutural, e deve possuir, no mínimo: impermeabilizante, manta geotêxtil, drenagem, substrato e vegetação; esse sistema, quando possuir uma carga entre 100 kg/m² e 700 kg/m², poderá comportar vegetações arbustivas de até 01 m de altura e terá uma manutenção média, caracterizada como uma cobertura “semi-intensiva” como ilustra a Figura 05.

Figura 3 - A e B Cobertura Extensiva



Fonte:

<https://noticias.ambientebrasil.com.br/redacao/2019/06/19/152571-telhados-verdes.html>

Fonte:

<https://www.archiexpo.com/pt/prod/urban-scape/product-160267-2053895.html>

Figura 4 - Cobertura Intensiva

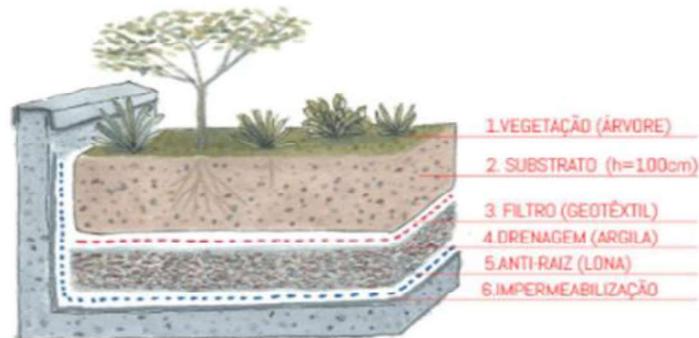
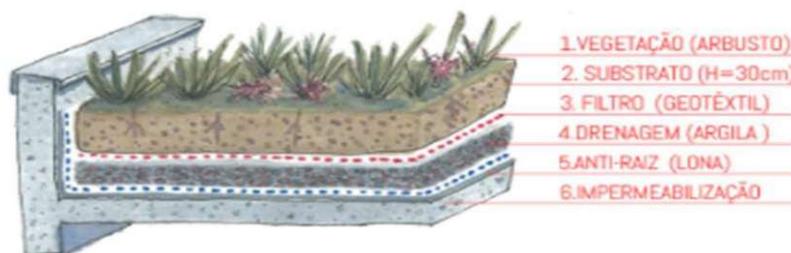


Figura 5 - Cobertura Semi-intensiva

Fonte: SP <https://br.pinterest.com/pin/562809284686177500/>

As coberturas verdes apresentam contribuições ao meio ambiente que favorecem a resiliência dos meios urbanos, a exemplo disso, elas podem retardar o escoamento de águas das chuvas em até 70% para um período de 06 horas de precipitação consecutiva, o que contribui

com a mitigação de pontos de alagamentos (CASTRO; GOLDENFUM, 2008). Ademais, as coberturas verdes evitam que o MP e outros contaminantes fiquem alojados, como nas coberturas convencionais, e escorram com as águas da chuva, contaminando corpos d'água. (HERZOG, 2009).

O uso de coberturas verdes pode ajudar a reduzir até 59% o consumo de recursos energéticos, além de servir como filtro de água pluvial. Também contribui para geração de pequenos ecossistemas urbanos, servindo como habitat para pássaros, insetos e outros animais (STRAPASSON, 2010). Torna-se importante que a redução na emissão de gases e energia seja objetivada e discutida não somente nas etapas de concepção e execução do ambiente construído artificialmente, mas também durante todo o ciclo de vida do seu uso e após, com foco no seu processo de “desconstrução sustentável”, sendo que, nessa ótica, o telhado e as coberturas verdes se enquadram perfeitamente a um ciclo de vida sustentável dos ambientes construídos artificialmente, desde a sua concepção, durante o uso e até o momento em que for necessária sua demolição (STRAPASSON, 2010).

O tema coberturas verdes em cidades altamente urbanizadas é um assunto com fortes possibilidades de exploração devido às atuais mudanças climatológicas e carência de microclimas agradáveis. Em Chicago, nos Estados Unidos da América (EUA), no ano de 1998, foi inaugurado o Millenium Park sobre um pátio de manobras de trens, tornando-se o maior projeto de cobertura verde do mundo com 9,7 hectares com mais de 4 milhões de visitantes por ano, sendo, então, o segundo ponto turístico mais procurado na cidade, (CHICAGO, 2021).

Em São Paulo – SP, coberturas verdes sobre lajes de edificações não são tecnologias novas, pois cita-se, como exemplo, o edifício Matarazzo, construído em 1939, no Viaduto do Chá, que, em 1960, recebeu um jardim no terraço, e o edifício Planalto, concluído em 1957, localizado na Rua Dona Maria Paula, que possui um pequeno gramado na última laje como área de lazer. Construído em 1979 em São Paulo - SP, o Centro Cultural São Paulo (CCSP), localizado na Rua Vergueiro Nº 1000, é um modelo de construção urbana que integra iniciativas verdes e microclimas agradáveis; com aproximados 6.000 m² de cobertura verde, além de grama com captação de água da chuva, abriga hortas comunitárias (CCSP, 2021); as coberturas verdes para substratos de gramas e hortas com 20 cm de altura são consideradas extensivas (VECCHIA, 2016). O CCSP é um espaço com alto fluxo de pessoas, com salas de teatro, auditórios, ateliês, lojas, cafés, espaços de exposições e está ao lado de uma grande avenida, a 23 de Maio, e conectado com a Estação Vergueiro, do Metrô Linha Azul (CCSP, 2021).

2.6 I-TREE CANOPY

O I-TREE CANOPY é um software desenvolvido por pesquisadores dos EUA. Ele tem sido utilizado em pesquisas acadêmicas com foco nos trabalhos do serviço florestal dos Estados Unidos (NOWAK *et al.*, 2014).

De fácil aplicação, permite vários tipos de análises de dados referentes a quanto um trecho arborizado pode contribuir de forma benéfica para o ambiente, usando a base de dados do serviço florestal americano. Uma outra vantagem é o fato de que o software permite que o usuário classifique o tipo de cobertura que está sendo analisada na área estudada: tipo de árvore ou arbusto, tipo de solo, tipo de construção e presença de corpos hídricos, entre outras. As análises podem ser realizadas em avaliações de cenários reais de uso e ocupação do solo ou como forma de simulações computacionais locais (OMODIOR; EZE; ANDERSON, 2021)

O I-TREE CANOPY usa informações do *Google Earth* e interfaces de outros softwares de geoprocessamento. Uma vez estimada a área e o tipo de uso e a ocupação também consegue estimar variáveis como benefícios advindos das coberturas verdes em termos de requalificação do ar e indicadores monetários, associados à melhoria da qualidade ambiental (HIRABAYASHI S, 2014).

Conforme já indicado, via de regra, as áreas urbanas se sobrepõem aos ambientes naturais, trazendo prejuízos à paisagem e à população. Já o aumento de coberturas vegetais é tido como um importante aliado na recuperação do meio ambiente. Portanto, são de grande utilidade ferramentas que permitam estimar o quão positivos serão os impactos com a implantação de empreendimentos sustentáveis, como as coberturas verdes. Surge, daí, a relevância do uso do I-TREE.

Na Irlanda, simulações realizadas no I-TREE – em Belfast e Dublin – indicaram que a cobertura vegetal nas duas cidades era menor que 10%, em relação aos outros tipos de uso e ocupação do solo. Os autores da pesquisa puderam concluir que as poucas áreas verdes não eram suficientes para remover poluentes atmosféricos como CO, NO₂, O₃, PM_{2,5} e PM₁₀ (MILLS *et al.*, 2015). No Brasil, Anjos e Alves (2018) verificaram, por meio da utilização do I-TREE, que um aumento de 9% na quantidade de árvores em Aracajú – SE resultaria na retenção de 16 kg/ano de MP, na região central da cidade.

Na Indonésia, com o intuito de avaliar a confiabilidade das simulações geradas pelo I-TREE, Akhmadi, Puguh, Rahajo (2018) analisaram os tipos de uso e ocupação do solo em áreas pertencentes à Bacia do Rio Pesanggrahan, em Jacarta. Os autores categorizaram as ocupações

do solo em: árvores, gramas, plantas rasteiras, corpos d'águas, telhados e estradas, entre outras categorias de área impermeabilizadas. As estimativas fornecidas pelo I-TREE foram comparadas com as informações disponibilizadas pelo serviço “Mapa de Dados da Terra da Indonésia (RBI)”, para a mesma área de estudo. Não foram observadas diferenças significativas entre as informações geradas pelo I-TREE e pelo RBI.

Portanto, as pesquisas supracitadas evidenciam o quão favorável o uso da Plataforma I-TREE para a gestão de cidades, sobretudo no que se refere à implantação de potenciais projetos sustentáveis que preconizam a infraestrutura verde, como é o caso desta pesquisa.

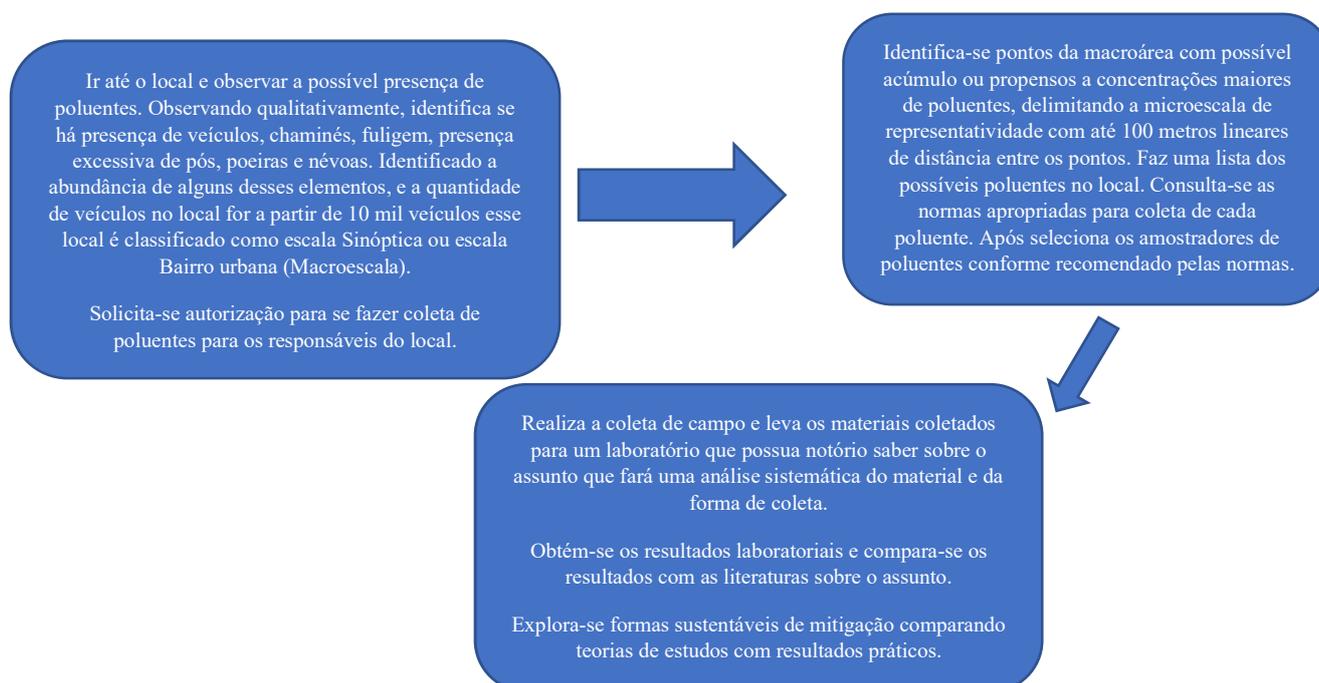
3 MÉTODOS DE PESQUISA

A pesquisa é exploratória e, assim, assume a abordagem qualitativa e quantitativa, conforme etapas indicadas por Ventura (2007):

- (I) Especifica-se os pontos críticos, se estabelece os contatos iniciais com os envolvidos e localiza-se as fontes necessárias ao estudo;
- (II) Delimita-se o estudo, reitera-se o foco do estudo, bem como as estratégias para a coleta de dados, empregando diversos instrumentos;
- (III) Realiza-se a análise sistemática e apresenta-se os resultados do estudo a partir de um movimento de teoria-prática que, na verdade, é recomendado em todas as fases.

O fluxograma a seguir (figura 6), exemplifica as etapas na prática.

Figura 6 - Fluxograma com as etapas da pesquisa



As instituições que dispõem sobre métodos para esta pesquisa são: *Occupational Safety and Health Administration* (OSHA), *Methods for the Determination of Hazardous Substances* (MDHS), *National Institute for Occupational Safety and Health* (NIOSH), Fundação Jorge Duprat Figueiredo (FUNDACENTRO), OMS e CETESB. As atribuições dessas instituições tomadas como parâmetro para este estudo são:

- (I) CETESB – Estabelece e recomenda os limites de tolerância; fornece diretrizes para se delimitar área de estudo, altura de amostradores. Determina como os métodos equivalentes e amostradores podem ser considerados válidos. Além disso, fornece diretrizes para amostragens de grandes volumes e atributos para qualidade do ar, de acordo com os resultados de amostragens;
- (II) OMS – Instituição que apresenta limites de tolerância para poluentes no âmbito internacional, porém, não recomenda métodos de coleta;
- (III) NIOSH – Instituição de saúde estadunidense que regulamenta um dos métodos equivalentes para coleta, análise e seleção de equipamentos para SO₂ e MP_{2,5};
- (IV) MDHS – Instituição estadunidense que regulamenta um dos métodos equivalentes para coleta, análise e seleção de equipamentos para substâncias perigosas do tipo MP₁₀;
- (V) OSHA – Instituição pública estadunidense que regulamenta um dos métodos equivalentes para coleta, análise e seleção de equipamentos para O₃, NO e CO₂;
- (VI) FUNDACENTRO – Instituição pública brasileira que orienta, auxilia e fornece disposições quanto ao uso de métodos internacionais para coletas de poluentes em pequenas escalas.

3.1 ÁREA DE ESTUDO

Com mais de 12 milhões de habitantes, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a frota de veículos na cidade de São Paulo, em 2018, era de 8.295,645, sendo a maior parte motores a combustão de carros, motos, ônibus e caminhões (IBGE 2021). Em 2017, foram realizadas 42 milhões de viagens diárias na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). Cerca de 67% dessas viagens foram realizadas por modos motorizados (coletivo + individual) e 33% por modos não motorizados (bicicleta + a pé) (ODE. METRO, 2019).

Os modos motorizados à combustão são responsáveis por emissões de óxidos de nitrogênio e materiais particulados, carregando, em suas composições, metais pesados,

poluentes atmosféricos que causam danos à saúde humana por serem facilmente inalados (FERREIRA *et al.*, 2013).

Na cidade de São Paulo, existem limites de tolerância para PTS, MP₁₀, MP_{2,5}, O₂, NO₂, NO, SO₂, e CO₂, (CETESB, 2019). Porém, não existem dados que apontam se os limites de tolerância estabelecidos podem assegurar condições salubres para os diversos grupos expostos a esses agentes em uma cidade com pessoas que já possuem doenças pré-existentes, como cardiovasculares, problemas pulmonares, problemas endêmicos por faixa etária, até mesmo pandêmicos, como o Coronavírus, ou questões relacionadas a gênero e faixas etárias (MISSAGIA *et al.*, 2018).

Como recorte desta pesquisa, adotou-se a Avenida Radial Leste (RL). Esta é classificada como uma via arterial que, segundo a companhia de engenharia de tráfego (CET), dá suporte a um intenso fluxo de veículos. A RL permite a conexão linear entre o centro sul da capital paulista com os bairros Brás, Belém, Tatuapé, Penha, Guaianazes, entre outros. Como consequência, observa-se, ao longo da extensão da RL, (25 km), corredores de transporte público denominados Leste 01, Leste 02, Leste 03, bem como estações de metrô e terminais de ônibus (ODE. METRO, 2019).

A Figura 07 apresenta a vista aérea da estação Tatuapé que coexiste com a RL, com a linha de trem da Companhia Paulista de Trens Metropolitanos (CPTM) e a rua Catiguá, local de intenso fluxo de veículos automotores e pessoas. Atualmente, a Estação Tatuapé possui 34.680 m² de área construída, dos quais 25.000m² são de telhados e coberturas, com potencial para serem utilizadas para infraestrutura verde.

Figura 7 - Vista aérea da estação Tatuapé



Fonte: Google Earth

A Figura 08 apresenta a vista em nível do solo do Terminal Sul da estação Tatuapé, local com fluxo de ônibus movidos a diesel, na rua Catiguá. A Figura 09 apresenta a vista em nível do solo o terminal Norte da estação Tatuapé, evidenciando a RL no seu contexto, local com maior influência e maior fluxo de veículos automotores, sobretudo, gasolina e diesel.

Figura 8 - Terminal Sul Tatuapé



Figura 9 - Terminal Norte Tatuapé



Fonte: Próprio autor

A Figura 10 apresenta telhados e coberturas com potencial para serem utilizadas para infraestrutura verde.

Figura 10 - Cobertura da estação Tatuapé com terminais Norte e Sul



Local com possibilidade de implantação de infraestrutura verde 25.000m² (vermelho em destaque)

Fonte: Google Earth

3.2 TRABALHO DE CAMPO

Dentre os métodos recomendados para monitoramento da qualidade do ar, os Métodos Equivalentes e de Referência são métodos aceitos como válidos pelo Guia Técnico de Monitoramento da Qualidade do Ar – GTMQAr (CETESB, 2019). O GTMQAr contém as disposições e métodos da CETESB referentes a qualidade do ar e apresentam os seguintes elementos: MP₁₀, MP_{2,5}, O₃, SO₂, NO₂ e CO como base para avaliação.

Os Métodos de Referência disponibilizados pelo GTMQAr, como o próprio nome já indica, servem para verificar e orientar quando haver alguma incipiência dos métodos equivalentes. Nos Métodos de Referência, normalmente, são utilizados equipamentos de grande porte. Os Métodos Equivalentes são os mais utilizados internacionalmente, pois apresentam custos mais acessíveis e, comumente, utilizam aparelhos portáteis para a medição (CETESB, 2019).

Para se chegar a resultados aceitáveis, os equipamentos utilizados devem possuir calibração por instituição de notório saber referente ao tema. Os Métodos de Referência e os Métodos Equivalentes seguem padrões internacionais (CETESB, 2019).

As medições realizadas em um perímetro de até 100 metros são consideradas “microescalas” de representatividade; as medições realizadas em perímetros de 100 a 500 metros são consideradas “escala média” de representatividade; a “microescala” e a “escala média” são as mais indicadas quando o objetivo da medição é entender a intensidade das concentrações dos poluentes, principalmente quando as fontes emissoras são veículos ou fontes fixas difusas (GTMQAr 2019). Portanto, são bastante apropriadas para locais onde há permanência de pessoas expostas por algum tempo aos agentes contaminantes. Os resultados obtidos em “microescala” e/ou “escala média”, a partir dos protocolos supracitados, são de relevância, pois se traduzem em informações confiáveis sobre a qualidade do ar e, portanto, podem servir de suporte às políticas públicas ambientais (CETESB, 2019).

É recomendável considerar, para qualquer medição de qualidade do ar, os seguintes pontos: cadastro com a localização geográfica das fontes, inventário sobre as emissões, dados meteorológicos, umidade relativa do ar e velocidade dos ventos, identificação do tipo de relevo e topografia, tipo de uso e ocupação do solo (GTMQAr 2019). Eventualmente, se alguns critérios previstos no GTMQAr não forem atendidos, deverá haver um justificativa técnica explicando o motivo em relatório técnico após o término dos trabalhos (CETESB, 2019).

Durante a medição, deve-se levar em consideração se a emissão de poluentes no local é próxima à presença de pessoas; isto é, à zona respiratória (ou longe). Quanto ao posicionamento das estações portáteis, observa-se a altura correta, se há interferências físicas ao monitoramento e condições meteorológicas adversas em locais a céu aberto (CETESB, 2019). Para cada tipo de poluente, deve-se adotar uma altura de posicionamento de sonda, conforme indicado na Tabela 11.

Tabela 11- Altimetria para fixação de amostradores

Poluente	Escala de Representatividade	Altura de amostragem (m)	Distância de árvores (m)	Distância de obstáculos (m)
CO	Micro	2 a 3,5	> 10	O dobro da altura do obstáculo acima da sonda amostradora.
	Demais escalas	2 a 5		
SO ₂	Todas as escalas	2 a 5		
O ₃				
NO ₂				
MP ₁₀ /MP _{2,5}				

Fonte: Guia de avaliação de qualidade do ar CETESB, 2019

O Método de Equivalente, gravimétrico (utilizado neste estudo), para medição de partículas, será considerado o mais preciso, porém, não pode ser usado após o local ter passado por um evento com grande levante de poeira. Para se obter micro representação mais precisa com este método, as medições de MP devem ocorrer em três períodos diferentes: manhã, meio-dia e fim de tarde, por volta das 18h. (CETESB, 2019).

O O₃, por se tratar de um poluente secundário, deverá ser medido em locais afastados das vias de tráfego, pois é produto de reações químicas entre poluentes primários emitidos, sobretudo em processos de combustão. A Tabela 12 indica a distância mínima recomendada para as medições de O₃, considerando o número de veículos na via (CETESB, 2019).

Tabela 12 - Distância x quantidade de veículos para coleta de O₃

Número médio de veículos/dia na	Escala de bairro ou urbana
---------------------------------	----------------------------

Via principal	Distância mínima (m)
10.000	10
15.000	20
20.000	30
40.000	50
70.000	100
> 110.000	250

Fonte: Guia de avaliação de qualidade do ar CETESB, 2019

Para cada poluente medido, deve-se observar o índice de referência, conforme indicado na Tabela 13, em que se observa que cada índice representa o *status* de qualidade do ar, sendo que, em verde, o ar é considerado de boa qualidade e na cor roxa, como de péssima qualidade. No Quadro 03 são indicados os potenciais efeitos adversos para cada categoria de qualidade do ar.

Tabela 13 - Atributos e descrição do Índice de Qualidade do Ar (IQA_r)

Qualidade do Ar	Índice	MP ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 24h	MP _{2,5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 24h	O ₃ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 8h	CO (ppm) 8h	NO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 1h	SO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 24h
N1 – Boa	0 – 40	0 - 50	0 - 25	0 - 100	0 - 9	0 - 200	0 - 20
N2 – Moderada	41 – 80	>50 - 100	>25 - 50	>100 - 130	>9 - 11	>200 - 240	>20 - 40
N3 – Ruim	81 – 120	>100 - 150	>50 - 75	>130 - 160	>11 - 13	>240 - 320	>40 - 365
N4 – Muito ruim	121 – 200	>150 - 250	>75 - 125	>160 - 200	>13 - 15	>320 - 1130	>365 - 800
N5 - Péssima	201 - 400	>250 - 600	>125 - 300	>200 - 800	>15 - 50	>1130 - 3750	>800 - 2620

Fonte: Guia de avaliação de qualidade do ar CETESB

Quadro 3 - Relação entre valor do IQA_r e possíveis efeitos à vida

Índice	Danos adversos e possíveis efeitos a saúde humana
0 - 40	-
41 - 80	Pessoas de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas) podem apresentar sintomas como: tosse seca e cansaço. A população em geral não é afetada.

81 - 120	Toda a população pode apresentar sintomas como: tosse seca, cansaço, ardor nos olhos, nariz e garganta. Pessoas de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas) podem apresentar efeitos mais sérios na saúde.
121 - 200	Toda a população pode apresentar agravamento dos sintomas como: tosse seca, cansaço, ardor nos olhos, nariz, garganta e ainda falta de ar e respiração ofegante. Efeitos ainda mais graves à saúde de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas).
>200	Toda a população pode apresentar sérios riscos de manifestações de doenças respiratórias e cardiovasculares. Aumento de mortes prematuras em pessoas de grupos sensíveis.

Fonte: Guia de avaliação de qualidade do ar CETESB

3.3 COLETA DE MP

Foram utilizados para MP_{10} amostradores de fibra de vidro de - $1,0\mu\text{g}$ pré-pesado (Figura 13, destaque em vermelho) - montado com suporte IOM (que possui o mesmo nome da instituição que o criou) e para sucção do ar, bomba gravimétrica Gilian N° 201 112 03 096 (Figura 14 B), ajustada para vazão de $0,2 \text{ L min}^{-1}$, conforme norma MDHS 14/4 MA-003 (2014). As figuras 11 e 12 apresentam o local de coleta e a Tabela 14 apresenta as condições relevantes para a coleta no dia.

A coleta de MP_{10} foi dividida em 03 etapas para se evitar a saturação do amostrador IOM. Para tanto, as coletas foram interrompidas a cada 08 horas para troca do amostrador. O início se deu às 10:00 h do dia 23/06/2021 até as 10:00 h do dia 24/06/21, cobrindo-se, assim, a duração de 24 h, como recomendado pela CETESB (2019).

Durante a obtenção de dado sobre velocidade do vento e umidade relativa do ar, não foram observados suspensão de poeiras por fatores externos.

Tabela 14 – Condições relevantes para coleta

Data	Horário/período	Umidade relativa do ar (%)	Velocidade do ar (m/s)	Altura dos amostradores (M)
23/06/2021	10:00 às 16:00	47	36,2	05
23/06/2021	16:00 às 17:40	50	62,2	05
24/06/2021	24:00 às 01:00	69	36,2	05
24/06/2021	01:00 às 07:00	94	36,2	05



Fonte: Próprio autor

A Figura 13 (destaque em vermelho) apresenta também a correta montagem do amostrador IOM, indicando o diâmetro menor para parte externa do suporte. A montagem invertida do IOM leva a resultados falsos. As bombas gravimétricas Gilian (Figura 14) são aceitas pelas normas internacionais como dispositivos confiáveis desde que devem ser corretamente calibrados para medições gravimétricas.

Figura 11 - Local da coleta



Figura 12 - Local da coleta (Noturno)



Fonte: Próprio autor

Figura 13 - Montagem do amostrador no suporte IOM

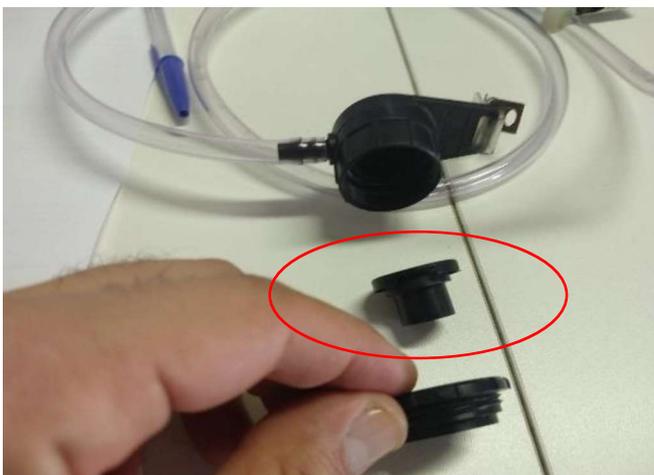
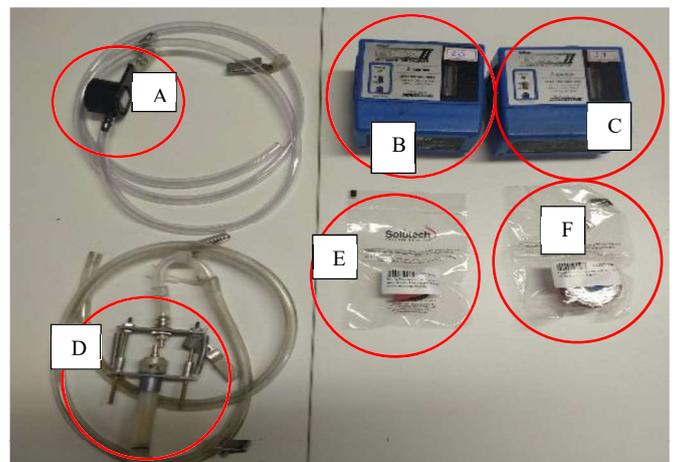


Figura 14 - Bombas e amostradores



Da esquerda para direita de cima para baixo: (A) suporte para IOM, (B e C) bombas gravimétricas Gilian, (D) ciclone de nylon, (E) amostrador IOM, (F) K7 de duas seções com filtro PVC. Fonte: Próprio autor

Para coletar o $MP_{2,5}$ utilizou-se o amostrador K7 de duas seções, com filtro de PVC de 5,0 μg pré-pesado (Figura 14 letra F) em suporte tipo Ciclone de Nylon (Figura 14 letra D). Para sucção do ar, a bomba gravimétrica (Gilian nº2007 040 2071) (Figura 14 letra C) foi ajustada para vazão de 1,7 L min^{-1} , conforme NIOSH 0600 MA-003, (1998). A montagem completa do conjunto K7 Ciclone e bomba é apresentada na Figura 15.

Para se fazer a coleta de $MP_{2,5}$ particulado respirável, esta foi dividida em 06 etapas para se evitar a saturação do K7, sendo as coletas interrompidas a cada 04 horas para troca do amostrador, coletando-se das 10:00 h do dia 23/06/21 às 10:00 h do dia 24/06/21, cobrindo-se, assim, uma jornada de 24 h, como recomendado pela CETESB.

A Figura 16 mostra que o local da coleta possui intenso fluxo de ônibus e conforme observado *in loco*, todos movidos a biodiesel. As condições relevantes para coleta foram as mesmas apresentadas na Tabela 14.

Figura 15 - Bomba e acessório



Figura 16 - Local da coleta (em vermelho)



K7 duas seções montado no ciclone de nylon, acoplado na bomba gravimétrica Gilian, para medição de $MP_{2,5}$.

Fonte: Próprio autor

3.4 COLETA DE O_3

Para se fazer a coleta de O_3 (CAS: 10028-15-6), foram utilizados dois amostradores K7, com 02 filtros de fibra de vidro com porosidade de 1mm, impregnados com Nitrito de Sódio (Figura 17 letra A). Para sucção do ar, foi utilizada bomba gravimétrica Gilian Nº 2006 040 20 65 ajustada para vazão de 0,25 L min^{-1} , conforme norma MA-91 OSHA ID 214 (2014) (Figura 17 letra B).

A coleta de O_3 foi dividida em duas etapas para se evitar a saturação do K7, sendo uma coleta das 10:00 h às 14:00 h e outra das 14:10 h às 18:10 h do dia 18/06/2021, cobrindo-se,

assim, uma jornada de 08 h, como recomendado pela CETESB, respeitando a premissa de se cobrir horários da manhã do meio-dia e até as 18:00 h. A Tabela 15 apresenta as condições relevantes para a coleta no dia.

Tabela 15 - Condições relevantes para coleta

Data	Horário/período	Umidade relativa do ar (%)	Velocidade do ar (m/s)	Altura dos amostradores (M)
18/06/2021	10:00 às 14:00	63	27,00	05
18/06/2021	14:00 às 18:10	63	27,00	05

Fonte: próprio autor

Figura 17 - Local de coleta de O₃

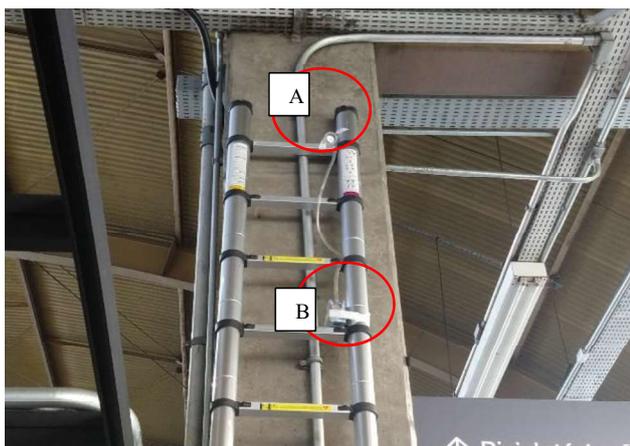


Figura 18 - Amostrador



A) amostrador K7; (B) Bomba Gilian

Fonte: Próprio autor

A Figura 18 apresenta a correta montagem do conjunto K7 e porta K7. Na Figura 18, pode-se observar a tampa azul virada no sentido oposto a mangueira, garantindo a coleta pelo lado correto do amostrador, conforme MA-09 OSHA ID 214 (2014), evitando resultados não confiáveis.

3.5 COLETA DE SO₂

Para se fazer a coleta de SO₂ (CAS: 7446-09-5) foram utilizados 04 amostradores cassete (K7), com filtro éster de celulose de 0,8 μ e suporte de celulose tratado com carbonato

de sódio sobre suporte de plástico poroso. Para a sucção de ar, a bomba gravimétrica Gilian N° 2007 040 2071 ajustada para vazão de $0,5 \text{ L min}^{-1}$, conforme NIOSH 6004 MA-94 (1994).

A coleta de SO_2 foi dividida em 04 etapas para se evitar a saturação do K7, sendo as coletas interrompidas a cada 06 horas para troca do amostrador, coletando-se das 08:40am do dia 02/07/21 às 08:40 h do dia 03/07/21 h cobrindo-se, assim, uma jornada de 24 h, como recomendado pela CETESB. A Figura 19 mostra o local onde a coleta foi realizada e as condições relevantes são apresentadas na Tabela 16.

Tabela 16- Condições relevantes para coleta

Data	Horário/período	Umidade relativa do ar (%)	Velocidade do ar (m/s)	Altura dos amostradores (M)
02/07/2021	08:40 às 14:40	34,40	26,5	4,5
02/07/2021	14:40 às 20:40	34,40 - 73	26,5	4,5
02/07/2021	20:40 às 02:40	90	26,5	4,5
03/07/2021	02:40 às 08:40	70	26,5	4,5

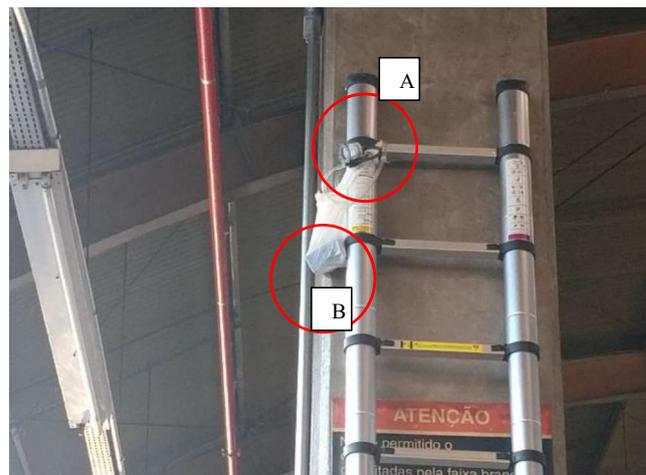
Fonte: Próprio autor

A Figura 20 letra A mostra o posicionamento do K7 longe de interferências ou obstruções, seguido logo abaixo pela bomba Gilian (Figura 20 letra B).

Figura 19 - Posicionamento da coleta



Figura 20 - Coleta de Dióxido de enxofre



(A) amostrador K7, (B) Bomba Gilian K7

Fonte: próprio autor

3.6 COLETA DE NO₂ E NO

Para se fazer a coleta de NO₂ (CAS: 10102-44-0) e NO (CAS 10102-43-9), foi utilizado 01 amostrador tubo de peneira molecular de 400mg tratado com Trietilamina (TEA), seguido de um tubo oxidante, somado a um tubo de peneira molecular de 600mg tratado com TEA, ligados em série do tipo SKC 226-40 (Figura 21); bomba gravimétrica para sucção do ar (Gilian N° 201 112 03 096) ajustada para vazão de 0,1 L minu⁻¹. Também foram respeitadas a refrigeração para transporte e armazenamento com isopor e bolsa de gelo artificial, garantindo a estabilidade do agente no amostrador conforme OSHA ID 190 / ID 182 (1991) (Figura 22).

A coleta de NO₂ e NO foi realizada em apenas 01 etapa, coletando-se das 14:30pm do dia 25/06/21 às 15:30, cobrindo-se, assim, uma jornada de 01 hora, como recomendado pela CETESB. O local da coleta é representado na Figura 23 cujas condições relevantes para o estudo são apresentadas na Tabela 17.

Tabela 17- Condições relevantes para coleta

Data	Horário/período	Umidade relativa do ar (%)	Velocidade do ar (m/s)	Altura dos amostradores (M)
25/06/2021	14:30 às 15:30	50,3	28	4,5

Fonte: Próprio autor

Figura 21 - Armazenagem refrigerada



Figura 22 - Ligação em série dos amostradores



Fonte: Próprio autor

Figura 23 - Local da coleta



Destaque em vermelho amostrador em tubo. Bolsa preta (suporte bomba Gilian)

Fonte: Próprio autor

3.7 COLETA DE CO E CO₂

Utilizou-se o amostrador tipo Balão de Tedlar de 5 L, como indica a Figura 24, com bomba gravimétrica (Gilian N° 20214 050 40 64) ajustada para vazão de 0,01L/min para sucção de ar, conforme MA-031 OSHA ID 210 (1991)/ MA-32 OSHA ID 172 (1990). Os amostradores ficaram posicionados em local sem obstruções, como aponta a Figura 25. Condições relevantes para coleta estão representadas na Tabela 18.

A coleta de CO (CAS: 630-08-0) e CO₂ (CAS: 124-38-9) foi realizada em 2 etapas. A primeira etapa foi realizada a partir das 10:00 h até às 14:00 h e a 2ª das 14:00 h às 18:00 h do dia 25/06/2021, cobrindo-se, assim, uma jornada de 08 h, como recomendado pela CETESB, respeitando a premissa de se cobrir horários da manhã do meio-dia e até às 18:00 h.

Tabela 18 – Condições relevantes para coleta

Data	Horário/período	Umidade relativa do ar (%)	Velocidade do ar (m/s)	Altura dos amostradores (M)
25/06/2021	10:00 às 14:00	50,3	28	4,5
25/06/2021	14:00 às 18:00	50,3	28	4,5

Fonte: Próprio autor

Figura 24 - Coleta de Monóxido e Dióxido de carbono



(A) entrada de ar, (B) Balão de Tedlar

Fonte: Próprio autor

Figura 25 - Coleta de Monóxido e Dióxido de carbono



Fonte: Próprio autor

O controle da correta altura para posicionamento dos amostradores foi feito com escada telescópica de alumínio Nagano, com extensão máxima de 5,80 m e capacidade de carga de 150 kg, conforme Figura 26.

Figura 26 - Escada telescópica de alumínio Nagano



Fonte: Próprio autor

O controle e monitoramento da velocidade dos ventos e umidade relativa do ar para todas as coletas foi feito com o equipamento THAL 300 (Termohigroanemometroluxímetro) Nº Q921035, da marca Instruterm.

3.8 ESTIMATIVA DE BENEFÍCIOS COM COBERTURA VERDE

Para se fazer uma simulação e obter dados e resultados relacionados quanto aos benefícios do uso de infraestrutura verde sobre a cobertura da estação CPTM Tatuapé, foi utilizado a plataforma I-TREE CANOPY, ajustada para arbustos, em conjunto com imagens do Google Earth. Este experimento não utilizou simulações com árvores.

Com esse recurso, foi importada uma imagem da estação CPTM Tatuapé e seus terminais em anexo a partir do Google Earth para o I-TREE CANOPY, sendo delimitada uma área de 25.000m² referente a cobertura da estação CPTM, somada às coberturas dos terminais Norte e Sul do Tatuapé; após a delimitação da área, foram informados ao programa a existência de arbustos e locais impermeáveis, obtendo-se um total de 676 pontos, sendo que destes, 672 pontos foram classificados como arbustos, e outros 04 pontos, por sua vez, foram classificados como impermeáveis. Posteriormente, solicitou-se ao software o processamento de dados e resultados.

Basicamente, operou-se a partir de 05 etapas (Figura 27), sendo necessário, na primeira, importar um arquivo geoprocessado, que determina a área de análise, por exemplo: parque, cidade ou praça. Na sequência, foi necessário demarcar a área de estudo, nomear as classes de cobertura existentes na imagem para que o programa diferenciasse a grama de árvore, de

construção, dentre outras que puderam facilmente ser agregadas, conforme necessidade do usuário do software, após isso, foi feita a classificação dos pontos coletados na imagem, cujo usuário identifica na imagem o significado de cada ponto gerado pelo software e por último o processamento de dados (<https://canopy.itreetools.org>, 2021).

Em outras palavras, o programa com auxílio das informações colocadas pelo usuário, faz uma interpretação da imagem de geoprocessamento, com uma base de dados estatísticos sobre coberturas verdes, que pode ser a base de dados do serviço florestal americano. No final do processo o I-Tree Canopy gera relatórios que apresentaram benefícios relacionados a sequestro e estoque de carbono nos arbustos, remoção de poluentes, benefícios monetários e hidrológicos.

A Figura 27 a seguir apresenta um fluxograma prático das etapas de uso do I-tree Canopy.

Figura 27 - Fluxograma do uso I-TREE CANOPY

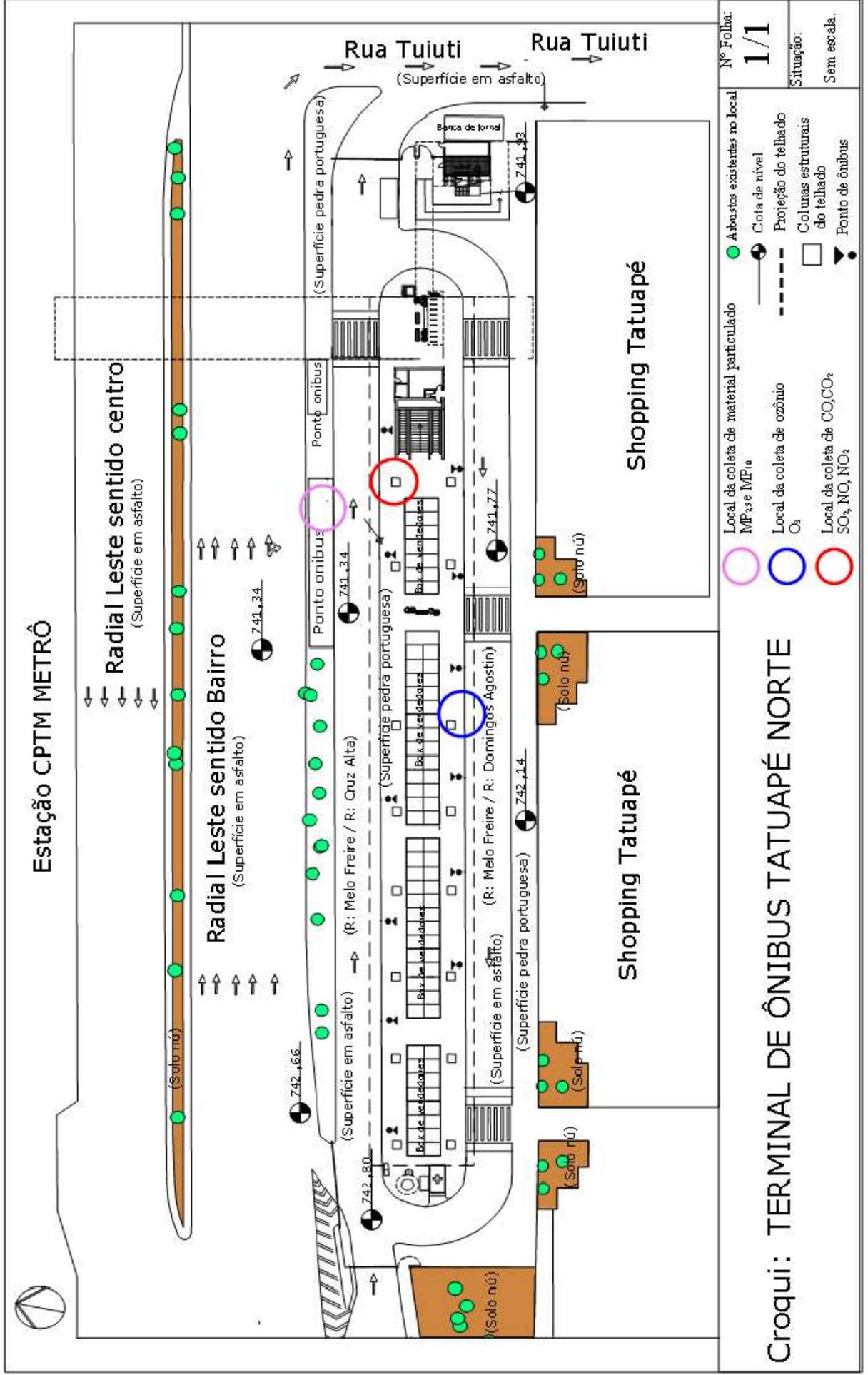


4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A observação qualitativa do local levou às seguintes características: ambiente de topografia praticamente plano, com poucas variações de nível, cobertura do solo predominantemente de asfalto, com parcelas em concreto e pedra portuguesa, no geral, com baixa permeabilidade; em alguns poucos pontos, há grama, árvores e arbustos.

O local avaliado é predominante urbano, sobretudo ocupado por veículos em trânsito, estacionados, comércio fixo e ambulante. Quanto às edificações e o entorno, o local é caracterizado por estruturas de concreto armado e metálicas. As características da área estudada favorecem o acúmulo de poluição dada a presença de fuligem preta nas superfícies das estruturas e objetos. A Figura 28 elucida uma peça gráfica do local.

Figura 28 - Planta baixa com representação do locais de coleta de poluentes



Esta pesquisa se limitou a observar, quantificar e discutir os principais poluentes tabelados pela CETESB e OMS sendo: MP₁₀, MP_{2,5} e O₃, CO, NO₂, SO₂, CO₂ categorizados com CO_{2eq}.

4.1 AMOSTRAS DE MP.

O material particulado como o carbono está entre os temas mais discutidos no mundo, tratando-se de poluição atmosférica. Dividido entre MP₁₀ e MP_{2,5} em função do tamanho da partícula, representam frações inaláveis e respiráveis, cuja fração MP₁₀ inalável se aloja nas regiões de nariz e boca e a fração respirável MP_{2,5}, alcançando penetração além dos brônquios. Os MP, que sedimentam no trato respiratório, em sua composição, apresentam uma variedade de elementos e substâncias químicas potencialmente tóxicas (FUNDACENTRO, 2015).

Na Tabela 19 apresentam-se as concentrações de MP₁₀, enquanto a Tabela 20 demonstra as concentrações de MP_{2,5}.

Tabela 19 - Concentrações de MP₁₀

Horários	MP ₁₀ (µg/m ³) (Inalável) Presentes no estudo	Índice CETESB 24h (µg/m ³)	Classificação CETESB (µg/m ³)	IQAr. X saúde CETESB	Índice OMS 24h (µg/m ³)
10:00h às 18:00h	554	NI	NI	NI	NI
18:00h às 02:00h	667				
02:00h às 10:00h	177				
Total 24 h.	1.398	0-50	N5- Péssima	≥ 250 Toda população em risco de doenças respiratórias e cardiovasculares; aumento de morte prematura de grupos sensíveis.	0-50

Fonte: Próprio autor com base na CETESB 2019. NI = Não informado

Tabela 20 - Concentrações de MP_{2,5}

Horários	MP _{2,5} (µg/m ³) (respirável) Presentes no estudo	Índice CETESB 24h (µg/m ³)	Classificação CETESB (µg/m ³)	IQA. X saúde CETESB	Índice OMS 24h (µg/m ³)
10:00h às 14:00h	83	NI	NI	NI	NI
14:00h às 18:00h	54				
18:00h às 22:00h	113				
22:00h às 02:00h	51				
02:00h às 06:00h	51				
06:00h às 10:00h	51				
Total 24 h.	403	0-25	N5- Péssima	≥ 250 Toda população em risco de doenças respiratórias e cardiovasculares; aumento de morte prematura de grupos sensíveis.	0-25

Fonte: Próprio autor com base na CETESB 2019. NI = Não informado

Devido ao método utilizado para MP₁₀ indicar necessidade de troca do IOM para não saturar o amostrador, bem como a metodologia utilizada para coleta de MP_{2,5} também indica a necessidade de troca do K7 para evitar a saturação e a CETESB indica variantes de concentração nos horários. Optou-se por realizar a divisão das 24 horas em três períodos principais, ou seja, das 10h às 18 h, das 18 às 2 h e das 2 às 10 horas para medição de MP₁₀ e em seis períodos para MP_{2,5}, como apresentado na primeira coluna da tabela 20, também cobrindo 24h.

O estudo de Cardoso *et. al.* (2014) corrobora com a diferença de concentração por horário, cobrindo, também, uma jornada de 24 horas de coleta, porém, o estudo, considera uma divisão ideal com uma coleta a cada 05 dias e pode ser apoiada com amostrador de grandes volumes para se evitar a saturação do IOM. O estudo de Lui *et al.* (2019) utilizou do mesmo método para coleta, porém, considerou apenas 24 horas.

Na Tabela 19, onde se apresentam as concentrações de MP₁₀, observa-se que houve diferença especialmente entre o período das 02:00 h às 10:00 h.

Considera-se, pois, que nesse período o fluxo de pessoas e veículos é relativamente menor que nos demais horários, e a umidade relativa do ar também é maior, saindo de 47% de umidade durante o dia, para 94,4% durante a madrugada, o que sugere, pois, uma menor concentração, devido uma menor atividade antrópica, sob a ocorrência dos MP no local durante esse período. De modo similar, as variações de teores dos MP_{2,5} também sofreram sazonalidades, sendo que nos períodos de manhã e tarde houve maior acúmulo e nos períodos da madrugada menor ocorrência, praticamente estagnando os teores, como apresentado na Tabela 20.

Quando se observa a segunda coluna de ambas as Tabelas, nota-se diferenças entre as concentrações médias de MP₁₀ e MP_{2,5} em horários semelhantes de coleta. Essas diferenças também se dão pelo fato da existência de uma grande quantidade de emissões de MP_{2,5} no local de origem de combustível diesel e gasolina, fluidos que se aglutinam com outros particulados, provenientes de frenagens, embreagens e poeiras totais, o que aumenta o tamanho da partícula, pois ocasiona-se uma maior taxa de MP₁₀, além de os MP_{2,5} serem dispersos com maior facilidade pela ação dos ventos (FILAYNSON-PITTS & PITTS 2000).

Ainda em referência aos MP, conforme já mencionado, trata-se de partículas nas quais está presente uma variedade de compostos que reagem de forma diferente entre si e com o ambiente, como os metais pesados e o CN; este possui aspecto parecido com fuligem e baixa solubilidade, precipitando-se nas superfícies (MA; BIRMILI, 2015). Em áreas com intensa movimentação veicular, a presença de CN é facilmente verificada de forma qualitativa pela deposição do material nas estruturas e objetos, o que ocorre no Terminal do Tatuapé.

Devido à baixa solubilidade do CN mais presente nos MP_{2,5} ele não se dissolve em períodos de alta umidade, de modo que é empurrado pelas gotículas de água presentes na umidade, tornando-o mais denso e propelido pela brisa sendo fixado e alojado na superfícies das estruturas (grudando) e, quando seca, cria uma crosta como fuligem com característica escura.

Além disso, uma vez que as concentrações de MP₁₀ superaram os valores de referência em quase 28 vezes e MP_{2,5} superaram os valores de referências em mais de 16 vezes, pode-se deduzir que os teores de CN, nos locais de coleta, também sejam preocupantes, pois, de acordo com van Den Hove *et al.* (2020), as emissões veiculares, principalmente de veículos a diesel, contribuem, em média, com incremento de 19% nos teores de CN para a atmosfera. Segundo Ozdemir *et al.* (2014), o CN consegue adsorver em sua área superficial uma ampla gama de

substâncias tóxicas; portanto, alternativas que viabilizem o “armadilhamento” dos MP em ambientes internos e externos, como os dos terminais urbanos, são imprescindíveis.

Logo, os diferentes resultados sugerem diferentes composições dos MP relacionadas à forma como os MP reagem com os demais fatores físico-químicos do ambiente avaliado, exemplo: poeiras vegetais podem perder facilmente a sua massa, diminuindo, também, de diâmetro, devido ao atrito ou ação de ventos, enquanto poeiras grossas, como pelos de animais, podem aglutinar em si uma certa quantidade de outros particulados menores. Outro aspecto a se levar em conta é que, principalmente nos particulados de ligas metálicas, devido o atrito com os ventos ou outras superfícies, pode-se acumular energia estática, atraindo, para si, outros compostos, mudando a morfologia e a composição do particulado em questão.

Como apresentado na Tabela 20, entre os horários das 18h às 22h, houve um pico de $MP_{2,5}$ sendo que, no mesmo período, houve uma diminuição na velocidade relativa do ar de 62,2 m/s para 25,3 m/s, levando ao entendimento que este particulado exerce influência direta relacionada a velocidade do ar, indo ao encontro dos estudos de Filaynsonn-Pitts e Pitts (2000).

Todo esse contexto ocorre devido ao fato de o local avaliado possuir diferentes fontes de emissão de diferentes tipos de particulados, fontes naturais como pólen de flores e fontes de emissão antrópica.

No entanto, somando as concentrações no período de 24 horas, atingiu-se o total de $1.398\mu\text{g}/\text{m}^3$ (MP_{10}) e um total de $403\mu\text{g}/\text{m}^3$ ($MP_{2,5}$), valores superiores aos limites recomendados pela CETESB/OMS (0-50 MP_{10}) e (0-25 $MP_{2,5}$), conforme demonstrado nas Tabelas 19 e 20. Nota-se que, nas recomendações da CETESB e OMS, calcula-se a partir do acumulado de 24 horas, sem fazer distinção de intervalos intermitentes.

Já por meio deste estudo, foi possível observar variações em períodos distintos. Em nenhum dos períodos, mesmo o de menor concentração (das 2:00 h às 10:00 h) para MP_{10} e (das 22:00 h às 10:00 h) para $MP_{2,5}$, a concentração ficou igual ou inferior do recomendado pela CETESB/OMS. A compreensão dos diferentes teores em diferentes horários viabiliza um melhor entendimento sobre o agente, pois as condições ambientais possuem variações significativas, variações que apresentam dados a salubridade do ar na cidade em diferentes horários.

Portanto, as concentrações de MP_{10} acima de $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ e as concentrações de $MP_{2,5}$ acima de $25\mu\text{g}/\text{m}^3$ são consideradas de categoria N5-Péssima, conforme IQAr-CETESB e ambos resultados apresentam riscos à saúde, conforme IQAr-CETESB.

Wang *et al.* (2013), no seu estudo, analisaram 113 cidades chinesas e identificaram uma redução na expectativa de vida de 2,13 anos. Analisaram dados de 2003, quando o acumulado de MP₁₀ ficou em 125,3 µg/m³ ano e houve uma redução de 1,3 anos. Os autores tiveram como base os dados de 2010, quando o acumulado de MP₁₀ ficou em 88,3 µg/m³ ano.

O lançamento descontrolado de MP na atmosfera influencia diretamente nas temperaturas locais, ao passo que as cidades acabam criando seu próprio campo climático (BARROS, LOMBARDO 2016), o que talvez não ocorreria em uma área urbanizada, pois haveria uma grande oferta de telhados e coberturas verdes que poderiam sequestrar esse carbono lançado na atmosfera.

Atualmente, o CN não é contado na métrica dos carbonos equivalentes em função de ser um material particulado e não um gás com potencial de aquecimento global, mas, devido à capacidade de acumular radiação e aquecer as superfícies onde se estabelece por longo prazo, é de merecida importância estudos que possam avaliar o seu potencial de aquecimento global (HERNÁNDEZ, 2016).

4.2 AMOSTRA DE O₃

Dentre os poluentes estudados neste trabalho, o O₃ tem sua repercussão e interesse elevado no mundo científico, além de ser um agente químico de monitoramento recomendado pela CETESB e OMS. Concentrações elevadas deste agente podem causar tosse, dificuldade para respirar, morte prematura e manifestações de doenças cardiovasculares (IQAr-CETESB 2019). Todavia, a eliminação excessiva desse elemento pode causar danos irreparáveis a vida. Logo, o manutenção dos níveis naturais de O₃ é o que se espera. O O₃ é um poluente secundário, pois acredita-se que os seus teores tendem a ser mais elevados longe das fontes emissoras de percursores desse elemento.

A Tabela 21 apresenta os resultados das coletas de O₃. Com base nos achados, pode-se observar que, entre as 10h e as 14h, houve um maior acúmulo de O₃ no local coletado, sendo um total de 46 µg/m³, mais da metade do total coletado em oito horas. Silva e Evasso (2017) encontraram em seu estudo sobre O₃ em São Paulo -SP e Guarulhos diferentes concentrações na troposfera de O₃, considerando condições distintas de intensidade solar, cujos períodos com maior intensidade de sol obtiveram os níveis são mais elevados; aspectos esses que vão ao encontro dos achados, visto que, das 14:00 h às 18:00 h, os teores de O₃ caíram, coincidindo com horários de diminuição da intensidade de luz solar no terminal Tatuapé Norte.

Tabela 21 - Concentração de Ozônio

Horários	Concentração O ₃ (µg/m ³) Presentes no estudo	Índice CETESB 08h (µg/m ³)	Classificação CETESB (µg/m ³)	IQAr. X saúde CETESB	Índice OMS 08h (µg/m ³)
10:00h às 14:00h	46	NI	NI	NI	NI
14:00h às 18:00h	13				
Total 08 h.	59	0-100	N1- Boa	Sem efeitos a saúde	0-100

Fonte: Próprio autor com base na CETESB 2019. NI = Não informado

Os resultados totais de O₃ nesta pesquisa para um período de 08:00 h foram de 59 µg/m³, como aponta a Tabela 21, estão ligados às variações de teores de O₃. Foram identificados com números semelhantes aos achados desta pesquisa sendo entre 40 e 60 µg/m³ na região metropolitana norte de São Paulo- SP e em regiões de Guarulhos entre 20 e 40 µg/m³. Porém, os estudos foram realizados em condições muito diferentes, pois Silva e Evasso (2017) se basearam em análises em macro escala para a análise das emissões na troposfera (aproximados 15 a 20 km de altura) e este estudo se baseou em microescala de representação, a 5 m altura (camadas mais baixas da atmosfera), considerando apenas uma coluna do terminal Norte Tatuapé.

A proximidade nos valores das amostras dos dois estudos se dá em função do acúmulo de gases precursores de O₃ debaixo do telhado do terminal, em conjunto com a grande oferta de radiação solar pela manhã na zona de emissão dos precursores, o que viabiliza a formação do O₃, que é um produto secundário proveniente da interação de gases primários, sobretudo os hidrocarbonetos advindos de combustão veicular.

Outro fator importante é que os teores mais elevados de O₃, sendo 46 µg/m³ foram encontrados no período entre as 10h e as 14h Tabela 15, mostrando que a coleta representou o resultado das reações fotoquímicas dos gases precursores emitidos na madrugada e no primeiro período da manhã, acumulados embaixo da cobertura do terminal Norte. Descarta-se a possibilidade de o O₃ ter sido trazido de outras regiões em função da baixa velocidade do ar, que se manteve em aproximados 27m/s e o fato do amostrador K7 ter ficado em uma zona próxima ao telhado, o que dificultaria a entrada de O₃ vindos de outras fontes.

Neste sentido, o tipo de cobertura do terminal Tatuapé Norte colabora para formação e acúmulo de O₃ e outros gases, pois, durante todo o período diurno, ele recebe iluminação solar do chão até o topo das colunas e, em todos os períodos, acumula gases embaixo de sua cobertura, processo que favorece reações fotoquímicas. A presença de CN nas estruturas do terminal também contribui para formação de O₃ em camadas mais baixas da atmosfera, uma vez que já apresentado o CN pode acumular e redistribuir faixas de radiação solar um elemento importante para formação de O₃. Outro dado a se considerar é que a escada rolante que liga o terminal Tatuapé Norte com a passarela de interligação acima da RL faz com que os transeuntes tenham contato com área de ação do O₃, de maneira que esse e outros gases estão em presentes na zona respiratória de humanos.

Para Bertazolli, Bellini e Gallo (2009), boa parte dos estudos realizados sobre O₃ são em escalas macro com bioindicadores, sobretudo com a preocupação do controle de O₃ troposférico relacionado a preservação da camada de ozônio, e o controle de gases destruidores de O₃, como em atividades com cloro e bromo em observação ao protocolo de Montreal. Há poucos estudos no Brasil sobre O₃ nas camadas mais baixas da atmosfera, (CETESB, 2019), porém, este estudo mostrou a presença de O₃ em regiões baixas da atmosfera próxima à zona de respiração humana e a poucos metros de distância da RL. Os EUA perdem, em média, 500 milhões de dólares por ano devido a prejuízos causados pela presença de O₃ em regiões baixas de atmosfera, sobretudo na agricultura e folhagens urbanas de áreas de recreação e parques (CETESB, 2021). A possibilidade de O₃ em nível do solo na pesquisa americana disponibilizada pela CETESB vai ao encontro dos achados de O₃ em nível do solo desta pesquisa. Na Europa, concentrações de ozônio em nível do solo a partir de 78,4 µg/m³h em um período de 24 horas são consideradas suficientes para causar danos a vegetais (CETESB, 2021). A Agência de Proteção Ambiental Estadunidense (EPA) determina que concentrações de 0-50 µg/m³ são consideradas satisfatórias em nível do solo para humanos (EPA 2021).

O fato de teores de O₃ próximos as zonas respiratórias serem parecidos com os valores encontrados na troposfera são pontos de muita atenção para saúde pública. Mesmo que os limites recomendados pela CETESB e OMS de 0 a 100 µg/m³ por oito horas sejam considerados aceitáveis, não existem limites de tolerância no Brasil para O₃ em nível do solo, logo, as recomendações da CETESB e OMS são consideradas sem efeitos, caso mantido estes indicadores na troposfera.

O O₃ em baixas concentrações pode afetar a saúde e, por isto, sua presença no ar é preocupante, principalmente nas regiões situadas próximas às grandes cidades (FREITAS *et*

al., 2005). As concentrações de O₃ em nível do solo entre 51 µg/m³ á 100 µg/m³ podem causar danos adversos a saúde de grupos mais sensíveis como idosos asmáticos, ou grupos com doenças respiratórias pré-existentes, contudo, a agência não estipula tempo de exposição ou concentração diária. Nesse sentido, as concentrações de 59 µg/m³ desta pesquisa estariam em estado de atenção pela EPA 2021.

O O₃ é benéfico e importante para natureza, em níveis controlados, mas com influência de ações antrópicas nas condições naturais desse gás, o equilíbrio acaba sendo alterado, causando efeitos danosos a saúde e ao meio ambiente; este gás, quando presente nas regiões mais baixas da atmosfera, pode ser altamente oxidativo e tóxico para plantas e vegetais (CETESB 2019). Logo, o controle das emissões antrópicas dos elementos precursores de O₃, sobretudo emissões veiculares, pode ser grande aliado ao equilíbrio desse importante elemento da atmosfera.

Contudo, em um estudo de cenário hipotético realizado na Rodoviária Metropolitana de Porto Alegre (RMPA), constatou-se que a substituição de éter metil terciário butílico (EMTB) por etanol poderia reduzir em até 28% a produção antrópica de O₃ na RMPA (BERTAZOLLI; BELLINI; GALLO., 2009), porém, como o O₃ não depende apenas dos gases precursores para sua formação, mas também é influenciado por questões meteorológicas relacionadas a temperatura, ventos e radiação. Entende-se que a absorção dos gases precursores de O₃ e materiais particulados por infraestruturas verdes dará uma maior contribuição do que caso houvesse substituição de um combustível por outro.

O O₃ é um gás com propriedades de absorver e acumular calor. Trata-se de um GEE que, em concentrações elevadas, contribui diretamente para o aquecimento global (BRANDER, 2012). Considerando que os efeitos do aumento da temperatura por atividades antrópicas possuem ligações com a taxa de mortalidade em cidades como São Paulo, sobretudo por danos vasculares e respiratórios (BARROS; LOMBARDO 2016), um controle microclimático, com foco no aumento de vegetação, contribui para mitigação de tais efeitos para saúde humana (BAKLANOV; MOLINA; GAUSS, 2016), de modo que é possível adaptar os ambientes artificiais com recursos naturais, gerando benefícios psicossomáticos aos seres humanos (ABBUD B. 2006). Nessa perspectiva, entende-se que a falta de controle das concentrações de O₃, sobretudo nas atividades antrópicas, causa danos à saúde humana e impactos ambientais relacionados ao aquecimento regional e global.

A adoção de microescalas de controle de emissão de O₃ e outros poluentes pode contribuir para o alcance de objetivos mais tangíveis e melhor percepção popular dos problemas ambientais relacionados ao ar.

Portanto, as concentrações de O₃ se mantiveram dentro dos limites de tolerância da CETESB e OMS, sendo 0 a 100 µg/m³ por oito horas e consideradas N1 Boas, sem efeitos a saúde (Tabela 21), conforme IQAr CETESB 2019, mas os índices não apresentam parâmetros específicos para concentrações em horários intermediários ou para casos em que os teores podem chegar em níveis do solo, afetando grupos populacionais mais vulneráveis, portadores de comorbidades ou problemas pandêmicos, como COVID19.

4.3 AMOSTRA DE SO₂

O poluente SO₂ é formado pela oxidação do enxofre presente nos combustíveis fósseis e o controle da emissão desse poluente, portanto, pode ser feito por meio do não uso de combustíveis fósseis (CETESB, 2019).

Também considerado como um poluente primário, sua medição em microescala é de grande valia, principalmente em locais com trânsito de veículos a diesel e com grupos de pessoas expostas por algum tempo relevante (CETESB, 2019). Nesse sentido, o terminal Norte do Tatuapé se torna viável para pesquisa, visto que a maioria dos ônibus são movidos a combustível diesel, além do trânsito concomitante de veículos a diesel na R L, é um local onde as pessoas ficam expostas por tempo significativo à espera do transporte.

Tabela 22 – Concentração de Dióxido de enxofre

Horários	Concentração SO ₂ (µg/m ³) Presentes no estudo	Índice CETESB 24h (µg/m ³)	Classificação CETESB (µg/m ³)	IQAr. X saúde CETESB	Índice OMS 24h
08:40h às 14:40h	≤07.	NI	NI	NI	NI
14:40h às 20:40h	≤07.				
20:40h às 02:40h	≤07.				
02:40h às 08:40h	≤07.				
Total 24 h.	≤07.	0-20	N1- Boa	Sem efeitos a saúde	0-20

Fonte: Próprio autor com base na CETESB 2019. NI = Não informado

A Tabela 22 apresenta os resultados das medições de SO₂ e apresenta resultados idênticos para os diferentes horários de coleta todos abaixo de 07 µg/m³, indicando valores ideais sob a classificação N1-Boa (quarta coluna), sem efeitos para saúde (quinta coluna) conforme o IQAr.

SÁ Neto *et al.*, (2018) utilizaram critérios semelhantes em relação aos horários e quantidade de horas, baseando-se nos padrões CETESB 2019.

Para o caso dos valores de referência de SO₂, tanto CETESB quanto OMS apresentam os mesmo indicadores de 0 a 20 µg/m³ por 24h e, como nos demais casos, os parâmetros para valores intermediários entre os períodos são inexistentes.

Os fatores que se levariam em conta para teores tão baixos de SO₂, visto que o local possui muitas emissões veiculares e, em sua maioria, diesel, seriam uma alta umidade do ar, boa solubilidade na água e a ação dos ventos, mas os achados apresentaram umidade relativa na casa do 34,4% durante o dia e 90% entre a noite e madrugada e, quando comparamos os valores de coleta, não há mudança significativa em nenhum dos horários, logo, descartou-se a influência desse fator.

No que diz respeito à influência dos ventos, elas se mantiveram por longos períodos, entre 23 e 26,5/ms, o que não é o suficiente para uma diminuição brusca nos resultados.

Outro ponto de atenção que contribui para os níveis baixos de SO₂ nos resultados é o fato dos amostradores ficarem posicionados a 4,5 metros de altura durante a coleta e a densidade do SO₂ não permitir que ele chegasse até o K7 de coleta, mas os escapamentos dos veículos a diesel do local são posicionados para cima, o que impulsionaria o SO₂ para o telhado próximo ao coletor K7.

Os teores e emissões de SO₂ também estão ligados a presença de enxofre em combustíveis fósseis (CETESB, 2019). Portanto se em diferentes horários e em concentrações altas e baixas de humidades do ar os teores de SO₂ se apresentaram baixos, visto que os combustíveis usados no local em sua maioria são diesel, conclui-se que os combustíveis usados pela maior parte da frota dos veículos em conexão direta com o terminal Norte Tatuapé, possuem baixos ou nenhum teor de enxofre em sua composição.

Justifica-se, pois, observada a presença de inúmeros veículos movidos a biodiesel no local, chamados de Eco, a implantação das frotas pela SPTRANS em atendimento à Lei Nº 16.802/2018 (dispõe sobre redução de poluentes em fontes motrizes). Dito que o SO₂ está presente em combustíveis fósseis, isso leva ao entendimento que a redução do uso de combustível fóssil, total ou parcial, contribui para a redução das emissões de SO₂.

Os veículos movidos a biodiesel, total ou parcial, emitem menos poluentes do tipo SO₂ como constatado, em concordância com a literatura; mas, apesar de menos poluentes, continuam liberando GEE e MP, dados os níveis dos outros achados nesta pesquisa, como os resultados de MP, CO, CO₂, O₃, que ficaram acima do ideal em comparação com os padrões CETESB/OMS.

Uma alternativa seria a substituição da frota por veículos movidos a eletricidade, contudo, haveria um aumento nas emissões de GEE, nos locais de origem de produção dessa energia.

O plantio de árvores e instalação de infraestruturas verdes se apresentam como aliados viáveis para resiliência da cidade, pois prestam maiores serviços ecossistêmicos do que a redução de contaminantes em compostos ou substituição de combustíveis, como apresentado na Tabela 26, devido à infraestrutura verde interagir de modo mitigante com vários contaminantes atmosféricos de forma simultânea, proporcionando microclimas agradáveis que também ajudam nas questões das ICUs. Isso não prova a ineficácia da redução de compostos prejudiciais à saúde em combustíveis ou desqualifica estratégias de substituição, mas apresenta uma alternativa de ações conjuntas pelo meio ambiente e a saúde.

Os achados das medições de SO₂ por Sá Neto *et al.* (2018) no Pará, na cidade de Ananindeua, que possui aproximados quinhentos mil habitantes (uma cidade pequena em comparação com São Paulo), estiveram entre 11,1 e 19,6 µg/m³, muito mais elevados que os achados nesta pesquisa, dadas as condições em que o estudo foi realizado. O estudo foi realizado em locais em que o uso do combustível predominante era o Diesel, apresentando uma relação entre a presença de SO₂ com o uso de Diesel.

4.4 AMOSTRA DE NO₂ e NO

O NO₂ e o NO, são poluentes primários, caracterizados, também, como uns dos precursores do O₃; durante as coletas de amostras, esses poluentes praticamente coexistem (CETESB, 2019). Há muito tempo se tem associado problemas de saúde humana com NO₂ e NO. Existe relação entre mortalidade e internações hospitalares por doenças respiratórias com dióxido de nitrogênio (SCHWARTZ; DOCKERY, 1992). As crianças representam um grupo de vulnerabilidade respiratória, sendo ela associada ao dióxido de nitrogênio (SALDIVA *et al.*, 1994). O NO₂ deve ter suas concentrações monitoradas e, dependendo dos resultados, o monitoramento deverá ser contínuo (CETESB, 2019).

Tabela 23 - Concentrações de óxido nítrico e dióxido de nitrogênio

Horários	concentração NO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Presentes no estudo	concentração NO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Presentes no estudo	Índice CETESB 01h NO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Índice CETESB 01h NO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Classificação CETESB	IQAr. X saúde CETESB	Índice OMS 01h NO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Índice OMS 01h NO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
14:30h às 15:30h	≤ 0.188		NI	NI	NI	NI	NI	NI
14:30h às 15:30h		≤ 0.019						
Total 01 h.	≤ 0.188	≤ 0.019	0-200	NI	N1- Boa	Sem efeitos a saúde	0-200	NI

Fonte: Próprio autor com base na CETESB 2019. NI = Não informado

A Tabela 23 apresenta os resultados obtidos de NO e NO₂, sendo que, no ponto em que foi quantificado por 01 uma hora, apresentou índices baixos de concentração; os indicadores para NO₂ estão na classificação N1 Boa, pois não causam efeitos à saúde.

A pesquisa ressalta, também, que tanto a CETESB quanto a OMS não informam parâmetros para NO. Conforme a literatura já apresentada, na atmosfera, eles quase coexistem, porém, é importante que seus níveis sejam reduzidos quando emitidos por atividade antrópica.

O NO e o NO₂ fazem parte das métricas do CO₂eq das quais o Brasil possui metas de redução na casa dos 1,3 bilhões de toneladas anuais, e a cidade de São Paulo foi responsável, em 2018, por quase 18 milhões de toneladas de emissões, segundo o Observatório do Clima (SEEG, 2020). Portanto, o NO é um gás presente na atmosfera, também gerado por atividades antrópicas e não possui parâmetro de controle, segundo a CETESB e OMS, além de ser um poluente contado como CO₂eq.

Uma das fontes de NO é a foto-oxidação de NO₂ por radiações. Se as concentrações de NO₂ forem baixas, as concentrações de NO também tendem a ser. Isso indica que, durante a noite, devido à menor incidência de radiação solar, os índices de NO também são menores (CARLIER *et al.*, 1986).

Os resultados de NO₂ apresentados na Tabela 23 estão abaixo dos limites de tolerância indicados pela CETESB/ OMS, de modo semelhante aos resultados de SO₂. Contudo, dado à quantidade de veículos movidos a biodiesel no local, acrescenta-se que, quanto maior a

presença de biodiesel em um motor ou esse misturado com diesel, maior será a presença de NO_x (EPA, 2006).

Isso traz a percepção que, sem estudos mais profundos, pode-se induzir a falsas melhorias de serviços ambientais de serviços ambientais, pois a substituição de um combustível por outro pode reduzir a emissão de determinado poluente que possua maior notoriedade como CO_2 e emitir outros, incluindo poluentes que ainda não possuem metas de controle pela CETESB/OMS, como é o caso do NO. Para melhor compreensão desses casos, aplica-se a metodologia “Varredura de solventes”, pois, a partir delas, realiza-se um levantamento não da quantidade, mas dos tipos de poluentes presentes no ar, o que pode ser uma melhor alternativa, em conjunto com a Ficha de Informação do Produto Químico (FISPQ).

Ribas *et al.*, (2016) após medirem as concentrações de NO_x na saída de escapamento em 188 ônibus movidos a diesel e biodiesel, constataram que os veículos movidos a biodiesel emitem até 40% mais de NO_2 e NO do que os movidos somente a diesel. As diferenças nas emissões de NO_2 e NO por veículos movidos a biodiesel dependem de vários fatores, como tipo de motor, tipo de biodiesel utilizado, forma de operar o veículo etc. (BUNGER *et al.*, 2000).

Além das variáveis dos diferentes tipos e composições de biodiesel que podem exercer influência nos resultados das amostras, também existem as variáveis ambientais, como umidade relativa do ar em 50,3% durante as medições, sendo que influenciam na hidrólise do NO_2 , no tempo de coleta de apenas uma hora. Outro fator de influência se deve ao momento da coleta, pois os veículos permaneceram pouco tempo ligados, situação típica em alguns momentos do dia no terminal.

A amostragem de curta duração de NO_2 , como recomendado pela CETESB/OMS, é útil para ser entender resultados existentes naquele intervalo, sendo uma boa estratégia para locais que tenham necessidade de redução e controle de emissões em intervalos específicos, pois otimiza o tempo de coleta.

Uma opção seria fazer como propuseram Ribas et al., (2016): coletaram nas saídas dos escapamentos, mas isso não representou o quantitativo real do poluente disperso no ambiente analisado, mas sim a emissão pontual do veículo. A consulta da FISPQ do biodiesel utilizado colaboraria para entendimento da presença do agente e sobre a existência de possíveis outros.

Em outro estudo, na região metropolitana de Fortaleza, Souza (2017) analisou as emissões de NO_x e constatou maior presença de NO e NO_2 em alturas entre 31 e 85 metros, o que pode levar a entender que, nas condições e variáveis de estudo, o gás se aloja em maiores

alturas, ou seja, o gás pode possuir um rápido deslocamento da fonte para regiões mais altas da atmosfera.

A possibilidade de se privilegiar uso de biodiesel, quando observamos resultados isolados, pode aparentar em um primeiro momento e melhora na qualidade do ar. No entanto, Brito *et al.*, (2009) comprovaram, em seu estudo, que o biodiesel é tão tóxico quanto o diesel. O combustível também provoca desequilíbrio no sistema nervoso, assim como inflamação pulmonar e sistêmica devido a uma série de outros contaminantes presentes no combustível. Então, a substituição de combustíveis ou dos seus compostos, sendo fósseis ou não, também indica a necessidade de mais estudos e maior compreensão sobre suas toxidades e impactos ambientais.

Portanto, tratando-se de NO₂ e NO, não se constatou a presença significativa dos agentes nas amostras, seguindo a metodologia orientada pelo IQAr CETESB 2019.

4.5 AMOSTRA DE CO e CO₂

O ar atmosférico possui diversos compostos. O equilíbrio ideal seria 21% oxigênio (O₂), 78% de N₂ e 1% de outros gases. Os riscos à saúde e ao meio ambiente surgem, principalmente, por ações antrópicas, que podem alterar esse equilíbrio, destacando o equilíbrio nos níveis de (O₂), que, dependendo da ação antrópica, pode ser deslocado e diminuído por outros gases, ficando ≤ 19,5% (prejudicial a humanos) (PEIXOTO; FERREIRA, 2013).

Os gases CO e CO₂ são emitidos diretamente pela fonte que o gerou (CETESB, 2019). Fazem parte da métrica CO_{2eq} e consagrados como GEE, dentro e fora do mundo acadêmico. Esses gases têm a capacidade de deslocar o oxigênio atmosférico, visto que interferem no equilíbrio (PEIXOTO; FERREIRA, 2013).

Tabela 24 - Concentrações de monóxido de carbono e dióxido de carbono

Horários	CO ppm Presentes no estudo	CO ₂ ppm Presentes no estudo	Índice CETESB 08h CO ₂ ppm	Índice CETESB 08h CO ppm	Classificação CETESB	IQAr. X saúde CETESB	Índice OMS 08h CO ₂ ppm	Índice OMS 08h CO ppm
10:00h às 14:00h	515	2.457	NI	NI	NI	NI	NI	NI
14:00h às 18:00h	116	2.116						
Total 08 h.	631	4.573	NI	0-9	N5- Péssima	≥ 15 Toda população em risco de doenças respiratórias e cardiovasculares; aumento de morte prematura de grupos sensíveis.	56	87

Fonte: Próprio autor com base na CETESB 2019. NI = Não informado

A Tabela 24 apresenta concentrações de CO e CO₂. Os valores apresentados indicam teores excessivamente elevados de ambos os poluentes, visto que, em relação à CETESB, valores superiores a 15 ppm são considerados péssimos para o CO, e valores acima de 56 ppm também estão em uma classificação fora do tolerável para CO₂, segundo o parâmetro da OMS.

A CETESB não possui parâmetro de tolerância para CO₂ em seu GTMQAr, e a OMS indica que seus valores não devem ultrapassar 56ppm em oito horas de medição. No entanto, os níveis de tolerância para CO, segundo a CETESB, são de 09 ppm, sendo bem mais baixos do que os da OMS, de 87ppm.

As concentrações acima de 15ppm para monóxido de carbono são categorizadas como N-5 péssima, e toda a população, independentemente de serem grupos vulneráveis, está com sua saúde em risco, principalmente quanto às doenças respiratórias e cardiovasculares; para os

grupos vulneráveis, a probabilidade de morte prematura aumenta de forma significativa (CETESB, 2019).

Sob a ótica deste estudo se tratar de uma microescala de representação, os achados totais desta pesquisa mostram que 631 ppm para CO e 4.573 ppm para CO₂, em um período de 08h, são mais de 81 vezes maiores para CO₂ e mais de 70 vezes maiores para CO, quando comparamos com os limites de tolerância pré-estabelecidos. Outro dado é que no entorno próximo do trecho avaliado não foram identificadas chaminés ou indústrias e isso levou à compreensão que, de fato, as fontes emissoras são, principalmente, veiculares, dentre as quais, somente no Terminal Norte, existem 286 ônibus movidos a diesel por dia; os veículos movidos a diesel são responsáveis por 90% das emissões de carbonáceos em geral (van DEN HOVE *et al.*, 2020).

As diferenças entre as emissões de CO₂ em diferentes horários não foram muitas. Considerou-se o período das 10:00 às 14:00 e das 14:00 às 18:00, como apresentado na Tabela 18. De conhecimento estabelecido, o CO₂ é resultado da queima completa de combustíveis e uns dos fatores que podem influenciar nos resultados é a possibilidade de um aumento de congestionamento na RL no dia da coleta, o que faz com que um número maior de veículos fiquem parados com os motores ligados, queimando combustíveis. Fatores como a presença no dia da coleta de veículos desregulados que emitem mais poluentes também podem ser considerados.

Em função do CO ser resultado da queima incompleta de combustível, os resultados apresentados na segunda coluna são menores do que o CO₂, o que vai ao encontro das características supracitadas, em um local cuja maior parte do veículos presentes está com seus motores ligados, em constante queima, mas ainda que mais baixos, em comparação com o CO₂, os níveis de CO estão elevados para padrões de saúde, como já apresentado.

Bartholomeu, Péra e Caixeta-Filho (2016) em seu estudo sobre emissão de CO₂ no transporte rodoviário de cargas, analisaram as emissões de 145 veículos movidos a diesel e biodiesel e comprovaram que o uso de biodiesel em transporte de cargas não é tão eficiente para redução de poluentes, como as ações que visam reduzir o consumo de combustível, devido à perda de rendimento dos veículos, o que provoca aumento do consumo e gera mais poluição. Em outro estudo com Balões Tedlar sobre emissões de CO e CO₂ em veículos automotores, Melo *et al.* (2013) identificaram que a quantidade de emissões depende de fatores como: partida a frio, partida a quente e emissões durante a fase estabilizada do motor.

Existe uma relação entre resultados de CO e CO₂ como CN, conforme literatura já apresentada, logo, os resultados chamam mais atenção quando entendemos que o CN, nesse caso, é gerado em grandes quantidades, com as emissões de CO e CO₂ (CHEN *et al.*, 2020) e que os principais emissores de CN são os veículos movidos a diesel (SANTOS *et al.*, 2019).

A literatura sobre CN é recente, de modo que os valores de referência para controle deste poluente não aparecem no GTMQAr e da OMS. Sendo o CN, o mais agressivo dos carbonos em função de causar danos respiratórios mais fortes, absorver todas as faixas de radiação solar e modificá-las diminuindo a produção de chuva, este possui baixa solubilidade, permanecendo na superfície das águas e, assim, contamina os corpos d'água (LACK *et al.*, 2014).

Em crianças e idosos, o CO pode causar malefícios até mesmo cinco dias após a elevação das concentrações acima dos níveis de tolerância supracitados (BRAGA *et al.*, 2001). A concentração elevada dos poluentes atmosféricos está relacionada a diminuição das funções pulmonares (MISSAGIA *et al.*, 2018), e o uso de vegetação urbanas para controle nos índices de CO tem sido um recurso utilizado mundialmente (ESCOBEDO *et al.*, 2010). Além disso, para controle de CN, em função dele ficar sequestrado em vegetações e depois sob ações de chuvas, parte é filtrada pelo solo, o que é uma forma de evitar a contaminação de corpos d'água.

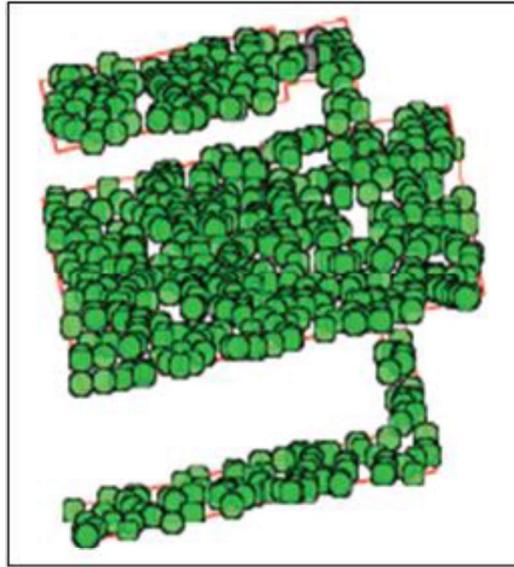
O quanto e como algum tipo de vegetação pode contribuir para essa melhora são dados que podem ser estudados com modelagens computacionais, como, por exemplo, por meio do I-TREE CANOPY, mas, de fato, existe um consenso entre os acadêmicos do Brasil e do mundo, de modo que defendem que a infraestrutura verde favorece a saúde e o meio ambiente em vários aspectos.

Quanto mais estudos sobre qualidade do ar e poluentes, mais somos levados à compreensão quanto aos impactos na saúde e às possibilidades de aumentar a resiliência ambiental, o que viabiliza benefícios sócios econômicos.

4.6 RESULTADOS DO I-TREE CANOPY

Sempre que analisada uma determinada área no software I-TREE CANOPY, ele projeta uma saída de imagem artística relacionada a área de estudo, como apresenta a Figura 29.

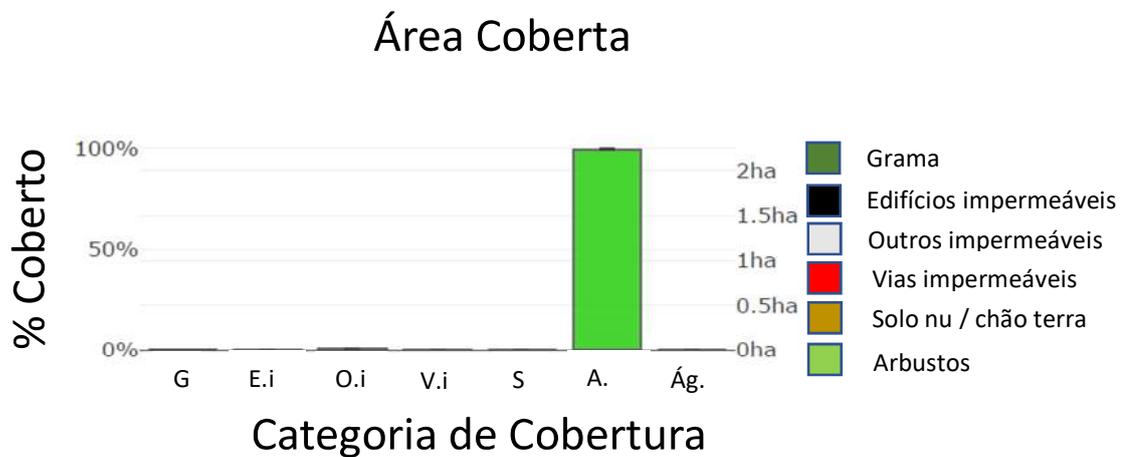
Figura 29 - Interface da área analisada, gerada pelo I-Tree com arbustos. Sem escala



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Os dados observados no gráfico 01 apresentam, em barras, os tipos de coberturas existentes na amostra, com percentual de ocupação e quantos hectares foram analisados.

Gráfico 1 - Tipos de coberturas na amostra e hectares analisados



<https://canopy.itreetools.org/report>

A Tabela 25 apresenta em números quantos pontos foram analisados, a qual tipo de cobertura se refere a análise e o desvio padrão (DP).

Tabela 25 - Percentual de cobertura dos pontos em relação ao hectare

Tipo de cobertura	Descrição	Pontos	%Cobertura \pm DP	Área (ha) \pm DP
Gramma/herbáceos	Gramma	0	0,00 \pm 0,00	0,00 \pm 0,00
Edifícios impermeáveis		0	0,00 \pm 0,00	0,00 \pm 0,00
Outros impermeáveis		4	0,59 \pm 0,30	0,01 \pm 0,01
Estradas impermeáveis		0	0,00 \pm 0,00	0,00 \pm 0,00
Solo nu/chão		0	0,00 \pm 0,00	0,00 \pm 0,00
Arbustos		672	99,41 \pm 0,29	2,23 \pm 0,01
Água		0	0,00 \pm 0,00	0,00 \pm 0,00
Total		676	100,00	2,24

O I-tree canopy apresenta relatórios em etapas separadas. Podemos observar na Tabela 26 resultados gerais mais abrangentes quanto à remoção de poluentes e, na Tabela 27, resultados específicos para determinados agentes, mais comumente observados em indicadores de controle.

A Tabela 26 apresenta, ainda, a retirada de 6,81 toneladas (t) de carbonos totais por ano e 24,98 (t) de CO_{2eq}. Quando analisamos os valores apontados na mesma Tabela, sobretudo o item “limite máximo de armazenamento em arbustos”, notamos que os benefícios são maiores na casa de 171,13 (t) de carbonos totais e 627,47 (t) de CO_{2eq}. São apresentados, também, os valores em dólares referentes às remoções, com base no índice de preço das externalidades dos EUA.

Tabela 26 - Estimativas de benefícios por arbustos.

Descrição	Carbonos totais (t)	\pm DP	CO ₂ Equiv. (t)	\pm DP	Valor (USD)	\pm DP
Sequestrado anualmente em arbustos	6,81	\pm 0,02	24,98	\pm 0,07	\$1.281	\pm 4
Armazenado nos arbustos (limite máximo de armazenamento)	171,13	\pm 0,51	627,47	\pm 1,86	\$32.172	\pm 95

Tabela 27 – Quantidade de remoção de contaminantes anuais e valor em dólares

Abr.	Quantidade (Kg)	\pm DP	Valor (USD)	\pm DP
CO	5,62	\pm 0,01	\$0	\pm 0
NO₂	30,67	\pm 0,04	\$0	\pm 0
O₃	305,55	\pm 0,36	\$19	\pm 0
SO₂	19,32	\pm 0,02	\$0	\pm 0
PM_{2,5}	14,85	\pm 0,02	\$39	\pm 0

PM₁₀*	102,35	±0,12	\$14	±0
-------------------------	--------	-------	------	----

Para Binanchi (2006), as infraestruturas, como os telhados verdes, fornecem serviços ecossistêmicos que diminuem a poluição das águas do ar e do solo; observando os dados obtidos no I-TREE CANOPY para todos os poluentes apontados nas tabelas da CETESB, existirá algum efeito de mitigação sobre eles, além disso, os resultados apontam benefícios hidrológicos, confirmando estudos de Bianchi (2006).

Dentre os benefícios hidrológicos apresentados, caso a cobertura verde fosse implantada sobre a estação CPTM Tatuapé, poder-se-ia destacar retenção de águas de chuva, interceptação de mais de 1.800 litros de água da chuva, o que atrasaria o escoamento (Tabela 28), pois haveria a retenção de contaminantes do ar, que ficariam retidos nas plantas e no solo da cobertura verde, sendo filtrados e, portanto, não cairiam diretamente no chão corpos d'água (HERZOG 2010). É uma forma de contribuir com a diminuição de pontos de alagamento em razão da lentidão da vazão da água em dias de chuva (CASTRO; GOLDENFUM, 2008). Outros benefícios hidrológicos podem ser mencionados, como o lançamento de mais de 6 mil litros de água na atmosfera por meio de evaporação e mais de 5 mil litros de água pela evapotranspiração (Tabela 28), o que contribui, também, para a biodiversidade e mitigação das ilhas de calor (HERZOG 2010).

Tabela 27 - Estimativas de benefícios hidrológicos por arbustos. Litros por hectare por ano

Beneficiar	Quantidade (lt)	±DP	Valor (USD)	±DP
Evitou o escoamento	10,77	±0,03	\$0	±0
Evaporação	889,29	±2,64	N/D	N/D
Interceptação	894,27	±2,65	N/D	N/D
Transpiração	1.203,35	±3,57	N/D	N/D
Potencial de evaporação	6.738,57	±20,00	N/D	N/D
Potencial de evapotranspiração	5.498,11	±16,31	N/D	N/D

Fonte: <https://canopy.itreetools.org/report>

Em uma projeção para o ano de 2021, se as emissões e as condições permanecessem iguais nos dias das coletas, por 253 dias úteis, teríamos os resultados apresentados na Tabela 29, cujas emissões de NO₂, O₃, SO₂, e MP_{2,5} seriam totalmente mitigadas pela infraestrutura verde, consideradas, pois, como adicionais, de modo que o MP_{2,5} seria uma fração ultrafina, que é o principal vetor de CN (MA; BIRMILI, 2015) e o MP₁₀ e o CO seriam mitigados parcialmente, no caso do CO₂. O I-TREE CANOPY não apresenta índice específico por inclui-

lo na métrica dos carbonos equivalentes, que, neste caso, mesmo com o número expressivo obtido nos resultados, estaria totalmente mitigado.

Tabela 28 - Projeção de emissões anuais de contaminantes com a projeção de remoções anuais com a cobertura verde sobre o telhado do terminal Norte Tatuapé

Poluentes	Concentrações Coletadas nas amostras (kg)	Estimativa de remoção de poluentes com cobertura verde (I-TREE CANOPY) kg anual	Estimativa de Concentração anual do poluente; emissões em 253 dias úteis (2021)
CO.	0.000000631	5,62 kg	159,643 (kg)
CO ₂ .	0.000004573	N/especificado	1.156,969 (kg)
NO ₂ .	0.00000000019	30,67 kg	4,807 (kg)
O ₃ .	0.00000000059	305,55 kg	14,92 (kg)
SO ₂ .	0.0000000028	19,32 kg	7,084 (kg)
PM _{2.5} .	0.000000043	14,85 kg	10,089 (kg)
PM ₁₀ .	0.000001398	102,35 kg	353,694 (kg)
Carbonos totais.	N/especificado	6,81 (Toneladas)	N/especificado
CO _{2eq} .	N/especificado	24,98 (Toneladas)	N/especificado
Carbono armazenado em arbustos (Limite de armazenamento)	N/especificado	171,13 (Toneladas)	N/especificado
CO _{2eq} armazenado em arbustos (Limite de armazenamento)	N/especificado	627,47 (Toneladas)	N/especificado

Os indicadores da Tabela 29 apontam a redução sequestro e armazenamento de carbono CO e carbono equivalente. Sob os aspectos dos dispositivos legais, o sequestro de carbono e outros poluentes fazem parte do objetivado no plano diretor da cidade de São Paulo e constitui uma importante meta dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da OMS e do PMAU (2020).

Diversos países do oriente e do ocidente exploram técnicas de sequestro de carbono por meio de infraestrutura verde. Dentre eles, destacam-se EUA, Reino Unido, Canadá, China, Coreia do Sul (LIRIO; PORTELLA, 2020). Herzog (2009) apresenta, em seu estudo, uma sucessão de pontos em que as infraestruturas verdes são apresentadas como captoras de carbono e conseguem diminuir o impacto negativo das emissões excessivas de CO.

As plantas possuem a capacidade de retirar poluentes da atmosfera como CO, NO, O₃ e MP (NOWAK *et al.* 2018); neste ponto, o experimento se apresentou eficaz, pois evidenciou uma possibilidade de retirada por exemplo de 5,62kg de CO por ano, além de outros poluentes, como 305,55 kg de O₃; também apresentou possibilidades de remoções em MP, SO₂ e NO₂, dados representados na Tabela 29, sendo que o I-tree possibilita visualizar valores individuais de alguns agentes, que estão entre os principais citados, importantes, portanto, para o controle nas tabelas de monitoramento CETESB/OMS.

Se analisarmos de forma isolada a retirada de carbono CO na casa dos 5,62 kg por ano (Tabela 29), a primeira impressão que temos é que são poucos benefícios, visto que o montante anual gerado seria de quase 160kg, mas levando em conta todos os benefícios, a cobertura verde acima da estação se torna uma grande aliada à saúde e ao meio ambiente.

Em razão de o Brasil possuir uma meta para redução das emissões de carbono equivalente (SEEG 2020), métrica esta que representa mais tipos de poluentes do que os apresentados nos índices da CETESB (NOBRE 2012) (BRANDER, 2012), podemos afirmar que, segundo o relatório SEEG 2020, a cidade de São Paulo gerou, em 2018, quase 18 milhões de toneladas desses poluentes; leva-se em conta que a simulação de cobertura verde proposta acima da estação CPTM e dos Terminais Norte e Sul teriam a capacidade anual de remoção de quase 25 toneladas para carbono equivalente e mais 6,81 toneladas dos carbonos totais, como apresentado no relatório do software I-TREE CANOPY, o que inclui, neste último grupo, o CN, carbono capaz de absorver e modificar

radiações (ZHENG *et al.*, 2017), (CHEN *et al.*, 2020). Os benefícios começam a se apresentar de uma maneira mais expressiva.

Além disso, reitera-se que os arbustos podem sequestrar e acumular em si mais de 171 toneladas de carbonos totais e mais de 627 toneladas de carbonos equivalentes (Tabela 29).

No ano de 2018, a cidade de São Paulo removeu cerca de 73 mil toneladas de carbono equivalente, cujo principal recurso para essa retirada foram vegetações que haviam sido destruídas ou danificadas e, de forma antrópica e natural, reestabelecidas total ou parcialmente (SEEG 2020).

A simulação com cobertura verde se mostrou eficaz para remover, em um ano, aproximadas 25 toneladas de carbono equivalente em uma área de 25 mil metros quadrados, logo, para dobrarmos a quantidade de CO_{2eq}, precisaríamos reproduzir esta cobertura verde em 2,920 estações ou coberturas pela cidade de São Paulo, desde que possuam metragem quadrada igual a 25 mil metros quadrados, para, então, alcançarmos, o número de 146 mil toneladas de remoções, sem mensurar os outros benefícios hídricos relacionados às mitigações de enchentes e ilhas de calor na cidade de São Paulo.

Um dos aspectos em se usar micro representação relacionadas com o I-TREE é que podemos entender os números em menor escala para traçar metas e objetivos factíveis em pequenas proporções até chegarmos em uma escala macro.

Em relação aos métodos válidos para coleta em campo dos agentes, o método de referência caracterizado, na maioria das vezes, por estações de coleta fixa, apresentam vantagens para medições em tempo real, contudo, o alto custo dos aparelhos e o custo da instalação fazem com que esses métodos se concentrem amparados quase sempre pela iniciativa pública. É certo, também, que estações fixas, por vezes, podem representar índices de qualidade do ar em um determinado ambiente ou setor, mas não podem ser transportadas para outros pontos da cidade, dificultando a compreensão da qualidade do ar em áreas possivelmente vulneráveis e sem esta tecnologia.

O método equivalente, normalmente feito com coletores móveis e que pode ser apoiado em literaturas internacionais, por sua vez, não pode ser considerado uma amostragem em tempo real; em outras palavras, ele é um registro do que ocorreu no dia e hora da coleta; possui um custo sobre locações de equipamentos, custos com laboratórios, contudo, são custos mais acessíveis para pesquisadores, estudantes ou iniciativas privadas que se interessem por qualidade do ar. A partir de seus resultados

também será possível a elaboração de estudos e estratégias para compreensão das concentrações dos poluentes. Sobre esta técnica também incide o risco de danos nos equipamentos ou de se perder as coletas em função da ação de vandalismo ou de intempéries, diferente das estações fixas que, em sua maioria, podem ficar expostas ao tempo e, devido à sua estrutura, suportam mais ações de vandalismo, porém, a facilidade de transporte e escolha de locais para posicionamento dos coletores equivalentes por gravimetria colabora para exploração de dados primários em locais variados.

O uso do I-TREE CANOPY para simulações de benefícios de infraestrutura verde se mostrou eficiente e eficaz para estudos preliminares e pré-dimensionamento. De maneira geral, os pesquisadores usam este software para a compreensão dos benefícios em áreas verdes existentes e não para simulação da substituição de uma área cinza por uma infraestrutura verde.

Contudo a qualidade da imagem influencia diretamente na interpretação dos dados pelo software, mas, tratando-se de simulações os dados, não sofrem interferência neste aspecto.

Contextualizando os achados desta pesquisa com a Lei 6938/81, que estabelece o princípio do poluidor pagador, cujo poluidor deve indenizar o quanto poluiu (BRASIL 2021 lei6938/81), é possível pensar em uma compensação referente ao impacto, mas, sobre esse pensamento, incide a questão de se poder pagar para poluir; em algumas instituições isso pode se mostrar como negócio; os poluentes encontrados se tratam de uma externalidade negativa e o I-TREE CANOPY usa o índice de preço das externalidades americanas para calcular os valores em dólares dos benefícios. Se uma externalidade pode ser questionável, todas as esferas de responsabilidades sobre elas também podem, pois, para Gregory Mankiw (2019), as externalidades, sejam positivas ou negativas, são uma falha do processo capitalista.

A melhora significativa na qualidade do ar e no controle de emissões de gases pode ser alcançada por meio do plantio de árvores e bosques urbanos, mesmo se utilizados determinados arbustos, como apontam os dados e simulações com I-TREE CANOPY, apresentados nas Tabelas 26,27 e 28.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir das condições analisadas, este estudo concluiu que existem contaminantes atmosféricos no ar do terminal Tatuapé Norte e os arbustos urbanos possuem potencial em atuar como barreira natural a contaminantes oriundos das emissões veiculares, sendo este potencial de aproximadas 25 toneladas por ano de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ e, para os demais poluentes, os seguintes valores: 5,62 Kg de CO; 30,67 Kg de NO_2 ; 305,55 Kg de O_3 ; 19,32 Kg de SO_2 ; 14,85 Kg de $\text{MP}_{2,5}$; 102,35 Kg de MP_{10} anualmente, em uma área de 25 mil metros quadrados.

Quanto aos poluentes, este estudo de caso levou a conclusão de que as concentrações dos poluentes MP, CO e CO_2 revelam números muito acima dos referenciados como bons para CETESB e OMS e as concentrações de O_3 , mesmo classificadas como boas pelo IQAr, não podem ser interpretadas dessa forma em função de o Brasil não possuir limites de tolerância para O_3 em nível do solo. Os poluentes NO, NO_2 e SO_2 não apresentaram concentrações significativas.

Além disso, é certo que os resultados de MP, CO e CO_2 foram as mais discrepantes com os valores de referência. Tratando-se de uma microescala de representação, a literatura supracitada apontou que o MP, nas condições desse estudo, carregou, em si, o CN que é extremamente agressivo a saúde e ao meio ambiente, sobretudo por acumular radiação e viabilizar ilhas de calor.

A pesquisa apontou, como outros estudos nela apresentados, que o biodiesel, ou substituição de compostos nos combustíveis, não são tão eficazes ao meio ambiente e a saúde quanto à redução de emissões e que as microescalas de medição podem ser importantes aliados na compreensão sobre a presença e concentrações de poluentes em microambientes urbanos.

Estas informações podem colaborar para o entendimento ou estabelecimento de metas locais e regionais em microescalas para de redução de carbono e demais poluentes. Desse modo, é possível o envolvimento de indivíduos fora do mundo acadêmico em questões relacionadas à poluição.

A combinação do uso I-TREE CANOPY com medição de poluentes por método equivalente apresentou-se boa quanto ao entendimento, em microescala, da existência de poluentes e das pequenas concentrações em locais sem dados das estações fixas.

Com o intuito de compreender as prioridades nas microáreas vulneráveis, buscase saber, de antemão, o quanto determinada região receberá de benefício em termos de melhor performance em saúde e meio ambiente, e o quanto se mitigará diretamente na microrregião geradora de poluente.

Em outras palavras, a medição em microescala por método equivalente pôde comprovar a existência de poluentes de forma rápida, enquanto, com o I-TREE CANOPY, pôde-se entender como e quanto podemos mitigar desses poluentes por meio de infraestruturas verdes.

5.1 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

As medições e monitoramentos de qualidade do ar feitas por estações fixas são muito importantes e fundamentais para a compreensão e desenvolvimento de estudos sobre a qualidade do ar, principalmente em escala macro, contudo, é incerto afirmar que um único método possa ser suficiente para uma cidade como São Paulo, abrindo-se, assim, um campo vasto para novas explorações nos mais diversos locais e rincões da cidade. A cidade de São Paulo, com seus diferentes usos e ocupações do solo e suas diferentes características ambientais, apresenta-se como uma porta de entrada para microescalas de medição de poluentes, podendo-se, assim, compreender quais os poluentes existentes e suas concentrações pontuais, até mesmo para servir de subsídio para instalações de estações de monitoramento em escala macro para diferentes tipos de poluentes.

Medições pelo método equivalente do tipo varreduras de solventes podem ser realizadas por apresentarem, de forma mais abrangente, vários tipos de poluentes, sem ficarem restritas aos poluentes apresentados nas tabelas da CETESB e OMS; uma pesquisa em microescala de representação mais aprofundada apenas sobre as concentrações do carbono negro e suas toxidades se apresenta como relevante no contexto atual.

Cada tipo de espécie vegetal possui uma capacidade diferente de remoção de poluente: umas retiram mais carbono do que outras, pois existem espécies que possuem a capacidade de retirar até mesmo categorias de ácidos (RYU *et al.*, 2018), logo, estudos preliminares com o I-TREE CANOPY se fazem muito eficazes, mas, para um dimensionamento mais detalhado e aprofundado, estudos com o I-TREE ECO 2018 V6 podem contribuir mais para com as tomadas de decisões, pois possibilitam, ao usuário,

cadastrar individualmente cada espécie de árvore, respeitando suas particularidades e, assim, pode compreender o real benefício gerado pela determinada espécie em particular, viabilizando, assim, a escolha de espécies que absorvem mais poluentes em locais com menos espaço para plantio. Uma possibilidade seria identificar qual é o principal poluente em determinado local por meio de uma varredura de solventes em micro ou mesoescala para, depois explorar a espécie com capacidade de sequestro de tal poluente.

REFERÊNCIAS

AHERN, J. Green Infrastructure for Cities: The Spatial Dimension. *In*: NOVOTNY, V.; BROWN, P. **Cities of the Future** – Towards Integrated Sustainable Water Landscape Management. Londres: WA Publishing, 2007.

AIRNOW. **Air Quality Guide for Ozone**. 2015. Disponível em: https://www.airnow.gov/sites/default/files/2021-03/air-quality-guide_ozone_2015.pdf. Acesso em: 30 nov. 2021.

AIRNOW. **Air Quality Index (AQI) Basics**. 2021. Disponível em: <https://www.airnow.gov/aqi/aqi-basics/>. Acesso em: 30 nov. 2021.

AIRNOW. **Guia de la calidad del aire sobre el ozono**. 2021. Disponível em: <https://www.airnow.gov/publications/air-quality-flag-program-en-espanol/guia-del-ozono/>. Acesso em: 30 nov. 2021.

ALBALAK, R., FRISANCHO, A. R.; KEELER, G. J. Domestic biomass fuel combustion and chronic bronchitis in two rural Bolivian villages. **Thorax**, v. 54, n. 11, p. 1004-1008, 1999.

ALIZADEH-CHOOBARI, O. et al. Temporal and spatial variations of particulate matter and gaseous pollutants in the urban area of Tehran. **Atmospheric Environment**, v. 141, p. 443-453, 2016.

ANDRADE, R. T. G. de. **A pegada de carbono como um dos indicadores de sustentabilidade para medição da responsabilidade socioambiental empresarial: um estudo de caso na unidade sede da Petrobrás em Natal - RN**. 2010. 214f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia de Produção) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2010.

ANJOS, M.; LOPES, A.; ALVES, E. Uso dos modelos CAL3QHC e I-Tree Canopy na avaliação da qualidade do ar em Aracaju: estimativas das concentrações de PM10 nas vias de tráfego intenso de automóveis. **GEOUSP Espaço e Tempo** (Online), v. 22, n. 3, p. 707-728, 2018.

ANSARI, M.; EHRAMPOUSH, M. H. Meteorological correlates and AirQ+ health risk assessment of ambient fine particulate matter in Tehran, Iran. **Environmental research**, v. 170, p. 141-150, 2019.

ARBEX, M. A. et al. A poluição do ar e o sistema respiratório. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, v. 38, p. 643-655, 2012.

ARBEX, M. A. et al. Queima de biomassa e efeitos sobre a saúde. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, v. 30, n. 2, p. 158-175, 2004.

BAIRD, C.; CANN, M. **Química Ambiental**. 4ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.

BAKLANOV, A., MOLINA, L. T.; GAUSS, M. Megacities, air quality and climate. **Atmospheric Environment**, v. 126, p. 235-49, 2016.

BARROS, H. R.; LOMBARDO, M. A. A ilha de calor urbana e o uso e cobertura do solo no município de São Paulo-SP. **GEOUSP Espaço e Tempo (Online)**, v. 20, n. 1, p. 160-177, 2016.

BARTHOLOMEU, D. B.; PÉRA, T. G.; CAIXETA-FILHO, J. V. Logística sustentável: avaliação de estratégias de redução das emissões de CO2 no transporte rodoviário de cargas. **Journal of Transport Literature**, v. 10, p. 15-19, 2016.

BASCOM, R. et al. State Of The Art. Health Effects Of Outdoor Pollution. **Am. J. Respir. Crit. Care Med.**, v. 153, n. 1, p. 3-50, 1996.

BASEMAP RBI. **Mapa Base da Terra Indonésia**. 2021. Disponível em: <http://basemap.big.go.id/rbi/>. Acesso em: 30 nov. 2021.

BEATLEY, T. **Green Urbanism**. Washington: Island Press, 2006.

BENEDICT, M, A.; MCMAHON, E. T. **Green Infrastructure – Linking Landscapes and Communities**. Washington: Island Press, 2006.

BERTAZOLLI, A. L.; BELLINI, F. L.; GALLO, G. I. **Estudo da viabilidade do biomonitoramento do ozônio troposférico**. 2009. Monografia (Especialista em Gestão Ambiental) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2009.

BEŞE, E., & FRIDAY, H. The Effect of the Kyoto Protocol on Developed and Developing Countries. **Australian Journal of Business and Management Research**, v. 6, n. 1, p. 42-59. 2021.

BIANCHI, E. et al. Graviton propagator in loop quantum gravity. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 5, n. 2, p. 57-62, 2006.

BOUTAUD, A.; GONDRAN, N. **L'Empreinte Écologique**. Paris: L'Empreinte Écologique, 2009.

BRAGA, A. L. F et al. Health effects of air pollution exposure on children and adolescents in São Paulo, Brazil. **Pediatric pulmonology**, v. 31, n. 2, p. 106-113, 2001.

BRAGA, A. L. F. et al. Associação entre poluição atmosférica e doenças respiratórias e cardiovasculares na cidade de Itabira, Minas Gerais, Brasil. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 23, p. S570-S578, 2007.

BRANDÃO, A. M. de P. M. Clima Urbano e Enchentes na Cidade do Rio de Janeiro. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. **Impactos Ambientais Urbanos no Brasil**. Rio de Janeiro: Editora Bertrand Brasil Ltda, 2004. pp. 47-109

BRANDÃO, E. J. **Neutralização de emissão de gases de efeito estufa**: um indicador de desenvolvimento sustentável nas responsabilidades socioambiental empresarial e individual. Eraldo Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008.

BRANDER, M. **Greenhouse Gases, CO₂, CO₂e, and Carbon: What Do All These Terms Mean?** *Econometrica, White Papers*, 2012. Disponível em: <https://ecometrica.com/greenhouse-gases-co2-co2e-and-carbon-what-do-all-these-terms-mean/>. Acesso em: 30 nov. 2021.

BRASIL Lei N° 6938/81. **Política nacional de meio ambiente**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938compilada.htm. Acesso em :15 jan. 2021.

BRASIL, **CONAMA n°01 , de 23 de janeiro de 1986**. Definições Critérios e Diretrizes para avaliação de Impacto Ambiental. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/res/res86/res0186.html>. Acesso em: 08 ago. 2019.

BRASIL, **Norma de higiene ocupacional**: procedimento técnico – coleta de material particulado sólido n° 08 (NHO – 08 Fundacentro). São Paulo, 2009.

BRASIL. **Constituição Federal de 1988**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm. Acesso em: 07 jun. 2021.

BRASIL. **Inventário de emissões de gases de efeito estufa - GEE**. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior Superintendência da Zona Franca de Manaus, Fiam 2009. Disponível em: https://www.gov.br/suframa/pt-br/publicacoes/copy_of_InventriodeEmissesdeGasesEfeitoEstufaGEE.pdf. Acesso em: 30 nov. 2021.

BRASIL. Lei N° 16.802, de 17 de janeiro de 2018. **Dá nova redação ao art. 50 da Lei n° 14.933/2009, que dispõe sobre o uso de fontes motrizes de energia menos poluentes e menos geradoras de gases do efeito estufa na frota de transporte coletivo urbano do Município de São Paulo, e dá outras providências**.

BRASIL. Lei N° 6938/81. **Política nacional de meio ambiente**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938compilada.htm. Acesso em: 15 jan. 2021.

BRASIL. **Secretaria paulista de meio ambiente 2021. Plano municipal de arborização urbana.** Disponível em: https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/meio_ambiente/arquivos/pmau/PMAU_texto_final.pdf. Acesso em: 07 jun. 2021.

BRIGGS, N. L.; LONG, C. M. Critical review of black carbon and elemental carbon source apportionment in Europe and the United States. **Atmospheric Environment**, v. 144, p. 409-427, 2016.

BRITO, G. F. S.; SODRÉ, F. F.; ALMEIDA, F. V O. Impacto do Material Particulado na Qualidade do Ar. **Revista Virtual de Química**, v. 10, n. 5, p. 1335-1354, 2018.

BRITO, J. M. de. **Toxicidade cardiovascular e inflamatória aguda induzida pela inalação de partículas dos combustíveis diesel e biodiesel.** 2009. 130f. Dissertação (Mestrado em Ciências Médicas) - Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2009.

BRUNEKREEF, B.; HOLTGATE, S T. Air pollution and health. **The lancet**, v. 360, n. 9341, p. 1233-1242, 2002.

BUCKERIDGE, M. Árvores urbanas em São Paulo: planejamento, economia e água. **Estudos Avançados**, v. 29, n. 84, p. 85-101, 2015.

BÜNGER, J. et al. Cytotoxic and mutagenic effects, particle size and concentration analysis of diesel engine emissions using biodiesel and petrol diesel as fuel. **Archives of toxicology**, v. 74, n. 8, p. 490-498, 2000.

CANÇADO, J. E. D. et al. Repercussões clínicas da exposição à poluição atmosférica. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, v. 32, p. S5-S11, 2006.

CARDOSO, N. C. et al. Avaliação do Teor de Material Particulado Atmosférico inalável (MP10) na Região Metropolitana de Porto Alegre no Período 2010–2012. In: **IX Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental**, 2014.

CARLIER, P.; HANNACHI, H.; MOUVIER, G. The chemistry of carbonyl compounds in the atmosphere—A review. **Atmospheric Environment** (1967), v. 20, n. 11, p. 2079-2099, 1986.

CAS. Cas Registry. 2021. Disponível em: <https://www.cas.org/cas-data/cas-registry>. Acesso em: 30 nov. 2021.

CASTRO, A.; GOLDENFUM, J. **Uso de telhados verdes no controle qualitativo do escoamento superficial urbano.** Agosto de 2008. Disponível em: <https://ecotelhado.com/wp-content/uploads/2015/03/ESCOAMENTO-SUPERFICIAL-URBANO.pdf>. Acesso em: 02 abr. 2021.

CDC. **Sulfur Dioxide - Method 6004.** 1994. Disponível em: <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2003-154/pdfs/6004.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2021.

CDP. **Carbon Disclosure Project**. Disponível em: [https:// b8f65cb373b1b7b15feb-c70d8ead6ced550b4d987d7c03fcdd1d.ssl.cf3.rackcdn.com/cms/reports/documents/000/002/327/original/Carbon- Majors-Report-2017.pdf?1499866813/](https://b8f65cb373b1b7b15feb-c70d8ead6ced550b4d987d7c03fcdd1d.ssl.cf3.rackcdn.com/cms/reports/documents/000/002/327/original/Carbon-Majors-Report-2017.pdf?1499866813/). Acesso em: 17 out. 2020.

CENTRO CULTURAL DE SÃO PAULO. **História**. 2021. Disponível em: <http://centrocultural.sp.gov.br/historia/>. Acesso em: 30 nov. 2021.

CET. **Classificação viária das ruas**. 2019. Disponível em: <http://www.cetsp.com.br/consultas/classificacao-viaria.aspx>. Acesso em: 30 nov. 2021.

CETESB, **Companhia Ambiental do Estado de São Paulo-Poluentes**. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/poluentes/>. Acesso em: 08 out. 2019.

CETESB. **Gases do Efeito Estufa e Fontes de Emissão**. 2021. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/proclima/gases-do-efeito-estufa/>. Acesso em: 30 nov. 2021.

CETESB. **Ozônio Troposférico**. 2021. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/solo/biomonitoramento/ozonio-troposferico/>. Acesso em: 30 nov. 2021.

CHAN, W. N. **Quantificação e redução de emissões de gases de efeito estufa em uma refinaria de petróleo**. 2006. 138f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2006.

CHEN, W. et al. Multichannel characteristics of absorbing aerosols in Xuzhou and implication of black carbon. **Science of The Total Environment**, v. 714, 2020.

CHICAGO. **Cultural Affairs and Special Events**. 2021. Disponível em: https://www.chicago.gov/city/en/depts/dca/supp_info/millennium_park.html. Acesso em: 30 nov. 2021.

COELHO NETTO, A. L. A interface florestal-urbana e os desastres naturais relacionados à água no maciço da tijuca: desafios ao planejamento urbano numa perspectiva sócio-ambiental. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 16, p. 46-60, 2005.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA nº 3, de 28 de junho de 1990. Dispõe sobre os padrões da qualidade do ar e os poluentes atmosféricos**.

COSTA, D. F. da; SILVA, H. R.; PERES, Leonardo de F. Identificação de ilhas de calor na área urbana de Ilha Solteira-SP através da utilização de geotecnologias. **Engenharia Agrícola**, v. 30, p. 974-985, 2010.

COSTA, J. M. M.; COSTA, F. T. M. Emissões de poluentes na produção de veículos convencionais e elétricos. *In: XI Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP*, 2020.

DE FELIPE BOENTE, I.; ESCRIBANO, J. B. La Naturacion Urbana: una apuesta para la mejora medioambiental de nuestro entorno. **Manual formativo de ACTA**, n. 57, p. 29-38, 2010.

DE MENESES, B. U-L. Naturación urbana, un desafío a la urbanización. **Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente**, v. 19, n. 2, p. 225-235, 2013.

ECYCLE. **Externalidades positivas e negativas**. Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/externalidades/>. Acesso em: 17 jan. 2021.

ELSON, D. M. **Atmospheric pollution: a global problem**. 2ª ed. Oxford: Blackwell, 1992.

ENDRENY, T. et al. Implementing and managing urban forests: A much needed conservation strategy to increase ecosystem services and urban wellbeing. **Ecological Modelling**, v.360, n.24, p.328-35, 2017.

EPA. **Carbon Monoxide (CO) Pollution in Outdoor Air**. 2021. Disponível em: <https://www.epa.gov/co-pollution/basic-information-about-carbon-monoxide-co-outdoor-air-pollution#What%20is%20CO://>. Acesso em: 30 nov. 2021.

EPA. **Nitrogen Dioxide (NO₂) Pollution**. 2021. Disponível em: <https://www.epa.gov/no2-pollution/basic-information-about-no2#What%20is%20NO2%20NO2>. Acesso em: 30 nov. 2021.

EPA. **U.S. Environmental Protection Agency**. 2021. Disponível em: <https://www.epa.gov/>. Acesso em: 30 nov. 2021.

ESTRADA, F.; BOTZEN, W. J. W.; TOL, R. S. J. A global economic assessment of city policies to reduce climate change impacts. **Nature Climate Change**, v.7, p. 403-406, 2017.

FAJARDY, M.; MAC DOWELL, N. Recognizing the value of collaboration in delivering carbon dioxide removal. **One Earth**, v. 3, n. 2, p. 214-225, 2020.

FANG, T. et al. PM 2.5 water-soluble elements in the southeastern United States: automated analytical method development, spatiotemporal distributions, source apportionment, and implications for health studies. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 15, n. 20, p. 11667-11682, 2015.

FIALHO, E. S. Ilha de Calor: Reflexões acerca de um conceito (Heat island: reflections on a concept). **Acta Geográfica**, p. 61-76, 2012.

FINLAYSON-PITTS, B. J.; PITTS, J. N. P. Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere. **Academic Press**, San Diego, 2000.

FOLBERTH, G. A. et al. Megacities and climate change – A brief overview. **Environmental Pollution**, v.2 03, p.235-42, 2015.

FREITAS, E. D. de. et al. A simple photochemical module implemented in RAMS for tropospheric ozone concentration forecast in the metropolitan area of Sao Paulo, Brazil: Coupling and validation. **Atmospheric Environment**, v. 39, n. 34, p. 6352-6361, 2005.

FUNDACENTRO. **Biblioteca digital**. 2021. Disponível em: <http://antigo.fundacentro.gov.br/biblioteca/biblioteca-digital>. Acesso em: 30 nov. 2021.

G1. **Moradores do Minhocão vão à Justiça para retirar os jardins verticais sem manutenção na parede dos prédios**. 2019. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2019/07/13/moradores-do-minhocao-vaio-a-justica-para-retirar-os-jardins-verticais-sem-manutencao-na-parede-dos-predios.ghtml>. Acesso em: 30 nov.2021.

GESTIS. **Banco de dados de substâncias GESTIS - Dióxido de nitrogênio**. 2021. Disponível em: <https://gestis.dguv.de/data?name=001090&lang=en>. Acesso em: 30 nov. 2021.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. **Energia, Meio Ambiente & Desenvolvimento**. 3ª ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2008.

GRIMM, N. B. et al. Global change and ecology of cities. **Science**, v.319, n.5864, p.756-60, 2008.

HEDLEY, A. J. et al. Cardiorespiratory and all-cause mortality after restrictions on sulphur content of fuel in Hong Kong: an intervention study. **The Lancet**, v. 360, n. 9346, p. 1646-1652, 2002.

HERNÁNDEZ, C. G D. **Estudio del Carbono Negro (Black Carbon) contenido en partículas suspendidas en ambientes urbanos (tesis de posgrado)**. Centro de Investigación en Materiales Avanzados, SC México, 2016.

HERZOG, C. P. **Guaratiba Verde: subsídios para o projeto de infra-estrutura verde em área de expansão urbana na cidade do Rio de Janeiro**. 2009. 182f. Dissertação (Mestrado em Urbanismo) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2009.

HERZOG, C. P.; ROSA, L. Z. Infraestrutura verde: sustentabilidade e resiliência para a paisagem urbana. **Revista Labverde**, n. 1, p. 92-115, 2010.

HIRABAYASHI, S. i-Tree Canopy air pollutant removal and monetary value model descriptions. **The Davey Institute**, Syracuse, New York, 2014.

HIRABAYASHI, S.; NOWAK, D. J. Comprehensive national database of tree effects on air quality and human health in the United States. **Environmental Pollution**, v. 215, p. 48-57, 2016.

IBGE. **Frota de veículos.** 2021. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/pesquisa/22/28120>. Acesso em: 30 nov. 2021.

IGNATIEVA, M. Planning and design of ecological networks in urban areas. Palestra no URBIO 2010 – Conferência de Biodiversidade Urbana e Projeto. *In: Proceedings of the 2nd International Conference of Urban Biodiversity and Design*, 2010.

INSTITUTE FOR GOVERNANCE & SUSTAINABLE DEVELOPMENT. **A redução do Carbono Negro pode ser a estratégia mais rápida para diminuir a velocidade da mudança climática.** 2008.

INSTITUTO DO AMBIENTE. **Qualidade do ar.** 2007. Disponível em: <https://web.archive.org/web/20070827152719/http://www.qualar.org/?page=5&subpage=8>. Acesso em: 30 nov. 2021.

IPCC. **Painel intergovernamental sobre mudanças climáticas.** Disponível em: www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/07/SPM-Portuguese-version.pdf. Acesso em: 12 out. 2020.

I-TREE, **I-TREE CANOPY.** Disponível em: <https://canopy.itreetools.org/map>. Acesso em: 27 dez. 2020.

LACK, D. A. et al. Characterizing elemental, equivalent black, and refractory black carbon aerosol particles: a review of techniques, their limitations and uncertainties. **Analytical and bioanalytical chemistry**, v. 406, n. 1, p. 99-122, 2014.

LI, H.; QIN, Y.; FENG, G. The analysis of PM_{2.5} outdoor fine particulate matter impact on air quality in the university libraries reading room in winter of North China. **Procedia Engineering**, v. 205, p. 3346-3352, 2017.

LÍRIO, U.; PORTELLA, A. Bibliometric overview of carbon and particulate matter control and emissions. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, v. 9, n. 70, 2021.

LOCOSSELLI, G. M. et al. Tree rings reveal the reduction of Cd, Cu, Ni and Pb pollution in the central region of São Paulo, Brazil. **Environmental Pollution**, v. 242, p.320-8328, 2018.

LUI, E. S. et al. X-018: avaliação da evolução temporal dos níveis de concentração de MP₁₀ na cidade de São Carlos, SP. *In: 30º Congresso ABES*, 2019.

MA, N.; BIRMILI, W. Estimating the contribution of photochemical particle formation to ultrafine particle number averages in an urban atmosphere. **Science of the Total Environment**, v. 512, p. 154-166, 2015.

MANKIW, N. G. **Introdução a economia externalidades.** São Paulo: Editora Cengage do Brasil, 2019.

MARTINS, L. C. et al. Poluição atmosférica e atendimentos por pneumonia e gripe em São Paulo, Brasil. **Revista de Saúde Pública**, v. 36, p. 88-94, 2002.

MAYA, M. del. P. A. et al. Remoción de contaminantes atmosféricos por el bosque urbano en el valle de Aburrá [Air pollution removal by the urban forest in the Aburra Valley]. **Colombia Forestal**, v. 22, n. 1, p. 5-16, 2018.

MDHS. **General methods for sampling and gravimetric analysis of respirable, thoracic and inhalable aerosols**. 2014. Disponível em: <https://www.hse.gov.uk/pubns/mdhs/pdfs/mdhs14-4.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2021.

MELO, T. C. et al. C. Fator de Reatividade dos Gases de Escapamento para Formação de Ozônio–Metodologia e Resultados de Veículos Nacionais com Gasolina e GNV. *In: XXI Simpósio Internacional de Engenharia Automotiv – SIMEA*, 2013.

METRÔ SÃO PAULO. **Banco de dados das pesquisas origem e destino anteriores e pesquisas de mobilidade**. 2017. Disponível em: <http://www.metro.sp.gov.br/pesquisa-od/resultado-das-pesquisas.aspx>. Acesso em: 30 nov. 2021.

METRÔ SÃO PAULO. **Pesquisa de mobilidade da Região Metropolitana de São Paulo**. 2013. Disponível em: http://www.metro.sp.gov.br/pesquisa-od/arquivos/Pesquisa_Afericao_2012_Sumario_de_Dados.pdf. Acesso em: 30 nov. 2021.

METRÔ TATUAPÉ. Circulação de pessoas. 2021. Disponível em: <http://www.metro.sp.gov.br/sua-viagem/linha-3-vermelha/estacao-tatuape.aspx>. Acesso em: 30 nov. 2021.

MEYERSON, F. A. B.; MERINO, L.; DURAND, J. Migration and environment in the context of globalization. **Frontiers in Ecology and Environment**, v. 5, n. 4, p.182-90, 2004.

MILLS, G. et al. The green ‘signature’ of Irish cities: an examination of the ecosystem services provided by trees using iTree Canopy software. **Irish Geography**, v. 48, p. 62-77, 2015.

MISSAGIA, S. et al. Avaliação do pico de fluxo expiratório em adolescentes e sua associação com material particulado em uma cidade brasileira de médio porte. **Revista Brasileira de Epidemiologia**, v. 21, 2018.

MMA, **Ministério do Meio Ambiente**. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/agenda-ambiental-urbana.html/>. Acesso em: 31 ago. 2020.

MMA/CONAMA, 1990. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res90/res0390.html>. Acesso em: 12 jul. 2020.

MOREIRA, T. C. L. et al. Intra-urban biomonitoring: source apportionment using tree barks to identify air pollution sources. **Environmental International**, v. 91, p. 271-275, 2016.

NAVARRETE, G. et al. La isla de calor estival en Temuco, Chile. **Papeles de Geografía**, n. 33, p. 49-60, 2001.

NEWMAN, P.; JENNINGS, I. **Cities as Sustainable Ecosystems - Principles and Practice**. Washington: Island Press, 2008.

NIOSH. **Manual of Analytical Methods (NMAM)**. Particulates not otherwise regulated, respirable: Method 0600. 1998. Disponível em: <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2003-154/pdfs/0600.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2021.

NOBRE, C. A. **Fundamentos científicos das mudanças climáticas**. São José dos Campos, SP: Rede Clima/INPE, 2012. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/proclima/wp-content/uploads/sites/36/2014/05/nobre_reid_veiga_fundamentos_2012.pdf. Acesso em: 30 nov. 2021.

NOWAK, D. J. et al. Air pollution removal by urban forests in Canada and its effect on air quality and human health. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 29, p. 40-48, 2018.

NOWAK, D. J.; CRANE, D. E.; STEVENS, J. C. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. **Urban forestry & urban greening**, v. 4, n. 3-4, p. 115-123, 2006.

NÚÑEZ, X. C.; RUIZ, L. V.; GARCÍA, C. G. Black carbon and organic carbon emissions from wildfires in Mexico. **Atmósfera**, v. 27, n. 2, p. 165-172, 2014.

ODE. METRO. **A mobilidade urbana da região metropolitana de São Paulo em detalhes**. 2019. Disponível em: http://www.metro.sp.gov.br/pesquisa-od/arquivos/Ebook%20Pesquisa%20OD%202017_final_240719_versao_4.pdf. Acesso em: 30 nov. 2021.

OKE, T. R. The energetic basis of the urban heat island. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 108, n. 455, p. 1-24, 1982.

OMODIOR, O.; EZE, P.; ANDERSON, K. R. Using i-tree canopy vegetation cover subtype classification to predict peri-domestic tick presence. **Ticks and Tick-borne Diseases**, v. 12, n. 3, p. 101684, 2021.

OMS OPAS. Disponível em: <https://www.paho.org/pt/search/r?keys=externalidades>. Acesso em: 15 jan. 2021.

ONU CPO25. **ONU News**. Disponível em: <https://news.un.org/pt/story/2019/12/1697531/>. Acesso em: 12 out. 2020.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. **Guia de qualidade do ar da OMS relativo ao material particulado, ozônio, dióxido de nitrogênio e dióxido de enxofre**. 2006.

OSHA. **Alphabetic Index of Sampling and Analytical Methods - O**. 2014. Disponível em: <https://www.osha.gov/chemicaldata/methods?letter=O>. Acesso em: 30 nov. 2021.

OSHA. **Carbon monoxide in worplace atmospheres ID-172**. Disponível em: <https://www.osha.gov/sites/default/files/methods/id-172.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2021.

OSHA. **Carbon monoxide in worplace atmospheres ID-210**. 2010. Disponível em: <https://www.osha.gov/sites/default/files/methods/id-210.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2021.

OSHA. **Nitric Oxide in Workplace Atmospheres ID-190**. 1991. Disponível em: <https://www.osha.gov/sites/default/files/methods/OSHA%20ID-190%20combined.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2021.

OSHA. **Nitrogen Dioxide in wokplace atmospheres (ion chromatography) - ID-182**. 1991. Disponível em: https://www.osha.gov/sites/default/files/methods/id182_0.pdf. Acesso em: 30 nov. 2021.

OSHA. **Ozone in worplace atmospheres (impregnated glass fiber filter) ID-214**. 2014. Disponível em: <https://www.osha.gov/sites/default/files/methods/id214.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2021.

OWEN, D. **Green Metropolis**. Nova Iorque: Riverhead Books, 2009.

OZDEMIR, H. et al. Spatial and temporal analysis of black carbon aerosols in Istanbul megacity. **Science of the total environment**, v. 473, p. 451-458, 2014.

PEIXOTO, N.; FERREIRA, L. **Higiene Ocupacional III**. Santa Maria, RS: Rede e-Tec Brasil, 2013.

PEREZ, M. O. **Sustainable smart city**. Editora Springer International Publishing 2017.

PETZOLD, A. et al. Recommendations for reporting" black carbon" measurements. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 13, n. 16, p. 8365-8379, 2013.

PODHAJSKA, E. et al. Structural and parametric aspects of plant barriers as a passive method for improving urban air quality. **City and Environment Interactions**, v. 8, p. 100048, 2020.

PREFEITURA DE SÃO PAULO. Disponível em: http://geosampa.prefeitura.sp.gov.br/PaginasPublicas/_SBC.aspx. Acesso em: 30 nov. 2021.

PRONAR. Resolução CONAMA N° 5, de 15 de junho de 1989. Disponível em: http://www.suape.pe.gov.br/images/publicacoes/resolucao/Resolu%C3%83%C2%A7%C3%83%C2%A3o_CONAMA_005.1989.pdf. Acesso em: 30 nov. 2021.

RAHARJO, A. P. The use of onlibe web-based software I-TREE canopy as an alternative in supporting community based zero delta Q planning. **Jurnal Alami: Jurnal Teknologi Reduksi Risiko Bencana**, v. 2, n. 2, p. 120-130, 2018.

RIBAS, W. F. et al. Influência do combustível (diesel e biodiesel) e das características da frota de veículos do transporte coletivo de Curitiba, Paraná, nas emissões de NOx. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, p. 437-445, 2016.

ROJAS, J. A.; DHAR, A.; NAETH, M. A. Urban Naturalization for Green Spaces Using Soil Tillage, Herbicide Application, Compost Amendment and Native Vegetation. **Land**, v. 10, n. 8, p. 854, 2021.

ROLA, S. M. **A naturalização como ferramenta para a sustentabilidade de cidades: estudo da capacidade do sistema de naturalização em filtrar a água de chuva**. 2008. 222f. Tese (Doutorado em Ciências em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2008.

RUNNALLS, K. E.; OKE, T. R. Dynamics and controls of the near-surface heat island of Vancouver, British Columbia. **Physical Geography**, v. 21, n. 4, p. 283-304, 2000.

RYU, J. et al. Removal of fine particulate matter (PM_{2.5}) via atmospheric humidity caused by evapotranspiration. **Environmental Pollution**, v. 245, p. 253-259, 2019.

SÁ NETO, M. de. et al. Análise da concentração de partículas totais em suspensão (dióxido de enxofre e dióxido de nitrogênio): um estudo de caso no Município de Ananindeua, Estado do Pará, Norte do Brasil. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 5, n. 10, p. 575-586, 2018.

SALDIVA, P. H. N et al. Association between air pollution and mortality due to respiratory diseases in children in São Paulo, Brazil: a preliminary report. **Environmental research**, v. 65, n. 2, p. 218-225, 1994.

SALDIVA, P. H. N et al. Lung inflammation induced by concentrated ambient air particles is related to particle composition. **American journal of respiratory and critical care medicine**, v. 165, n. 12, p. 1610-1617, 2002.

SALDIVA, P. H. N. et al. Air pollution and mortality in elderly people: a time-series study in Sao Paulo, Brazil. **Archives of Environmental Health: An International Journal**, v. 50, n. 2, p. 159-163, 1995.

SANTOS, D. R. F. dos. et al. Sazonalidade do material particulado fino e black carbon no ar ambiente de Londrina/Paraná. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 10, p. 84069-84086, 2020.

SANTOS, F. S. dos. et al. Avaliação da influência das condições meteorológicas na concentração de material particulado fino (MP2, 5) em Belo Horizonte, MG. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 24, n. 2, p. 371-381, 2019.

SCHWARTZ, J.; DOCKERY, D. W. Increased mortality in Philadelphia associated with daily air pollution concentrations. **American review of respiratory disease**, v. 145, n. 3, p. 600-604, 1992.

SEADE. **São Paulo diversa**: uma análise a partir de regiões da cidade. Pesquisa SEADE, 2020. Disponível em: <https://trajetoriasocupacionais.seade.gov.br/wp-content/uploads/sites/6/2021/05/sp-diversa-analise-regioes-cidade.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2021.

SECRETARIA DE GESTÃO URBANA. Disponível em <https://gestaourbana.prefeitura.sp.gov.br/marco-regulatorio/plano-diretor/>. Acesso em: 20 jul. 2021.

SECRETARIA DE MOBILIDADE URBANA E TRANSPORTES. **Plano de mobilidade urbana de São Paulo**. Disponível em: https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/chamadas/planmobsp_v072_1455546429.pdf. Acesso em: 04 jan. 2021.

SECRETARIA DO VERDE E DO MEIO AMBIENTE (SVMA). **Manual técnico de arborização urbana**. 2015. Disponível em: https://cms.sosma.org.br/wp-content/uploads/2015/03/MANUAL-ARBORIZACAO_22-01-15_.pdf. Acesso em: 30 nov. 2021.

SECRETARIA MUNICIPAL DE URBANISMO. **Acesso à informação**. 2021. Disponível em: https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/licenciamento/acesso_a_informacao/. Acesso em: 30 nov. 2021.

SEEG BRASIL. **Entenda as estimativas**. 2020. Disponível em: <https://seeg.eco.br/entenda-as-estimativas>. Acesso em: 30 nov. 2021.

SEGALIN, B.; GONÇALVES, F. L. T.; FORNARO, A. Black Carbon em material particulado nas residências de idosos na Região Metropolitana de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 3, p. 311-318, 2016.

SELOKAR, A. et al. PM 2.5 particulate matter and its effects in Delhi/NCR. **Materials Today: Proceedings**, v. 33, p. 4566-4572, 2020.

SETO, K. C.; FRAGKIAS, M.; GÜNERALP, B. A meta-analysis of global urban land expansion. **Plos One**, v.6, p.e23777, 2011.

SHIRMOHAMMADI, F. et al. Oxidative potential of on-road fine particulate matter (PM_{2.5}) measured on major freeways of Los Angeles, CA, and a 10-year comparison with earlier roadside studies. **Atmospheric Environment**, v. 148, p. 102-114, 2017.

SILVA, C. B. da.; EVASO, A. S. Análise espaço-temporal da concentração de ozônio na região norte da cidade de São Paulo. **INOVAE-Journal of Engineering, Architecture and Technology Innovation (ISSN 2357-7797)**, v. 5, n. 2, p. 59-79, 2017.

SILVA, E. M. F. da et al. Um novo ecossistema: florestas urbanas construídas pelo Estado e pelos ativistas. **Estudos Avançados**, v. 33, n. 97, p. 81-102, 2019.

SOTTO, D. et al. Sustentabilidade urbana: dimensões conceituais e instrumentos legais de implementação. **Estudos Avançados**, v. 33, n. 97, p. 61-80, 2019.

SOUSA, D. M. L. de. **Caracterização da área urbana por concentração de NO₂**. 2017. 69 f. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2017.

STRAPASSON, D. C.; FREITAS, M. do C. D.; SANTOS, A. dos. Estudo Comparativo do Consumo Energético do Telhado Convencional e Verde Leve em uma edificação. *In: 5º Encontro de Engenharia e Tecnologia dos Campos Gerais*, 2010.

SÜMEGHY, Z.; UNGER, J. Seasonal case studies on the urban temperature cross-section. **Acta Climatologica et Chorologica, Szeged**, v. 36, p. 101-109, 2003.

TIWARY, A. et al. An integrated tool to assess the role of new planting in PM₁₀ capture and the human health benefits: A case study in London. **Environmental Pollution**, v. 157, n. 10, p. 2645-2653, 2009.

UNITED NATIONS. **Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development**. 2015. Tradução do Centro de Informação das Nações Unidas para o Brasil. Rio de Janeiro: UNIC Rio, 2015.

URBANO-LÓPEZ, B. de. M. Greening, an urbanization coping mechanism. **Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente**, v. 19, n. 2, p. 225-236, 2013.

van DEN HOVE, A. et al. Development of a land use regression model for black carbon using mobile monitoring data and its application to pollution-avoiding routing. **Environmental research**, v. 183, 2020.

VECCHIA, F. Cobertura verde leve (CVL): ensaio experimental. *In: VI Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído (ENCAC) e IV Encontro Latino-americano sobre Conforto no Ambiente Construído (ELACAC)*, 2005.

VENTURA, M. M. O estudo de caso como modalidade de pesquisa. **Revista SoCERJ**, v. 20, n. 5, p. 383-386, 2007.

WANG, C. et al. Estimation of the effects of ambient air pollution on life expectancy of urban residents in China. **Atmospheric environment**, v. 80, p. 347-351, 2013.

WIKIPEDIA. **Monóxido de carbono**. 2020. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Mon%C3%B3xido_de_carbono. Acesso em: 30 nov. 2021.

WIKIPEDIA. **Óxido nítrico**. 2021. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/%C3%93xido_n%C3%ADtrico. Acesso em: 30 nov. 2021.

WU, H. et al. Bioremediation and nutrient migration during blooms of *Ulva* in the Yellow Sea, China. **Phycologia**, v. 57, n. 2, p. 223-231, 2018.

XU, F. et al. Investigation of the chemical components of ambient fine particulate matter (PM_{2.5}) associated with in vitro cellular responses to oxidative stress and inflammation. **Environment international**, v. 136, 2020.

YAMINEVA, Y.; LIU, Z. Cleaning the air, protecting the climate: Policy, legal and institutional nexus to reduce black carbon emissions in China. **Environmental Science & Policy**, v. 95, p. 1-10, 2019.

ZHAO, M. et al. Impacts of urban forests on offsetting carbon emissions from industrial energy use in Hangzhou, China. **Journal of environmental management**, v. 91, n. 4, p. 807-813, 2010.

ZHENG, X. et al. Characteristics of black carbon emissions from in-use light-duty passenger vehicles. **Environmental Pollution**, v. 231, p. 348-356, 2017.