

Sistema FIEB



CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC  
MESTRADO PROFISSIONAL EM DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

CLARA RODRIGUES PEREIRA

AVALIAÇÃO DO IMPACTO NA SAÚDE DE INDIVÍDUOS  
EXPOSTOS AO MATERIAL PARTICULADO EMITIDO NA  
EXAUSTÃO VEICULAR

Salvador

2020

Clara Rodrigues Pereira

AVALIAÇÃO DO IMPACTO NA SAÚDE DE INDIVÍDUOS  
EXPOSTOS AO MATERIAL PARTICULADO EMITIDO NA  
EXAUSTÃO VEICULAR

Defesa de mestrado apresentada ao Mestrado Profissional de Desenvolvimento Sustentável do Centro Universitário SENAI CIMATEC como requisito final para a obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento Sustentável

Orientadora: Prof. Dr. Lilian Lefol Nani Guarieiro

Salvador  
2020

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do Centro Universitário SENAI CIMATEC

P436a Pereira, Clara Rodrigues

Avaliação do impacto na saúde de indivíduos expostos ao material particulado emitido na exaustão veicular / Clara Rodrigues Pereira. – Salvador, 2020.

84 f. : il. color.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Lilian Lefol Nani Guarieiro .

Dissertação (Mestrado Profissional em Desenvolvimento Sustentável) – Programa de Pós-Graduação, Centro Universitário SENAI CIMATEC, Salvador, 202.

Inclui referências.

1. Material particulado. 2. Exaustão veicular. 3. Deposição pulmonar. 4. Multiple-path Particle Model. I. Centro Universitário SENAI CIMATEC. II. Guarieiro, Lilian Lefol Nani. III. Título.

CDD 363.1

CLARA RODRIGUES PEREIRA  
AVALIAÇÃO DO IMPACTO NA SAÚDE DE INDIVÍDUOS  
EXPOSTOS AO MATERIAL PARTICULADO EMITIDO NA  
EXAUSTÃO VEICULAR

Defesa apresentada como requisito final para a obtenção do título de Mestre em  
Desenvolvimento Sustentável Centro Universitário SENAI CIMATEC.

Banca Examinadora

Lílian Lefol Nani Guarieiro – Orientador  
Doutora em 2010 pela Universidade de Federal da Bahia, Salvador, Brasil  
Centro Universitário SENAI CIMATEC

Membro interno da Banca Davidson Martins Moreira  
Doutor em 2000 de Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul, Brasil  
Centro Universitário SENAI CIMATEC

Membro externo da Banca Sérgio Machado Corrêa  
Doutor em Físico-Química  
Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Brasil.

Membro Suplente da Banca Erick Giovanni Sperandio Nascimento  
Doutor em 2016 pela Universidade Federal do Espírito Santo, UFES, Brasil.  
Centro Universitário SENAI CIMATEC

“Devagar se vai ao longe...”

## AGRADECIMENTOS

Nesta jornada foram muitas pessoas que me ajudaram e me deram todo apoio necessário.

Primeiramente, eu agradeço a Deus por ter chegado até aqui. A meus pais, por sempre confiarem em mim como pessoa e profissional e sempre me motivar para correr atrás dos meus sonhos. Sem eles e o amor deles eu não sou ninguém. A minha irmã, Luara, por estar do meu lado em todos os momentos e a toda a minha família que sempre torce e vibra com as minhas conquistas.

Agradeço a todos os meus amigos que construí ao longo da vida, por me darem todo apoio que preciso. A Erick, por apoiar minhas escolhas, motivar meus estudos e estar sempre do meu lado.

A minha orientadora, professora Dr<sup>a</sup>. Lilian Lefol Nani Guarieiro, por ter confiado em mim para tocar este projeto e ter me dado todo o apoio e atenção quando eu precisei, além de ter contribuído imensamente para o meu crescimento acadêmico e profissional. Serei eternamente grata.

Às amigas que eu construí ao longo do curso, especialmente a Emmanuelle e Chrislaine, por terem me estimulado e me dado força quando eu precisei, além de todas as conversas de “apoio moral”. Não vou esquecer.

A universidade SENAI CIMATEC, pela disponibilidade da infraestrutura necessária, sobretudo, ao Laboratório de Pesquisa Aplicada em Química (LIPAQ), que dispõe de todos os acessórios necessários para o desenvolvimento da pesquisa.

## RESUMO

O material particulado (MP) atmosférico é constituído por uma mistura de partículas sólidas suspensas no ar que podem ser classificadas de acordo com o seu tamanho e composição química, de forma que, um indivíduo ao inalar estas partículas, pode apresentar doenças cardiovasculares, respiratórias e cancerígenas. Neste contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar o impacto na saúde dos indivíduos expostos ao MP emitido na exaustão veicular, utilizando o modelo MPPD (*Multiple-path Particle Model*). Os sítios foram selecionados com base num inventário de dados de MP, consistindo em: Sistema motor ciclo a diesel; dados diários de MP<sub>10</sub> e MP<sub>2,5</sub> exportados da plataforma CETESB (empresa responsável pelo monitoramento do ar na região metropolitana de São Paulo (RMSP)); dados diários de MP<sub>10</sub> das estações de monitoramento de ar de Salvador (SSA), fornecidos pela CETREL (empresa responsável pelo monitoramento de poluentes da cidade). Os dados coletados e inventariados foram modelados matematicamente no software *MPPD*, com o objetivo de simular a deposição de partículas no trato respiratório humano, conforme a variação do tamanho de MP e o tempo de exposição de um usuário de transporte público num ponto de ônibus. Desta forma, os resultados obtidos mostraram que as partículas emitidas por motores a diesel, apresentaram valores de concentrações no modo acumulação, numa faixa de 45 a 160 nm. Além disso, a análise entre os sítios da RMSP e de SSA mostrou os locais com maiores e menores incidência de MP<sub>10</sub>, considerando o fluxo de veículos de cada cidade. A simulação no MPPD mostrou que na RMSP a exposição e consequente deposição de MP no trato respiratório humano pode ser maior em comparação à exposição de indivíduos de SSA, mostrando o quanto um usuário de transporte público pode estar vulnerável à inalação diária destas partículas. Os resultados evidenciaram o efeito negativo que o MP pode causar no trato respiratório humano, de forma a promover impactos severos à saúde humana, como sérios quadros de diminuição da função pulmonar e possíveis problemas carcinogênicos.

**Palavras-chave:** *Material Particulado, Exaustão Veicular; Deposição Pulmonar; Multiple-path Particle Model*

## ABSTRACT

The atmospheric particulate matter (MP) consists of a mixture of solid particles suspended in the air that can be classified according to their size and chemical composition, so that an individual inhaling these particles can present cardiovascular, respiratory and carcinogenic. In this context, this work aimed to assess the impact on the health of individuals exposed to the MP emitted in vehicular exhaustion, using the MPPD model (Multiple-path Particle Model). The sites were selected based on an MP data inventory, consisting of: Diesel cycle engine system; daily data of MP10 and MP2.5 exported from the CETESB platform (company responsible for monitoring the air in the metropolitan region of São Paulo (RMSP)); daily MP10 data from Salvador's air monitoring stations (SSA), provided by CETREL (company responsible for monitoring the city's pollutants). The collected and inventoried data were modeled mathematically in the MPPD software, with the objective of simulating the deposition of particles in the human respiratory tract, according to the variation of the size of the MP and the exposure time of a public transport user in a bus stop. In this way, the results obtained showed that the particles emitted by diesel engines, showed concentration values in the accumulation mode, in a range of 45 to 160 nm. In addition, the analysis between the RMSP and SSA sites showed the sites with the highest and lower incidence of PM10, considering the flow of vehicles in each city. The simulation in the MPPD showed that in the RMSP the exposure and consequent deposition of MP in the human respiratory tract may be greater compared to the exposure of individuals with SSA, showing how vulnerable a public transport user may be to the daily inhalation of these particles. The results showed the negative effect that MP can cause on the human respiratory tract, in order to promote severe impacts on human health, such as serious conditions of decreased lung function and possible carcinogenic problems.

**Keywords:** *Particulate material, Vehicle Exhaustion; Pulmonary Deposition, Multiple-path Particle Model*



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Padrões da Qualidade do Ar (CONAMA nº 491 de 19/11/2018) .....	22
Tabela 2. Valores dos coeficientes da Equação 3.....	25
Tabela 3. Aplicação do Modelo de Dosimetria de Caminhos Múltiplos (MPPD) em outros estudos.....	33
Tabela 4. Valores de entrada para o modelo estocástico .....	39
Tabela 5. Variação do tempo de deposição alveolar.....	52

## LISTAS DE FIGURAS

Figura 1. Principais fontes antropogênicas de poluição atmosférica.....	18
Figura 2. Tamanhos de material particulado atmosférico.....	19
Figura 3. Classificação por tamanho e composição do material particulado atmosférico em relação à sua fonte .....	20
Figura 4. Emissões de material particulado nos motores.....	21
Figura 5. Impactos à saúde devido à inalação do material particulado atmosférico.....	22
Figura 6. Mecanismos de deposição no trato respiratório.....	24
Figura 7. Modelo de Dosimetria de Partículas de Caminhos Múltiplos .....	28
Figura 8. Gerações anatômicas do sistema respiratório humano .....	29
Figura 9 Fluxograma da metodologia de Revisão sistemática (a) Parte 1; (b) Parte 2.....	30
Figura 10. Fluxograma da metodologia aplicada no projeto.....	34
Figura 11. Sítio A - Sistema de motores ciclo a diesel. ....	35
Figura 12. Fluxo da modelagem do MPPD .....	38
Figura 13. Distribuição do número e tamanho de partículas de combustíveis: D, B11e B11 X. ....	41
Figura 14. Diagrama dos lóbulos pulmonares humano. ....	42
Figura 15. Fração de deposição de MP nos lóbulos pulmonares dos combustíveis estudados (D, B11 e B11X).....	43
Figura 16. Fração de deposição do número de partículas por alvéolo para o D, B11 e B11X (a) Pulmão Total; (b). Direito Superior; (c) Direito Médio; (d) Direito Inferior; (e) Esquerdo Superior; (f) Esquerdo Inferior. ....	44
Figura 17. (a) Visualização da fração de deposição dos combustíveis estudados (D, B11 e B11X); (b) Visualização mássica de deposição dos combustíveis estudados (D, B11 e B11X).....	47
Figura 18. Fração de deposição de partículas por número de geração do pulmão .....	49
Figura 19. Deposição de MP na região alveolar ao longo de 10 anos (a) 64,9 e 86,6nm; (b) 115,5 e 154nm .....	50
Figura 20. Análise comparativa da deposição alveolar ao longo do tempo (a) 64,9nm; (b) 86,6nm; (c) 115,5nm; (d) 154nm.....	51
Figura 21. Análise da média anual (2019 e 2020) de MP <sub>10</sub> para cada sítio da RMSP.....	53
Figura 22. Análise da média anual (2019 e 2020) de MP <sub>2,5</sub> para cada sítio da RMSP.....	54
Figura 23. Deposição alveolar de MP ao longo de 10 anos (a) MP <sub>10</sub> em 2019 e 2020; (b) MP <sub>2,5</sub> em 2019 e 2020 .....	55
Figura 24. Análise comparativa da deposição alveolar ao longo do tempo (a) MP <sub>10</sub> em 2019; (b) MP <sub>10</sub> em 2020; (c) MP <sub>2,5</sub> – 2019; (d) MP <sub>2,5</sub> – 2020 .....	57
Figura 25. Análise comparativa da média anual de 2015 de MP <sub>10</sub> em SSA.....	59

Figura 26. Análise comparativa da média anual de 2015 de MP <sub>10</sub> para SSA e a RMSP .....	60
Figura 27. Análise comparativa da deposição alveolar ao longo do tempo (Sítios CETESB e CETREL).....	61

## LISTAS DE SIGLAS

MP – Material Particulado

MPPD - *Multiple-path Particle Model*

CO – Monóxido de Carbono

NO<sub>2</sub> – Dióxido de Nitrogénio

O<sub>3</sub> – Ozônio

SO<sub>2</sub> – Dióxido de Enxofre

ACM – Avenida Antônio Carlos Magalhães

ANTP - Associação Nacional de Transportes Públicos

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CETREL - Central de Tratamento de Efluentes Líquidos

CFD - Dinâmica dos Fluidos Computacional

CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente

FRC – *Functional Residual Capacity*

ODS - Objetivos do Desenvolvimento Sustentável

OMS - Organização Mundial da Saúde

ONU - Organização das Nações Unidas

PLANMOB - Plano de Mobilidade Urbana Sustentável de Salvador

RMSP – Região Metropolitana de São Paulo

SEPLAN - Secretaria Do Planejamento

SSA – Salvador

SUCOP - Superintendência de Obras Públicas

URT - Trato Respiratório Superior

WHO – World Health Organization

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	14
<b>1. OBJETIVOS</b> .....	16
1.1. Objetivo Geral .....	16
1.2. Específico .....	16
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	17
2.1. Poluição atmosférica .....	17
2.2. Material Particulado Atmosférico .....	19
2.3. Emissão veicular .....	20
2.4. Legislação brasileira dos padrões de qualidade do ar para o MP .....	21
2.5. Impacto do MP na saúde .....	22
2.6. Mecanismos de deposição de partículas no pulmão .....	23
2.7. Modelos de deposição pulmonar .....	26
2.7.1. ICRP (Comissão Internacional Proteção Radiológica) .....	26
2.7.2. Dinâmica de Fluidos Computacional .....	27
2.7.3. Modelo de Dosimetria de Partículas de Caminhos Múltiplos (MPPD) .....	27
2.8. Estado da arte .....	30
2.8.1. Estudos recentes que abordam a deposição de MP no trato respiratório utilizando o MPPD .....	31
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	34
3.1. Caracterização dos sítios de coleta de dados .....	35
3.1.1. Coleta dos dados experimentais .....	35
3.1.2. Elaboração de um inventário de dados de material particulado da CETESB .....	36
3.1.3. Elaboração de um inventário de dados de material particulado da CETREL .....	37
3.2. Modelagem de dosimetria de partículas de caminho múltiplo utilizando dados de material particulado inventariados .....	38
3.3. Avaliação do impacto à exposição de material particulado utilizando modelo de dosimetria de partículas de caminho múltiplo .....	40
<b>4. RESULTADOS PRELIMINARES</b> .....	41

4.1. Avaliação da distribuição da concentração de tamanho de MP nos sítios estudados – Sítio A (Sistema de motores ciclo a diesel) .....	41
4.1.1. Avaliação do impacto à exposição de material particulado utilizando o MPPD – Sítio A (Sistema de motores ciclo a diesel) .....	42
4.2. Avaliação dos valores de concentração de MP <sub>10</sub> e MP <sub>2,5</sub> para os sítios B a H– Estações CETESB .....	53
4.2.1. Avaliação do impacto à exposição de material particulado utilizando o MPPD – Sítios B – H (Estações CETESB) .....	55
4.3. Avaliação dos valores de concentração de MP <sub>10</sub> para os sítios I a VIII– Estações CETREL .....	58
4.3.1. Avaliação do impacto à exposição de material particulado utilizando o MPPD - Estações CETESB e Estações CETREL .....	61
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>63</b>
<b>6. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>66</b>
<b>ANEXO I - Localização Sítios CETESB .....</b>	<b>70</b>
<b>ANEXO II - Localização Sítios CETREL .....</b>	<b>77</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Substâncias que são emitidas por indústrias, escapamento de automóveis e outras atividades urbanas são depositadas nos pavimentos de rodovias e nos espaços de circulação humana, contribuindo para o aumento da poluição do ar e à exposição do indivíduo a este ambiente (ALI, 2018). Segundo a World Health Globalization (WHO) a poluição do ar em cidades e áreas rurais, é responsável por 4,2 milhões de mortes prematuras por ano, devido à exposição ao material particulado (MP), que são causadores de doenças cardiovasculares, respiratórias e cancerígenas (WHO, 2019).

O MP atmosférico constitui de misturas de partículas sólidas suspensas no ar que variam em tamanho e composição química. Podem ser compostos por nitratos, sulfatos, carbono orgânico e elementar, compostos orgânicos, compostos biológicos e metais (ferro, cobre, níquel, zinco e vanádio) (KIM, 2015). Eles são originados de fontes naturais, as quais não envolvem atividades humanas (partículas de sal marinho, areia soprada pelo vento, cinzas vulcânicas, partículas biogênicas) e fontes antropogênicas, que são oriundas de processos urbanos (processos industriais e emissões veiculares) (HU, 2014).

O principal meio de contato entre o MP e o sistema respiratório humano é através da inalação, de forma que, quanto menor a partícula, maior a capacidade de absorver compostos orgânicos e inorgânicos e maior a capacidade de penetrar no trato respiratório (KIM, 2015). As partículas grossas (MP<sub>10</sub>) ao serem inaladas são fixadas na traqueia, devido ao atrito do MP<sub>10</sub> com os pelos nasais, assim são mais difíceis de penetrar no aparelho respiratório (KIM, 2015).

As partículas finas (MP<sub>2,5</sub>) podem provocar doenças de alto risco por serem oriundas de processos de combustão incompleta, como em motores de ciclo a diesel, na queima de madeira e de carvão para geração de energia e em processos industriais (FRANCHINI, 2018). O MP<sub>2,5</sub> ao ser inalado percorre os bronquíolos e alvéolos (onde ocorre a troca gasosa), podendo penetrar na corrente sanguínea ocasionando problemas de saúde significativos, como falta de ar, desconforto e dor no peito, tosse forte e chiado (KIM, 2015).

Neste contexto, segundo a Associação Nacional de Transportes Públicos (ANTP), a maioria dos poluentes emitidos no Brasil, consistem em: Monóxido de carbono, hidrocarbonetos, óxidos de nitrogênio, material particulado e óxidos de enxofre (ANP, 2020). Diante disso, o percentual dos poluentes emitidos pelos veículos, por modo de transporte, corresponde a 16% emitidos por motocicletas, 38% por automóveis e 46% emitidos por ônibus, os quais são responsáveis pela emissão de cerca de, 106 mil toneladas de poluentes por ano (ANTP, 2020). Isso impacta na exposição diária dos passageiros à emissão de MP, uma vez que não existe nenhuma estrutura de proteção nos pontos de ônibus e os corredores costumam ser movimentados (MOORE, 2012). Desta forma, embora não seja

um campo novo de pesquisa, não existe muitos estudos focados na exposição dos passageiros que esperam nos pontos de ônibus (NGOC, 2018).

Diante disso, o cenário atual da COVID – 19 é preocupante, principalmente nos países onde o nível de poluição e a incidência de mortes decorrentes da emissão de MP são bastante elevados, podendo acarretar sintomas mais sérios juntamente com a ação do vírus que vem sendo dizimadora. Porém, ao introduzir as medidas impostas pela quarentena foi possível visualizar um cenário que reduz as emissões oriundas de transportes e indústrias, a exemplo de um estudo foi realizado na Índia, em meados de março de 2020, que teve como objetivo mensurar a incidência de poluentes na atmosfera, após as providências impostas para conter a disseminação do vírus SARS-CoV-2. Os resultados apresentados neste estudo mostraram que no período de quarentena houve uma redução de MP<sub>10</sub>, e MP<sub>2,5</sub>, ao comparar com os anos anteriores, em que não ocorreram alteração no funcionamento das cidades, demonstrando uma melhoria significativa na qualidade do ar (SHARMA, 2020).

Desta forma, alguns meios de monitoramento já vêm sendo adotados para identificar o nível de MP emitido pelas atividades urbanas, a exemplo de estações fixas ou móveis que possuem ferramentas adequadas para definir quais os tamanhos que são mais emitidos e a sua fonte de emissão (WHO, 2019). Contudo, além do monitoramento, é de suma importância a avaliação do impacto da exposição de seres humanos ao MP. Assim, uma modelagem matemática que vise a simulação da deposição de partículas no pulmão é uma ferramenta importante na avaliação do impacto de MP na saúde (DÉDELE, 2019).

Diante deste cenário, é preciso reforçar o quanto a emissão de poluentes oriundos da exaustão veicular chama atenção para o aumento demasiado de MP no meio, como também salienta os efeitos prejudiciais às condições climáticas e à saúde humana dos indivíduos expostos diariamente a esta fonte antropogênica. Dentro deste panorama a Organização das Nações Unidas (ONU) implementou dezessete objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS), para fortalecer a união entre as nações em detrimento de propor estratégias que possam pôr em práticas estas medidas e outras soluções remediadoras (ONU, 2019). Dentro do cenário deste projeto, as ODS'S 3 (Saúde e bem-estar), 7(Energia limpa e acessível) e 13 (Ação contra a mudança global do clima) serão parcialmente atendidas, uma vez que estas ODS estão relacionadas com uma vida saudável e bem-estar para a população, o acesso a energias limpas, além de medidas para combater os impactos das mudanças climática.

Neste contexto, o estudo visa avaliar o impacto do material particulado na saúde humana, oriundo de emissões veiculares, a partir da modelagem de deposição de partículas no trato respiratório, utilizando o modelo de dosimetria de partículas de caminhos múltiplos (MPPD).



## 1. OBJETIVOS

### 1.1. Objetivo Geral

Avaliar o impacto na saúde de indivíduos expostos à emissão de material particulado oriundo da exaustão veicular, utilizando o modelo de dosimetria de partículas de caminho múltiplo (MPPD).

### 1.2. Específico

- Elaborar um inventário de dados de material particulado de diferentes tamanhos (MP2,5, MP10, nanopartículas) oriundos da emissão veicular;
- Modelar a deposição de MP utilizando o modelo de dosimetria de partículas de caminho múltiplo utilizando dados de material particulado inventariados;
- Avaliar o impacto à exposição de material particulado utilizando modelo de dosimetria de partículas de caminho múltiplo.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1. Poluição atmosférica

A poluição atmosférica consiste na associação de vários componentes produzidos por diferentes fontes, tais como: fontes biogênicas e antropogênicas (GRABER, 2019). As fontes biogênicas são intervenções naturais responsáveis pela formação e liberação de partículas para o meio ambiente, contribuindo para uma carga de aerossóis em massa (LIORA, 2016). Estes fragmentos de poeira transportada pelo ar apresentam grande impacto na atmosfera e em fenômenos meteorológicos através da absorção e disseminação da radiação solar levando à formação de nuvens, chuva, gelo, dentre outros (ĐORDEVIC, 2019). Algumas principais fontes de emissão natural são: atividades vulcânicas (EMAS, 2012) e aerossol de sal marinho (LIORA, 2016).

As fontes antropogênicas são caracterizadas por apresentarem intervenções humanas, onde os setores industriais e veiculares são os principais contribuintes à poluição do ar (Figura 1). As atividades realizadas dentro de casa, também podem originar alguns poluentes, onde dentre elas, as principais são: fumo, culinária e limpeza (MORAWSKA, 2014). Entretanto, partículas oriundas de emissões automotivas podem ser diariamente depositadas e acumuladas no meio urbano, como por exemplo, em forma de poeira nas pistas, que podem se juntar às partículas emitidas por fontes naturais e outras substâncias antropogênicas (ALI, 2018).

Diante disto, as fontes antropogênicas podem ser divididas em duas vertentes que definem a formação das partículas em composição e tamanho, elas são: fontes não exaustivas e exaustivas. As fontes de emissões não exaustivas são oriundas da abrasão da superfície da estrada, que podem ser resultantes do atrito do pneu com o solo, acumulando partículas na superfície das pistas de forma que elas podem ser ressuspensas com ação do vento e com a circulação de veículos (ALI, 2018). Entretanto, as fontes de emissões exaustivas são oriundas da oxidação incompleta de motores de combustão interna, onde a emissão de poluentes ocorre em detrimento da queima parcial de combustíveis. A maioria das partículas formadas no processo de combustão incompleta são oxidadas em várias substâncias intermediárias, enquanto o restante delas são liberadas pelo escapamento sob a forma de partículas sólidas aglomeradas (QIAN, 2019).

Figura 1. Principais fontes antropogênicas de poluição atmosférica



Fonte: (Adaptado WHO, 2019).

Desta forma, o impacto que as fontes antropogênicas podem causar no meio atmosférico ocorre de maneira tão expressiva, que pode ser classificado como poluição primária e poluição secundária. Os poluentes primários são emitidos diretamente para o ar e originados de uma única fonte, a exemplo das partículas de fuligem, óxidos de nitrogênio e enxofre que são emitidos pela combustão de combustíveis fósseis (FRANCHINI, 2018). As principais fontes de partículas primárias incluem tráfego rodoviário motorizado, geração de energia, fontes industriais e aquecimento residencial (MORAWSKA, 2014).

Os poluentes secundários são resultantes das reações químicas entre os poluentes primários na atmosfera, promovendo a conversão de gases em partículas, como aerossóis orgânicos secundários, ozônio e material particulado (MP) (MORAWSKA, 2014). Desta forma, a poluição do ar atmosférico é caracterizada pela mistura de milhares de componentes, dentre eles destacam-se o material particulado (MP), compostos orgânicos voláteis (benzeno, tolueno, etilbenzeno, xileno, formaldeído) e poluentes inorgânicos (ozônio [O<sub>3</sub>], dióxido de nitrogênio [NO<sub>2</sub>], monóxido de carbono [CO] e dióxido de enxofre [SO<sub>2</sub>]) (FRANCHINI, 2018).

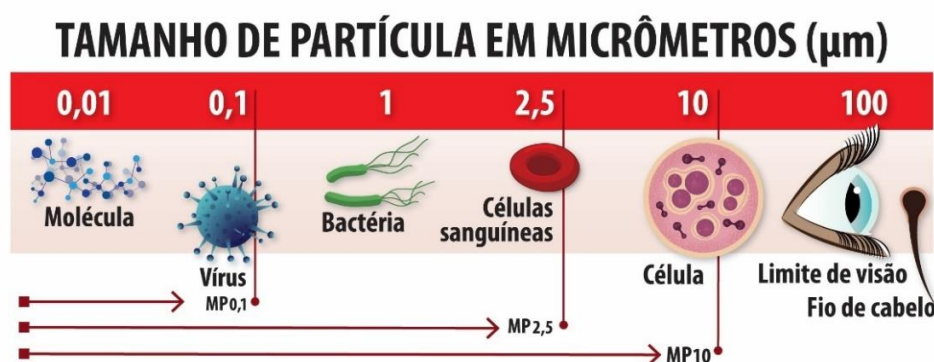
Diante da diversidade de poluentes que podem ser originados das reações de conversão dos gases emitidos, o material particulado é considerado como o mais perigoso por apresentar efeitos adversos no meio ambiente e na saúde humana. Além disso, o MP pode ser resultante de emissões diretas na atmosfera, a partir de atividades biogênicas e antropogênicas já mencionadas anteriormente neste tópico (ALI, 2018).

## 2.2. Material Particulado Atmosférico

O MP atmosférico consiste na mistura heterogênea de partículas sólidas e líquidas suspensas no ar, que variam em tamanho e composição química (KIM, 2015). A transformação química dessas partículas sob diferentes condições atmosféricas leva à uma composição bastante diversificada, oriunda de elementos como: nitratos; sulfatos; carbono elementar e orgânico; compostos orgânicos (por exemplo, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos); compostos biológicos (por exemplo, endotoxina, fragmentos de células, vírus); e metais (por exemplo, ferro, cobre, níquel, zinco e vanádio) (ALI, 2018).

O MP é categorizado conforme a sua capacidade de transporte no ar que está associada ao diâmetro das partículas (Figura 2) e à sua fonte de emissão (Figura 3), podendo ser classificadas como: Partículas grossas (MP<sub>10</sub>); partículas finas (MP<sub>2,5</sub>); partículas ultrafinas (MP<sub>0,1</sub>) e nanopartículas (SCAFATI, 2018).

Figura 2. Tamanhos de material particulado atmosférico



Fonte: (RAJAGOPALAN, 2018).

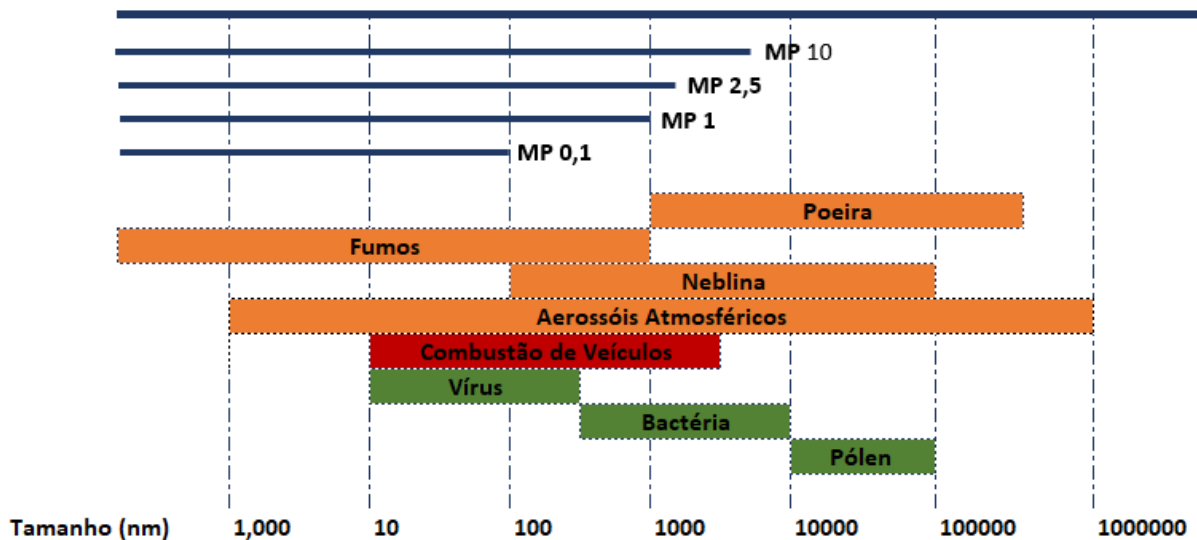
As partículas grossas (MP<sub>10</sub>) são caracterizadas por possuírem diâmetro menor que 10 µm (micrômetros). Correspondem a aerossóis primários (esporos ou pólen) emitidos por processos biológicos e a aerossóis biogênicos secundários formados através de reações de compostos orgânicos voláteis emitidos por solos e vegetações (EMAS, 2012).

As partículas finas (MP<sub>2,5</sub>) apresentam dimensões inferiores a 2,5 µm e estão fortemente associadas a ambientes urbanos, como resultado da suspensão e circulação de partículas nas rodovias, da queima de combustíveis em atividades industriais (a exemplo de carvão, óleo e coque) além da combustão incompleta de motores a diesel (ALI, 2018; HIME, 2018).

As partículas MP<sub>0,1</sub> são caracterizadas por possuírem diâmetros menores que 0,1 µm e emergirem da queima de combustíveis fósseis e emissões de veículos a motor, além de pertencerem a um vasto número de poluentes transportados pelo ar (MORAWSKA, 2014). Neste grupo estão incluídas as

nanopartículas, as quais apresentam diâmetro menor que 50 nm (SCAFATI, 2018).

Figura 3. Classificação por tamanho e composição do material particulado atmosférico em relação à sua fonte



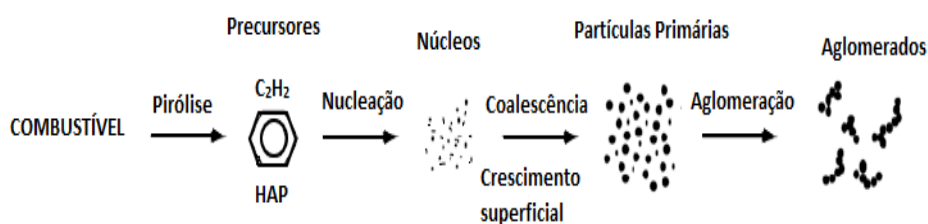
Fonte: (Adaptado DA SILVA BRITO, 2018).

### 2.3. Emissão veicular

Dentre os tipos de motores de combustão interna, pode-se destacar os motores ciclo diesel, considerados a principal fonte das emissões de MP em relação aos demais motores, predominando MP<sub>2,5</sub> e MP<sub>1</sub>. O MP emitido na exaustão desse motor varia em composição química e tamanho, de acordo com o tipo de motor (serviço pesado, serviço leve, método de injeção de combustível), condições de operação do motor (ocioso, aceleração, desaceleração) e formulações de combustível (com alto ou baixo teor de enxofre, diesel à base de petróleo, biodiesel) (HIME, 2018). As partículas emitidas por motores a diesel são compostas principalmente por carbono elementar, hidrocarbonetos e derivados, compostos de enxofre e outras espécies (MORAWSKA, 2014).

Devido à queima parcial de combustível, os hidrocarbonetos podem condensar ou serem absorvidos na superfície do MP, de acordo com as condições do ambiente (SCAFATI, 2018). A transição dos hidrocarbonetos na fase líquida em fuligem e posteriormente em gases, envolvem muitos processos químicos e físicos que podem ser agrupados em duas etapas: produção e oxidação de material particulado. A formação ocorre através de cinco processos diferentes: pirólise, nucleação, crescimento superficial, coalescência e aglomeração (Figura 4).

Figura 4. Emissões de material particulado nos motores



Fonte: (SCAFATI, 2018).

A pirólise é um processo no qual o combustível se decompõe sob condições de alta pressão e gera precursores de fuligem. Todos os combustíveis sofrem pirólise e são capazes de produzir essencialmente espécies como hidrocarbonetos insaturados, poliacetilenos, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA) e acetileno (SCAFATI, 2018). A nucleação e crescimento da superfície envolvem processos de conversão de gás em pequenas partículas (QIAN, 2019). As fases de coalescência e aglomeração representam a colisão entre as partículas, aglomerando-se entre si para formar um único composto (SCAFATI, 2018).

#### 2.4. Legislação brasileira dos padrões de qualidade do ar para o MP

A resolução CONAMA nº 491 de 19/11/2018 estabelece padrões de qualidade do ar (PQAr), com o intuito de quantificar os poluentes atmosféricos (CETESB, 2019; MMA, 2018). Os PQAr determinam um valor de concentração de um poluente específico na atmosfera, associando a um intervalo de tempo de exposição, promovendo a preservação do meio ambiente e da saúde da população em relação aos riscos que podem ser causados pela poluição atmosférica (MMA, 2018). Os padrões de qualidade do ar intermediários (PI) e os padrões de qualidade do ar final (PF), encontrados na Tabela 1 a seguir, correspondem aos padrões estabelecidos como valores temporários a serem cumpridos em etapas e aos valores guia definidos pela Organização Mundial da Saúde (OMS) em 2005, respectivamente (MMA, 2018).

Os padrões da qualidade do ar intermediários devem atender as seguintes etapas:

- Padrão da qualidade do ar intermediário PI1 - Valores de concentração de poluentes atmosféricos que devem ser respeitados a partir de 19/11/2018;
- Os Padrões de Qualidade do Ar Intermediários e Final (PI 2, PI 3 e PF) serão adotados, cada um, de forma subsequente, levando em consideração os Planos de Controle de Emissões Atmosféricas e os Relatórios de Avaliação da Qualidade do Ar, elaborados pelos órgãos estaduais e distrital de meio ambiente.

Tabela 1. Padrões da Qualidade do Ar (CONAMA nº 491 de 19/11/2018)

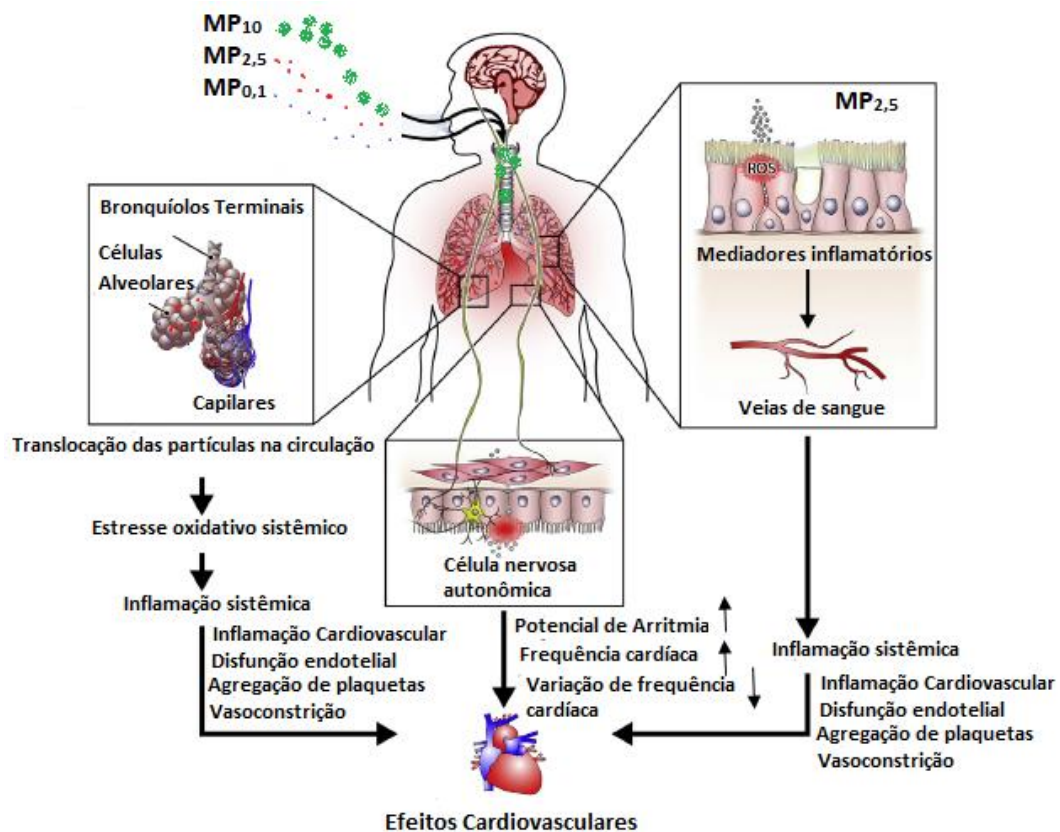
Poluente	Tempo de Amostragem	PI 1 (µg/m³)	PI 2 (µg/m³)	PI 3 (µg/m³)	PF (µg/m³)
Partículas inaláveis (MP10)	24 Horas	120	100	75	50
	Média Aritmética Anual (MAA)	40	35	30	20
Partículas inaláveis finas (MP2,5)	24 Horas	60	50	37	25
	Média Aritmética Anual (MAA)	20	17	15	10

Fonte: (MMA, 2018)

## 2.5. Impacto do MP na saúde

A exposição ao MP atmosférico pode resultar em sintomas respiratórios, doenças cardiovasculares crônicas, diminuição da função pulmonar e mortalidade prematura (KIM, 2015). A inalação é o meio mais importante para o contato do organismo humano com o MP, de forma que o seu grau de impacto está correlacionado com o tamanho da partícula depositada no aparelho respiratório (GUARIEIRO, 2013) (Figura 5).

Figura 5. Impactos à saúde devido à inalação do material particulado atmosférico



Fonte: (Adaptado WU, 2018).



As partículas grossas ( $MP_{10}$ ) ao serem inaladas, são alojadas na traqueia (parte superior da garganta), devido ao atrito do  $MP_{10}$  com o revestimento de muco e com os pêlos nasais, impedindo que estas partículas penetrem em regiões mais profundas do trato respiratório (KIM, 2015). O  $MP_{2,5}$  e  $MP_{0,1}$ , por possuírem diâmetros aerodinâmicos muito pequenos, penetram mais profundamente nos pulmões, podendo ser depositados nas regiões alveolares durante a respiração bucal, uma vez que são absorvidos na corrente sanguínea por meio de capilares alveolares, ocasionando inflamação pulmonar e problemas de saúde agressivos (FIORDELISI, 2017).

As diferentes fontes de emissão de material particulado apresentam um valor significativo no grau de exposição às partículas ao promoverem doenças de alto risco como: problemas respiratórios, exacerbação de respiração crônica, diminuição da função pulmonar, mortalidade prematura, doenças cardiovasculares, além dos riscos carcinogênicos e mutagênicos (KIM, 2015). O MP emitido pela queima de combustíveis ( $MP_{2,5}$  e  $MP_1$ ) é composto por carbono, dióxido de enxofre, hidrocarbonetos não queimados e alguns metais, de forma que podem ter uma forte relação com o risco de câncer de pulmão, por ocasionarem quebras e alterações na cadeia genética (efeitos mutagênicos) no DNA humano (GUERRERA, 2019).

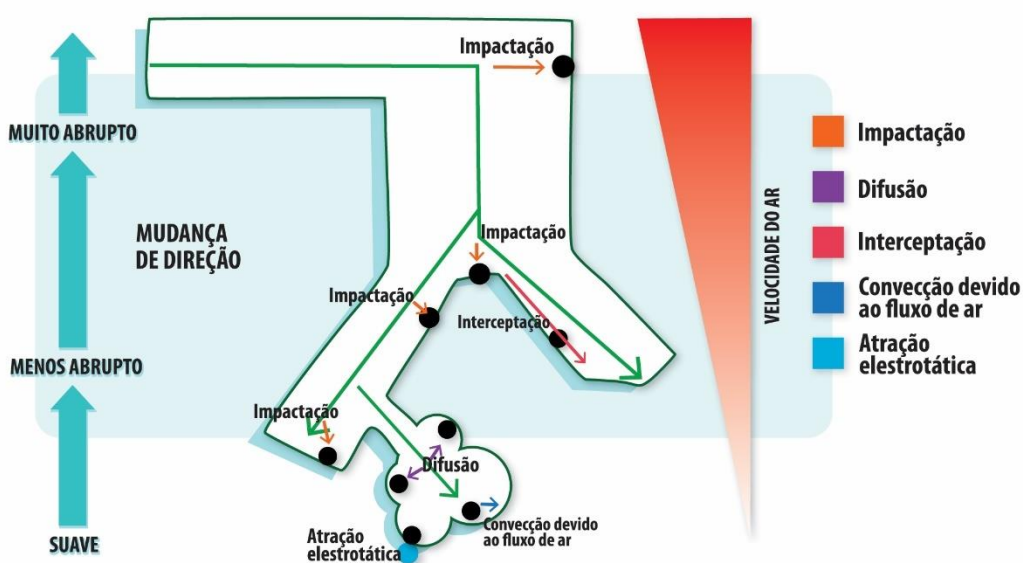
Além das doenças respiratórias, as doenças cardiovasculares podem ser divididas em crônica (insuficiência cardíaca e hipertensão) e aguda (infarto agudo do miocárdio e arritmia), de forma que, o coração e o sistema vascular são altamente vulneráveis à exposição de  $MP_{2,5}$  (a curto e longo prazo), especialmente em associação com o envelhecimento e as doenças cardíacas estruturais (FIORDELISI, 2017).

## 2.6. Mecanismos de deposição de partículas no pulmão

Para avaliar a taxa de deposição do material particulado no trato respiratório, é necessário analisar o comportamento do local e do número de partículas na superfície das vias aéreas, que vão depender de variáveis como: tempo de residência, tamanho e concentração de MP, geometria das vias aéreas e parâmetros respiratórios (ROSTAMI, 2009). Diante disto, é importante frisar que a distribuição de tamanhos das partículas pode ser alterada durante a passagem pelas vias aéreas devido à absorção de água no ambiente pulmonar de alta umidade, à coagulação e perdas de partículas que podem ficar retidas nas paredes do pulmão (ROSTAMI, 2009). Outro fator importante que pode interferir na deposição de MP no sistema respiratório, é o fluido pulmonar contido nas vias aéreas, que pode promover a aderência das partículas na superfície (ROSTAMI, 2009). Os mecanismos mais importantes, pelos quais as partículas podem depositar no pulmão, são: impactação, sedimentação, interceptação, difusão, precipitação eletrostática e convecção (Figura 6) (BUI, 2020).



Figura 6. Mecanismos de deposição no trato respiratório



Fonte: (Adaptado BUI, 2020).

A deposição por impactação ocorre quando partículas grandes não seguem a curvatura do fluxo de ar devido à inércia e assentamento das mesmas nas paredes das vias aéreas, mantendo assim, a sua direção original (HUSSAIN, 2011). A massa das partículas, sua proximidade com a superfície, sua velocidade e a mudança do ângulo de direção, são fatores importantes na deposição por impactação (ROSTAMI, 2009). Esta deposição predomina nas vias aéreas maiores como na bifurcação da traqueia, nas vias nasais e na laringe. A probabilidade da deposição por impactação é afirmada como (KOBLINGER, 1990):

$$p_i = 1 - \frac{2}{\pi} \cos^{-1}(\theta St) + \frac{1}{\pi} \sin[2 \cos^{-1}(\theta St)], \quad \text{para } \theta St < 1 \quad (1)$$

$$p_i = 1, \quad \text{para } \theta St > 1,$$

Onde  $\theta$  é o ângulo de ramificação do tubo e  $St$  é o número de Stokes. O número de Stokes (adimensional) é utilizado para caracterizar o comportamento de partículas em um determinado fluxo (BUI, 2020).

A difusão por sedimentação ocorre através da influência da gravidade, onde a força gravitacional age sobre as partículas inaladas (ROSTAMI, 2009). Este tipo de deposição é mais eficaz na região alveolar e em vias aéreas menores, onde as velocidades são baixas e as dimensões são pequenas (ROSTAMI, 2009). Vale ressaltar que a sedimentação depende da orientação da superfície, uma vez que, em vias aéreas com configuração horizontal, este tipo de deposição é mais eficiente (ROSTAMI, 2009). A probabilidade de deposição por sedimentação, é definida como:

$$p_s = 1 - \exp\left(\frac{4gCpr^2L\cos\theta}{9\pi\mu Rv}\right) \quad (2)$$

Onde  $g$  é a aceleração da gravidade,  $\theta$  é o ângulo em relação à gravidade,  $p$  é a densidade da partícula,  $C$  é o fator de correção de escorregamento de Cunningham,  $r$  é o raio da partícula e  $\mu$  é a viscosidade do fluido (KOBLINGER, 1990).

A difusão ou movimento browniano das partículas contribuem para deposição total no trato respiratório, de forma que se destaca nas vias aéreas distais, em que as dimensões são pequenas e o tempo de permanência é alto (ROSTAMI, 2009). Este mecanismo é direcionado para partículas pequenas ( $<0,5 \mu\text{m}$ ) por difundirem-se de uma maior (ar no pulmão) para menor (parede das vias aéreas) concentração (HUSSAIN, 2011). As partículas menores possuem maior mobilidade e maior coeficiente de difusão, entretanto, as partículas maiores são mais lentas, em detrimento da massa estar diretamente associada com a inércia (ROSTAMI, 2009). A deposição por difusão de uma partícula de aerossol, também é caracterizada por ocorrer em vias aéreas cilíndricas, em que o cálculo da deposição é dado por:

$$p_d = \sum_{i=1}^3 a_i \exp(-b_i x) - a_4 \exp(-b_4 x^{2/3}), \quad (3)$$

Onde,

$$x = \frac{LD}{2R^2v}, \quad (4)$$

$D$  corresponde ao coeficiente de difusão,  $R$  é o raio do tubo,  $L$  é o comprimento do tubo e  $v$  é o fluxo médio da velocidade (KOBLINGER, 1990). Os valores adotados pelos coeficientes da equação 3 estão encontrados na tabela 2:

Tabela 2. Valores dos coeficientes da Equação 3

$a_1 = 0,8190$	$b_1 = 7,3150$
$a_2 = 0,0976$	$b_2 = 44,610$
$a_3 = 0,0325$	$b_3 = 114,00$
$a_4 = 0,0509$	$b_4 = 79,310$

A deposição por interceptação ocorre de forma que as partículas entram em contato com a superfície das vias aéreas devido à sua forma e tamanho físico (ROSTAMI, 2009). Partículas muito pequenas são capazes de alcançarem

pequenas vias aéreas, através do fluxo de ar, onde ficam retidas nas paredes do trato respiratório, devido às suas características geométricas (BUI,2020).

Na deposição por precipitação eletrostática, partículas eletricamente carregadas são depositadas nas superfícies das vias aéreas, produzindo forças repulsivas para direcionar o MP para as paredes do aparelho respiratório (ROSTAMI, 2009).

A deposição por convecção está vinculada ao transporte de MP por meio dos fluxos de massa de ar, oriundos da expansão pulmonar ou das turbulências nas vias aéreas superiores, demonstrando eficácia em partículas menores (ROSTAMI, 2009).

## 2.7. Modelos de deposição pulmonar

Os modelos de deposição do trato respiratório consistem em métodos úteis para estimar os riscos de exposição a partículas inaladas. Pesquisas vêm sendo realizadas, utilizando técnicas de modelagem computacional para desenvolver ferramentas alternativas, com o intuito de estimar a deposição e retenção de material particulado no sistema respiratório humano.

Os modelos computacionais consistem no conjunto de três elementos importantes: uma formulação matemática que descreve os processos físicos e químicos relevantes; a definição de limites iniciais e a resolução de equações para a geometria referente à espécie especificada (BUI, 2020). Além disso, é necessário considerar para a modelagem, quatro tipos de dados principais de entrada: morfometria do pulmão, padrão respiratório, propriedades das partículas e propriedades de gás / vapor (BUI,2020). Desta forma, serão detalhados a seguir, os principais modelos computacionais que simulam o impacto do MP no trato respiratório humano.

### 2.7.1. ICRP (Comissão Internacional Proteção Radiológica)

O modelo ICRP66 (Comissão Internacional Proteção Radiológica) de 1996, visa prever a deposição de partículas no trato respiratório. Neste modelo, o aparelho respiratório foi representado em série de compartimentos anatômicos, onde os aerossóis passam pelos processos de inalação e expiração (BUI, 2020). Cada compartimento é tratado como um filtro, nos quais a deposição é calculada por 26 equações semi-empíricas, associadas à entrada dos dados experimentais, em função do tamanho e taxa de fluxo das partículas (HUSSAIN, 2011). É um modelo amplamente empregado, por possuir uma facilidade no uso e menor recurso computacional. No entanto, não poder ser usado para cálculos de distribuição de tamanhos de partículas, na deposição em vias aéreas (FINLAY, 2008).

O ICRP apresenta um pacote de software (LUPED), podendo ser modificado para outras finalidades, como converter a estimativa da deposição pulmonar de uma função de idade para uma função de altura, através da combinação entre o cálculo do fator de forma de partículas não esféricas e a implementação da distribuição de tamanhos de MP (BUI, 2020).

### 2.7.2. Dinâmica de Fluidos Computacional

Consiste em um modelo tridimensional, o qual utiliza geometrias respiratórias mais precisas, incluindo variações morfológicas da superfície das vias aéreas axial e lateral, adequando-se às regiões superiores (HUSSAIN, 2011).

No modelo de Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD), fatores como fluxo transitório, dispersão de MP e mudanças higroscópicas no tamanho de partículas, podem ser representados diretamente em simulações (BUI, 2020). Este modelo apresenta como desvantagens: estimava da deposição de material particulado apenas na região oro nasal e no trato superior; não possui dados morfométricos confiáveis nas gerações inferiores, não havendo a disponibilidade do CFD para todo o pulmão; a maioria dos modelos baseados em CFD exige tempos de processamento computacional muito longos (ROSTAMI, 2009).

A simulação do transporte e deposição de partículas no modelo CFD, pode ser dividida nas seguintes etapas: 1) simulação do campo de fluxo, 2) rastreamento de partículas e 3) pós-processamento para obter informações de deposição de partículas (TANG, 2011).

### 2.7.3. Modelo de Dosimetria de Partículas de Caminhos Múltiplos (MPPD)

O Modelo de Dosimetria de Partículas de Caminhos Múltiplos (MPPD) foi desenvolvido pela Applied Research Associates com o objetivo de estimar a deposição de MP e bioaerossóis nas regiões da cabeça, vias respiratórias traqueobrônquicas (TB) e pulmonares, do trato respiratório humano (MADHWAL, 2020). A fração de deposição (FD) de MP consiste na proporção do número de partículas inaladas e depositadas (em diferentes tamanhos) nas diferentes regiões do sistema respiratório, de forma que, o cálculo de FD é baseado em três principais mecanismos de deposição, citados no tópico anterior: difusão, impactação e sedimentação (MADHWAL, 2020). Neste modelo a deposição de partículas inaladas consistem em quatro etapas:

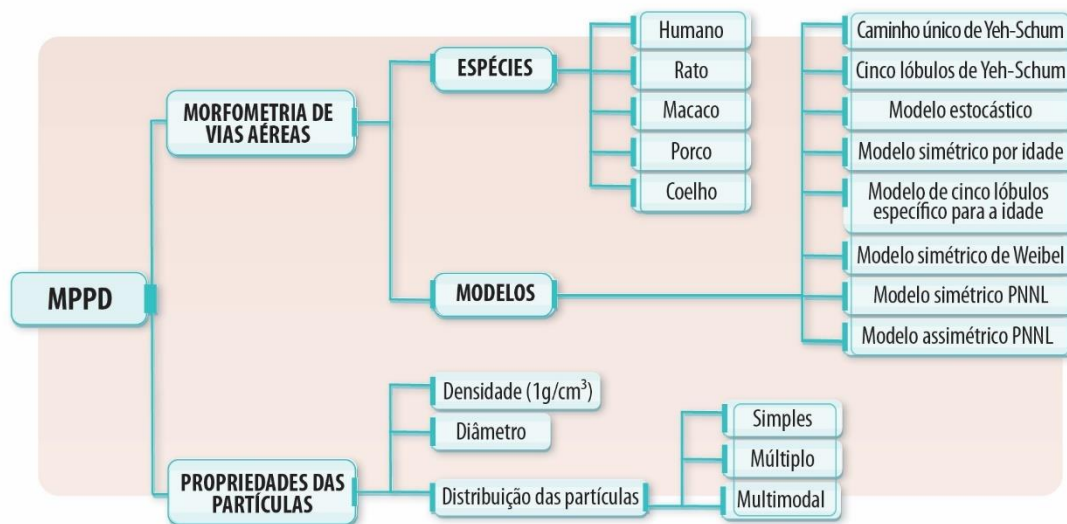
- 1) Equações semi-empíricas para prever inalação e deposição no trato respiratório superior (URT - Vias respiratórias superiores; nasal, faríngea e laríngea);
- 2) Reconstrução matemática da estrutura do trato respiratório (LRT – Trato Respiratório Inferior; traqueobrônquica e pulmonar), quanto menor for a região;

- 3) Um modelo mecânico para ventilação do menor trato respiratório é desenvolvido com base na fisiologia da respiração;
- 4) Equação de balanço de massa de transporte é desenvolvida para o MP inalado com o objetivo de prever a deposição regional (ASGHARIAN, 2006).

O modelo MPPD inclui o método de caminho único e caminhos múltiplos com a finalidade de rastrear o fluxo de ar e calcular a deposição de aerossol nos pulmões (JI,2012). O método de caminho único calcula a deposição em um caminho típico por geração de vias aéreas, enquanto o método de caminhos múltiplos calcula a deposição de partículas em todas as vias aéreas do pulmão (MANOJKUMAR, 2019).

Este modelo disponibiliza de opções de morfometria para idealizar o pulmão, elas são: Caminho único de Yeh-Schum; 5 Lóbulos de Yeh-Schum; Modelo estocástico; Modelo simétrico por idade; Modelo de 5 lóbulos específico para a idade; Modelo simétrico de Weibel; Modelo simétrico PNNL; Modelo assimétrico PNNL (Figura 7). Dados como propriedades de MP e condições de exposição devem ser fornecidas por padrões ou valores especificados pelo usuário, onde a fração de deposição pode ser estimada para as partículas com faixa de tamanho entre 1 nm e 100 µm (MANOJKUMAR, 2019).

Figura 7. Modelo de Dosimetria de Partículas de Caminhos Múltiplos



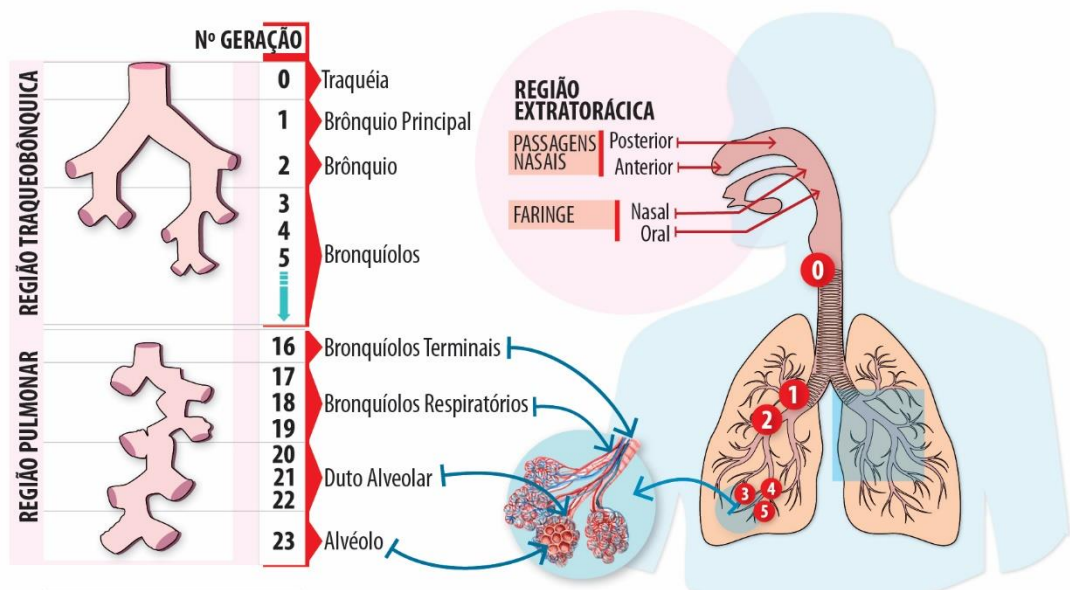
Fonte: (Adaptado MANOJKUMAR, 2019)

O modelo estocástico foi escolhido para o desenvolvimento da presente pesquisa para simular a deposição de MP no trato respiratório humano. Este modelo foi desenvolvido por Yeh e Schum (1980), com objetivo de simular a deposição do material particulado em diferentes regiões, a partir da anatomia da espécie estudada, adotando uma ramificação dicotômica na estrutura das vias

aéreas do pulmão (ASGHARIAN, 2014). Um total de 10 geometrias estocásticas estão disponíveis neste modelo, de forma que são ordenadas em tamanho, do menor para o maior (ASGHARIAN, 2014). Desta forma, uma vez inaladas, as partículas seguem caminhos aleatórios no pulmão, levando à deposição de MP por difusão.

O modelo estocástico fornece uma estimativa da variabilidade da dose pulmonar recebida pelos seres humanos, gerando resultados de deposição mais realistas (LI, 2016). O modelo visa calcular a deposição de MP no pulmão em determinados locais do trato respiratório humano, como: regional (cabeça, traqueobrônquica, alveolar e total) e lobular (nos cinco lóbulos pulmonares) (KOBLINGER, 1990). Vale ressaltar que uma vez que a espécie humana e o modelo são selecionados, a simulação da deposição dos tamanhos de partículas corresponde com as gerações anatômicas que fazem parte do sistema respiratório humano (Figura 8). As gerações do pulmão são compostas por 23 subseções, as quais são classificadas por regiões, tais como: região extratorácica, traqueobrônquica e pulmonar (HUSSAIN, 2011). Desta forma, o cálculo da deposição de MP é mensurado, considerando todas as 23 gerações do pulmão.

Figura 8. Gerações anatômicas do sistema respiratório humano



Fonte: (Adaptado HUSSAIN, 2011).

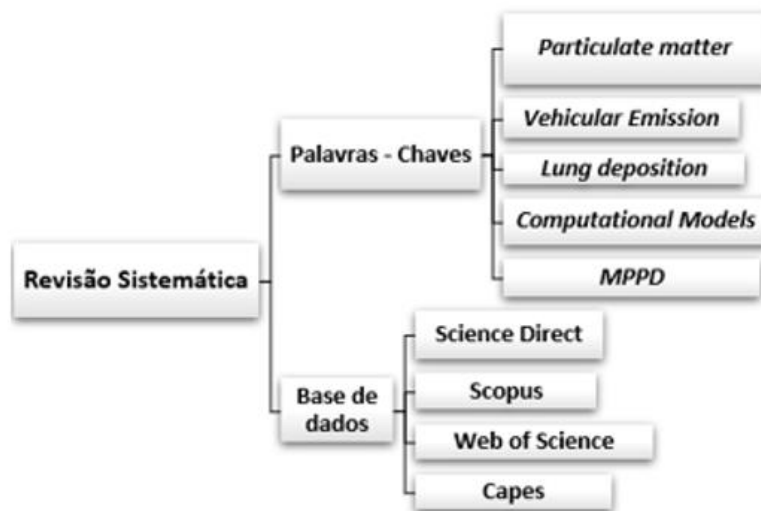
## 2.8. Estado da arte

Este tópico apresentará os principais trabalhos sobre a deposição de MP no pulmão e os modelos computacionais que podem fornecer uma visão mais detalhada do impacto do MP no trato respiratório. Para a realização do estado da arte foi aplicada a revisão sistemática da literatura (RSL), a qual foi desenvolvida através de etapas que buscam refinar a pesquisa levando a um número essencial de materiais, de acordo com o objetivo do projeto, obtendo informações relevantes ao tema.

Na RSL as palavras-chaves escolhidas em inglês (*“particulate matter”, “vehicular emission”, “lung deposition”, “computational models”, “multiple-path particle dosimetry model”*) foram inseridas na pesquisa de forma simples e com operadores booleanos and e or, utilizando as bases: Scopus ([www.scopus.com](http://www.scopus.com)), Science direct ([www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)), Capes ([www-periodicos-capes-gov-br.ez68.periodicos.capes.gov.br](http://www-periodicos-capes-gov-br.ez68.periodicos.capes.gov.br)) e Web of Science ([www.webofknowledge.com](http://www.webofknowledge.com)). Foram estabelecidos filtros criteriosos com objetivo de refinar os materiais encontrados, considerando um período de busca de 2009 a 2019, para obter os estudos que abordam o impacto do material particulado veicular no trato respiratório.

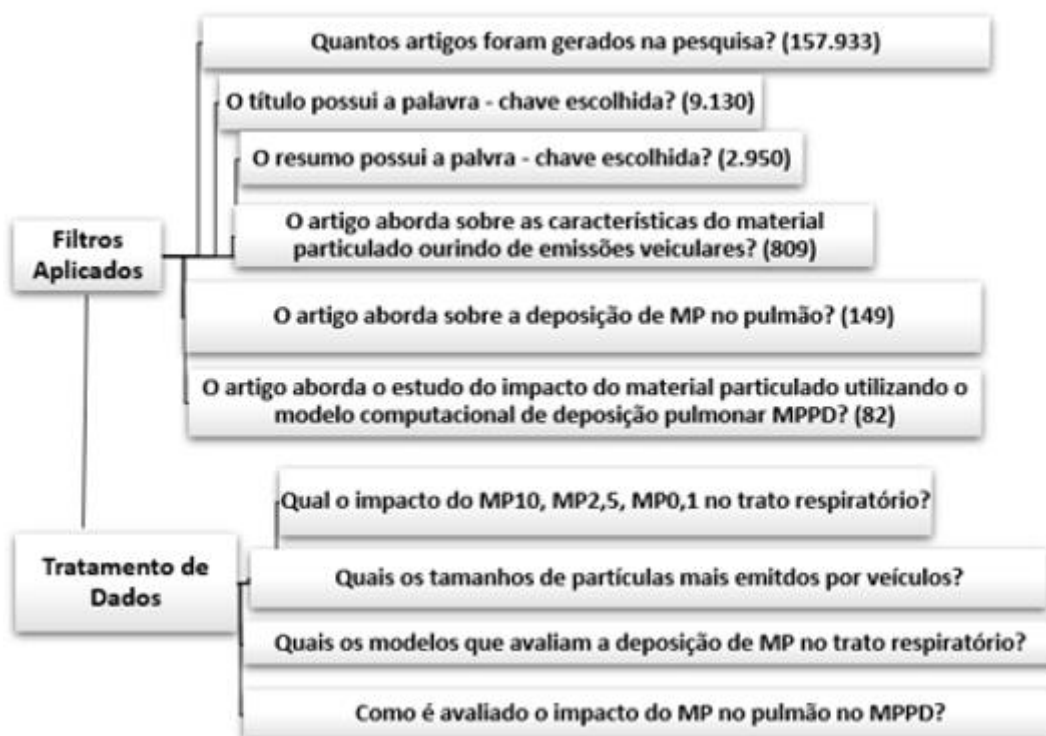
Figura 9 Fluxograma da metodologia de Revisão sistemática (a) Parte 1; (b) Parte 2

(a)



Fonte: Elaboração própria

(b)



### 2.8.1. Estudos recentes que abordam a deposição de MP no trato respiratório utilizando o MPPD

Este tópico apresenta os principais trabalhos correlatos identificados na revisão sistemática que envolvem a avaliação do MPPD no estudo do impacto do MP no pulmão oriundo emissões veiculares

Estudos recentes realizados na cidade de Salvador – BA, no ano de 2016 (GUERREIRO, 2016) e 2018 (FIGUEIREDO, 2018) destacaram a implementação do modelo de Dosimetria de Caminhos Múltiplos (MPPD) com o objetivo de avaliar o comportamento do MP no trato respiratório. Ambos os autores realizaram a coleta de partículas numa faixa de tamanhos entre 10nm a 420nm, durante três períodos de amostragem (9:00, 13:00 e 17:00 horas), em sítios distintos (Estudo de 2016 utilizou 5 sítios e de 2018 utilizou 4). O que difere desses dois estudos, é que GUERREIRO (2016) realizou a coleta de MP ultrafino no interior de um veículo com janelas abertas e fechadas em condições típicas de tráfego, já FIGUEIREDO (2018) realizou a coleta de MP fino e ultrafino em diferentes ambientes, identificando as possíveis fontes de emissão de poluentes. Porém, ambos utilizaram um sítio em comum: sistema de motor a diesel em ambiente controlado (dinamômetro de bancada). Além disso, os mesmos aplicaram o modelo MPPD na investigação do comportamento do MP no pulmão, através de simulações propostas pelo software de forma que, diante das várias



opções de modelagem, os dois autores optaram pelo modelo pulmonar *Stochastic model 60* por oferecer diferentes regiões do trato respiratório nas quais o MP pode ser depositado. A análise da amostragem do número de MP coletado nos sítios, dos dois estudos, apresentou uma maior concentração e tamanho de partículas nos sítios onde o fluxo de veículos pesados é mais elevado. Os dois autores ao simularem o impacto do MP no trato respiratório por meio do MPPD, mostraram resultados semelhantes na avaliação da fração de deposição, destacando que quanto menor o tamanho do diâmetro da partícula mais capacidade esta tem, de penetrar nos lóbulos do pulmão. A partir da análise da modelagem da deposição do MP no trato respiratório foi possível identificar que na região do duto alveolar ocorre maior fração de posição de MP independente da sua dimensão aerodinâmica e além disso, foi constatado que em ambientes onde o fluxo de veículos pesados é mais elevado, os indivíduos estão mais expostos à emissão de poluentes prejudiciais à saúde (GUERREIRO, 2016; FIGUEIREDO, 2018).

Um estudo realizado na China destacou a avaliação da deposição de diferentes tamanhos de MP fino nas vias aéreas humanas em Pequim, durante as estações em que as concentrações de partículas finas são altas, entre dezembro de 2011 e abril de 2012. O sítio escolhido para coleta está localizado no portão de um prédio da Universidade de Pequim, onde é caracterizado por possuir fluxo de veículos intenso, principalmente táxi, carro e ônibus, considerando que o local se encontra em uma estrada bastante movimentada. As coletas foram realizadas durante os períodos da manhã, tarde e noite, nas estações de inverno (10 a 23 de dezembro de 2011) e primavera (12 a 27 de abril de 2012). A instrumentação utilizada foi um Contador de Partículas de Mobilidade Rápida (Modelo 3091 TSI), o qual foi determinado para medir distribuições de tamanho de partícula de 5,6 a 560 nm. O modelo de dosimetria de partículas com múltiplos caminhos (MPPD, v. 2.11) foi aplicado neste estudo, onde o modelo pulmonar *Stochastic model 60* foi selecionado, uma vez que demonstra de forma mais clara a deposição de partículas nas vias aéreas humanas. Os dados foram tratados conforme os dias sob forte poluição (maior partícula encontrada apresentou concentração numérica de  $7,39 \times 10^5 \text{cm}^{-3}$ ), com dias levemente poluídos (maior partícula encontrada apresentou concentração numérica de  $6,82 \times 10^5 \text{cm}^{-3}$ ) e dias limpos (maior partícula encontrada apresentou concentração numérica de  $5,11 \times 10^5 \text{cm}^{-3}$ ). Seguindo esta linha de análise, foi constatado que em dias altamente poluídos, as partículas na faixa de tamanho de 30 a 641 nm representam 66,5% do total número de MP fino, enquanto em dias limpos, 70,5% das partículas estão na faixa de tamanho de 10 a 30 nm. Ao investigar a deposição de MP no trato respiratório sob diferentes condições de clima, faixa de hora e níveis de poluição foi possível determinar que as concentrações numéricas de MP fino em áreas extratorácicas, traqueobrônquicas e regiões pulmonares foram maiores na estação de inverno nos dias altamente poluídos e nos dias limpos (LI, 2016).

O estudo de Manojkumar et al. (2019), mostrou a investigação do nível de concentração de MP no trato respiratório, conforme um grupo de faixas etárias: bebês (3 e 28 meses), crianças (3, 8, 9 e 14 anos) e adultos (18 e 21 anos). Foram considerados para análise as propriedades das partículas, orientação corporal, cenário respiratório, fração de pausa, fração de inspiração e frequência respiratória. Este estudo apresentou como resultados importantes a predominância de MP<sub>10</sub> nas regiões da cabeça (55% a 95%) para todas as faixas de idade, enquanto que o MP<sub>2,5</sub> e MP<sub>1</sub> se concentraram na cabeça (36% a 63%) e nos lobos inferiores (28,2% -52,7%). A tabela 3 apresenta outros estudos que avaliaram a deposição de MP no pulmão, porém focando em outras espécies como ratos e camundongos.

Tabela 3. Aplicação do Modelo de Dosimetria de Caminhos Múltiplos (MPPD) em outros estudos

<b>ARTIGOS</b>	<b>ESTUDO</b>
<i>MANOJKUMAR, 2019</i>	Avaliação da massa depositada e taxa de liberação de MP para uma faixa etária específica (bebês: 3 e 28 meses, crianças: 3, 8, 9 e 14 anos e adultos: 18 e 21 anos) na cidade de Chennai localizada no estado de Tamil Nadu, na Índia.
<i>Ji, 2012</i>	Neste estudo foi investigado as diferenças dosimétricas entre ratos e humanos nas regiões alveolares num tempo de exposição de 13 semanas.
<i>ASGHARIAN, 2014</i>	Avaliação da toxicidade do material particulado nas regiões alveolares dos camundongos.
<i>ASGHARIAN, 2014</i>	Neste estudo foi avaliado a deposição de partículas em diferentes regiões e lobos do pulmão utilizando um modelo matemático de deposição de partículas.

Fonte: Elaboração própria

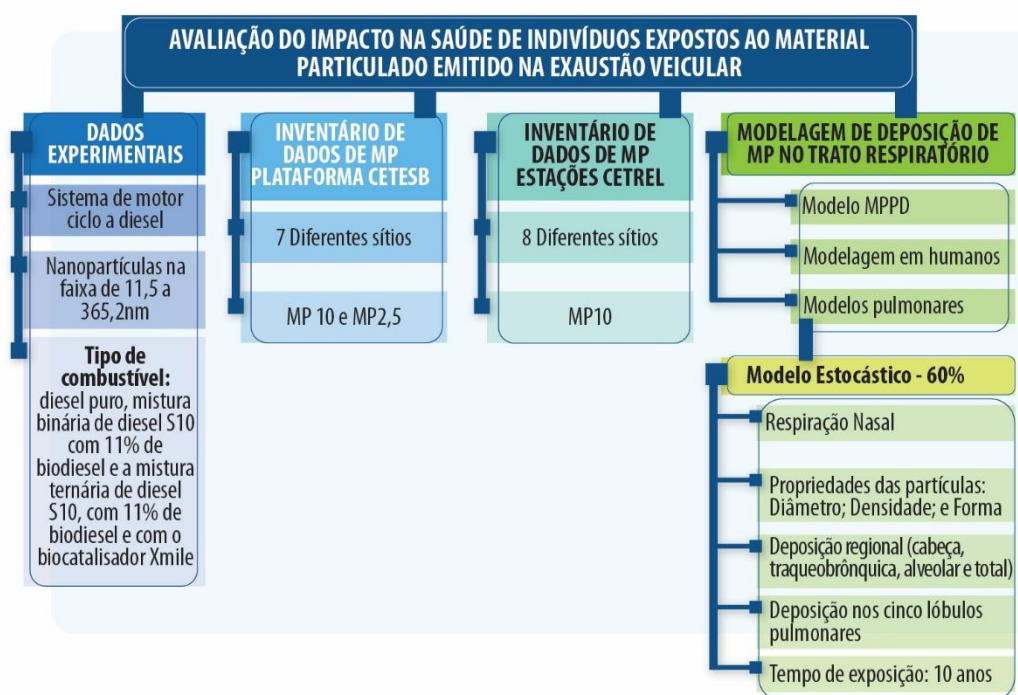
Neste contexto, este projeto visa avaliar o impacto na saúde de indivíduos expostos à emissão de material particulado oriundo da exaustão veicular, utilizando o modelo de dosimetria de partículas de caminho múltiplo (MPPD).

### 3. METODOLOGIA

A presente pesquisa de mestrado apresenta o fluxo metodológico presente na Figura 10, o qual será detalhado a seguir.

Na primeira etapa foi realizada a coleta de MP, através de um contador de partículas inserido num sistema motor ciclo a diesel, em ambiente controlado. A segunda etapa consiste no inventário de dados de MP, exportados da plataforma CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo), onde o objetivo foi realizar a análise de valores de concentração de MP10 e MP2,5 diários da região metropolitana de São Paulo (RMSP), nas estações de monitoramento de ar estabelecidas para o desenvolvimento deste estudo. A terceira etapa consiste no inventário de dados diários de MP10, do ano de 2015, nas estações de monitoramento de ar de Salvador (SSA), onde a qualidade do ar era realizada pela CETREL (Central de Tratamento de Efluentes Líquidos). Vale ressaltar que não há dados atuais de MP em SSA, por falta de renovação contratual entre a empresa e a prefeitura local. Desta forma, a quarta etapa visa avaliar o impacto de MP no trato respiratório humano, em diferentes condições de ambiente e clima dos sítios estabelecidos, através da modelagem dos dados obtidos, no software MPPD.

Figura 10. Fluxograma da metodologia aplicada no projeto



Fonte: Elaboração própria

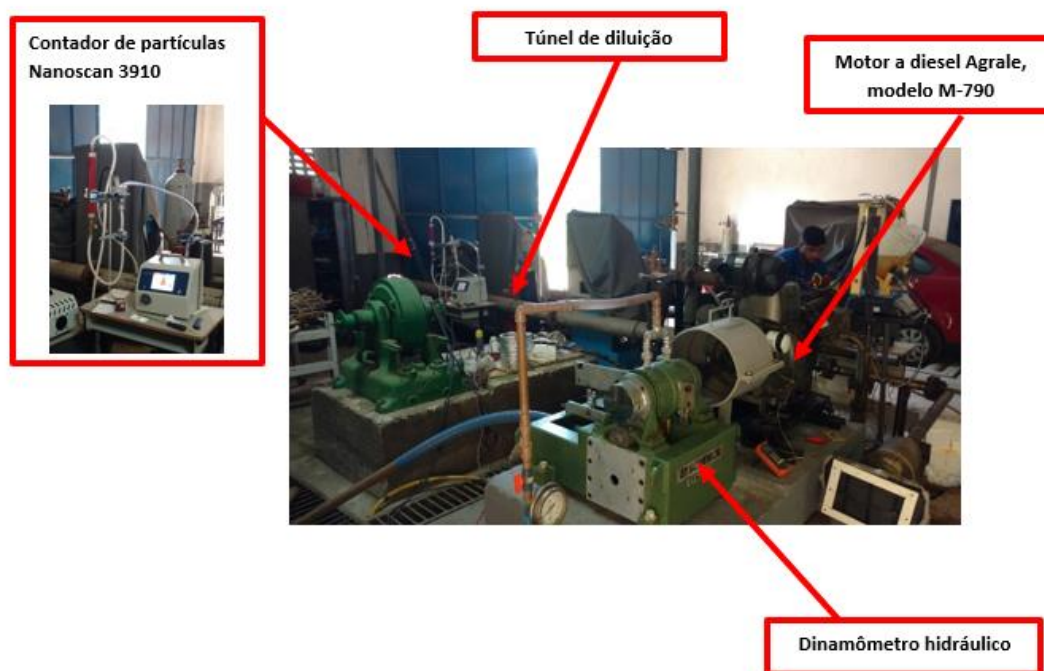
### 3.1. Caracterização dos sítios de coleta de dados

#### 3.1.1. Coleta dos dados experimentais

O sítio A analisou a emissão de nanopartículas utilizando um sistema (Figura 11), em ambiente controlado, onde foi utilizado um motor diesel Agrale, modelo M-790, com velocidade 1700 rpm. Este sistema foi acoplado a um dinamômetro hidráulico (Schenck) com rotação máxima de 10000 rpm e a um túnel de diluição parcial, aplicado para amostragem do material particulado, com taxa de diluição ar/exaustão de 24. Vale ressaltar, que a realização experimental em um sistema de motor ciclo a diesel, com um dinamômetro de bancada, não possui a capacidade de capturar toda a gama de emissões de um veículo em uso, no entanto, oferece um grau alto de eficiência e controle, atingindo o objetivo de simular a dispersão dos poluentes oriundos de emissão veicular.

No desenvolvimento da pesquisa foram utilizados três combustíveis: diesel puro (D), mistura binária de diesel S10 com 11% de biodiesel (B11) e a mistura ternária de diesel S10, com 11% de biodiesel e com o biocatalisador Xmile (B11X). O estudo destes combustíveis visou a caracterização do perfil de contribuição na emissão de nanopartículas. Um contador de partículas Nanoscan SMPS 3910 foi associado ao sistema de exaustão com o intuito de mensurar a concentração do número e distribuição do tamanho do material particulado numa faixa de diâmetro de 11,5nm a 365,2nm.

Figura 11. Sítio A - Sistema de motores ciclo a diesel.



Fonte: Elaboração própria

### 3.1.2. Elaboração de um inventário de dados de material particulado da CETESB

Os boletins diários da qualidade do ar emitidos pela CETESB, disponibilizados no site da organização (<https://cetesb.sp.gov.br/>), foram selecionados para compor o inventário de dados de material particulado.

A qualidade do ar na região metropolitana de São Paulo (RMSP) chama atenção, uma vez que se encontra em condições cada vez mais críticas devido ao aumento excessivo da emissão de poluentes oriundos da exaustão veicular. A CETESB entra como agregadora de valores ambientais, ao realizar um monitoramento diário do ar atmosférico de SP, com o objetivo de mensurar o nível de poluentes emitidos por veículos ou por atividades industriais. Os principais poluentes monitorados pela CETESB na RMSP, são: Dióxido de Enxofre, Partículas Inaláveis (MP<sub>10</sub>), Partículas Inaláveis Finas (MP<sub>2,5</sub>), Dióxido de Nitrogênio, Monóxido de Carbono e Ozônio.

A escolha dos sítios de amostragem foi baseada nos critérios de análise de parametrização dos poluentes, realizada pelas estações de monitoramento do ar da cidade de São Paulo, implementadas pela CETESB, encontradas no Anexo I. Serão selecionadas as estações que fazem medição das duas categorias de MP, as partículas grossas e as finas (MP<sub>10</sub> e MP<sub>2,5</sub>), considerando que não são todas que analisam os dois tamanhos de MP. Desta forma, das 20 estações de monitoramento existentes, apenas 7 atenderam a estes critérios de seleção, são elas:

- Estação Congonhas (Sítio B): Rede de monitoramento localizada no pátio da Escola Municipal Professor João Carlos da Silva Borges;
- Estação Grajaú – Parelheiros (Sítio C): Rede de monitoramento localizada no pátio da Escola Estadual Presidente Tancredo de Almeida Neves;
- Estação Itaim Paulista (Sítio D): Rede de monitoramento localizada no pátio da Biblioteca Municipal Vicente Paulo Guimarães;
- Estação Marg. Tietê - Ponte dos Remédios (Sítio E): Rede de monitoramento localizada no pátio do Centro de Treinamento do Comando de Policiamento Rodoviário da Polícia Militar;
- Estação Guarulhos – Paço Municipal (Sítio F): Rede de monitoramento localizada no Jardim Bom Clima – Guarulhos Paço Municipal;
- Estação Parque D. Pedro II (Sítio G): Rede de monitoramento localizada na área externa do Palácio das Indústrias, encontrado nas extensões do Parque D. Pedro II;

- Estação Pinheiros (Sítio H): Rede de monitoramento localizada na CETESB.

Estas estações estão localizadas em regiões onde as atividades industriais estão muito presentes, de forma que, apresenta em seus arredores, edifícios altos, poucas áreas arbóreas, além de estarem próximas a avenidas e rodovias. Neste contexto, estes sítios sofrem a interferência do tráfego intenso nas proximidades, evidenciando momentos de picos, onde o fluxo de veículos leves e pesados é bastante elevado, vinculando a estes locais um perfil com alto impacto de emissões veiculares (CETESB, 2018).

### 3.1.3 Elaboração de um inventário de dados de material particulado da CETREL

Foram inventariados para este estudo, dados diários de monitoramento de MP<sub>10</sub>, realizado pela CETREL, no ano de 2015. Não foi estabelecido nenhum critério de análise destes dados, uma vez que a empresa realizava medição de apenas MP<sub>10</sub> e pelo fato da CETREL ter realizado o monitoramento de ar em Salvador até o ano de 2015 (não houve renovação contratual com a prefeitura local), sendo optados para este estudo, os dados referentes ao ano de 2015 (mais atual). A localização via satélite das estações que faziam parte da rede de monitoramento em Salvador está encontrada no Anexo II.

Embora este trabalho busque uma análise de dados atuais, a avaliação dos dados da CETREL foram agregadoras a esta pesquisa de mestrado, para identificar qual região, dentre das monitoradas na cidade, que mais emitia material particulado além de comparar a emissão MP em SSA e na RSMP, por apresentarem condições de clima e ambiente distintos. A rede de monitoramento de ar em Salvador consistia em 8 estações, as quais são:

- Estação ACM (Sítio I): Rede de monitoramento localizada na sede do DETRAN (Departamento Estadual de Trânsito);
- Estação Barros Reis (Sítio II): Rede de monitoramento localizada no canteiro central em frente à Fiori retiro;
- Estação Campo Grande (Sítio III): Rede de monitoramento localizada no canteiro Central em frente ao Teatro Castro Alves;
- Estação Dique do Tororó (Sítio IV): Rede de monitoramento localizada na sede da SUCOP (Superintendência de Obras Públicas);
- Estação Itigara (Sítio V): Rede de monitoramento localizada ao lado do Parque da Cidade;

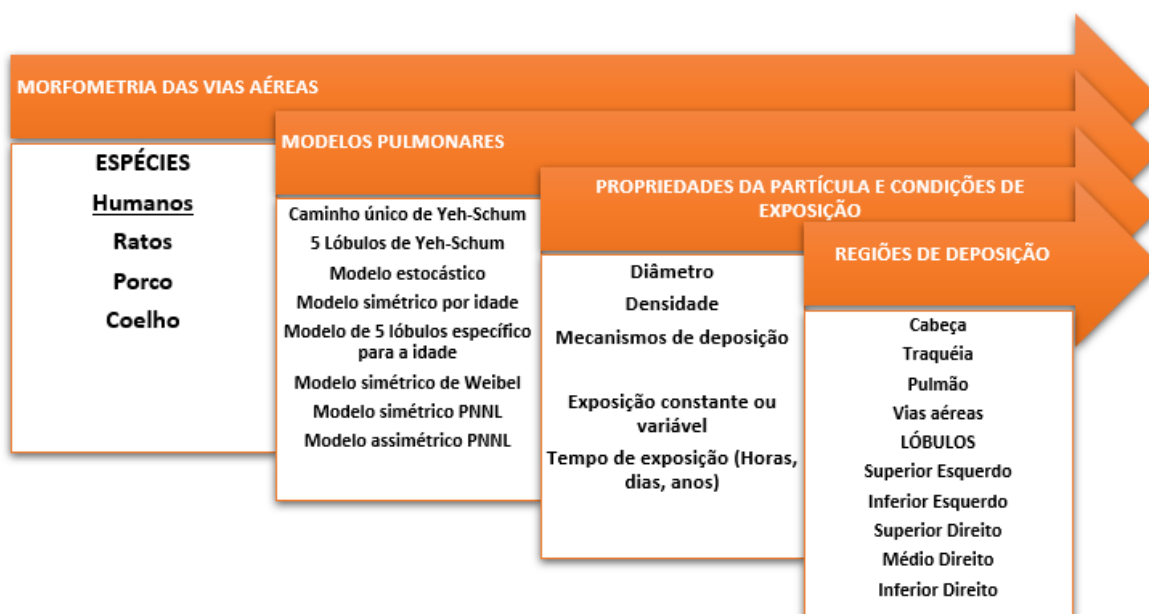
- Estação Paralela (Sítio VI): Rede de monitoramento localizada na sede da SEPLAN (Secretaria Do Planejamento);
- Estação Pirajá (Sítio VII): Rede de monitoramento localizada na Embasa Pirajá.
- Estação Rio Vermelho (Sítio VIII): Rede de monitoramento localizada na Embasa Lucaia.

### 3.2. Modelagem de dosimetria de partículas de caminho múltiplo utilizando dados de material particulado inventariados

Com o intuito de avaliar como a variação de tamanhos de partículas oriundas da emissão veicular se comportam no trato respiratório, será utilizado o software MPPD (Multiple-path Particle Dosimetry Model) versão 3.04 a partir dos dados inventariados. Este modelo visa calcular a deposição e depuração de aerossóis monodispersos e polidispersos nas linhas respiratórias de diferentes espécies, inclusive a espécie humana (foco do projeto) de faixa etárias distintas como em adultos e crianças para partículas com tamanhos que variam de ultrafinos a grossos.

A modelagem no MPPD ocorre de acordo com as etapas de dados de entradas, essenciais para mensurar o nível de concentração de MP no pulmão (Figura 12).

Figura 12. Fluxo da modelagem do MPPD



Fonte: Adaptado MPPD v3.04.

Nesta etapa do estudo, os dados inventariados serão inseridos no software MPPD, utilizando o modelo estocástico (tamanho pulmonar - percentil 60 da via aérea). Esta é a melhor opção que fornece um cenário próximo às condições reais de deposição de MP no pulmão, uma vez que dispõe de diversas geometrias estocásticas no trato respiratório (Tabela 4).

Tabela 4. Valores de entrada para o modelo estocástico

<b>Modelos de morfometria da via aérea</b>	
Espécie/Modelo	Modelo Estocástico - 60%
FRC (ml)	3300 <sup>a</sup>
URT (ml)	50 <sup>b</sup>
Tipo de Respiração	Nasal
<b>Parâmetros Respiratórios</b>	
Volume Tidal (ml)	625 <sup>c</sup>
Frequência respiratória	12 min <sup>-1</sup>
Fração respiratória	0,5
Posição do ocupante	Ereto
<b>Propriedades da partícula</b>	
Diâmetro	Distribuição de partículas polidispersas
Densidade	1,2 g/cm <sup>3</sup>
Forma	Esférica
<b>Tempo de Exposição</b>	
Nº de horas por dia	1
Nº de dias por semana	7
Semanas	522 0 anos)



### 3.3. Avaliação do impacto à exposição de material particulado utilizando modelo de dosimetria de partículas de caminho múltiplo

A deposição de MP no trato respiratório humano, utilizando o MPPD, será avaliada em seis etapas. As etapas de 1 a 5 se referem ao impacto do MP emitido por D, B11 e B11X do sítio A (Sistema motor ciclo a diesel), no pulmão. Na etapa 1 será avaliada a deposição de MP nas regiões do pulmão.

A etapa 2 consistirá na avaliação da fração de deposição do número de partículas por alvéolo em cada lóbulo do pulmão. A etapa 3 irá avaliar a deposição de material particulado no pulmão, através de ilustrações que fornecem uma visão mais detalhada da fração mássica e numérica de partículas depositadas. A etapa 4 irá avaliar a fração de deposição de MP em cada geração do trato respiratório humano, explicitado na figura 8. Na etapa 5 será avaliado o impacto de MP na saúde humana ao longo de 10 anos e uma análise comparativa entre intervalos de exposição (1 dia, 1 semana, 1 mês e 1 ano), para 4 diâmetros emitidos pelos combustíveis do sítio A.

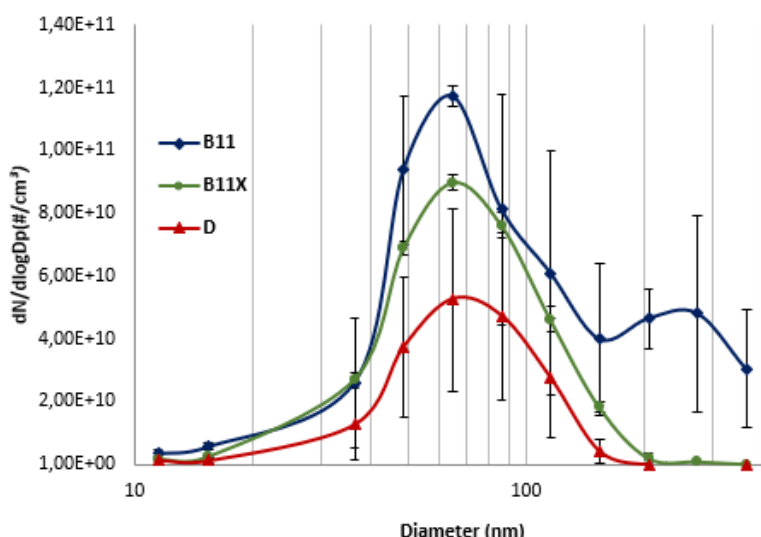
Assim como na etapa 5, as etapas 6 e 7 também irão realizar a mesma análise, porém para os sítios de B a H, referentes às estações de monitoramento da CETESB e para os sítios I a VIII, referentes às estações de monitoramento da CETREL. Esta avaliação irá mensurar o nível de exposição de um indivíduo em relação à emissão veicular, em diferentes ambientes da região metropolitana de São Paulo e da cidade de Salvador, com base na análise de índice de MP emitido em cada sítio.

## 4. RESULTADOS PRELIMINARES

### 4.1. Avaliação da distribuição da concentração de tamanho de MP nos sítios estudados – Sítio A (Sistema de motores ciclo a diesel)

No sítio A foram avaliados a distribuição e concentração dos tamanhos de MP, na faixa de 11,5 a 365,2 nm, para três tipos de combustíveis: diesel puro (D), mistura binária de diesel puro com 11% de biodiesel (B11) e a mistura ternária de diesel puro, com 11% de biodiesel e com o biocatalisador Xmile (B11X). Os resultados obtidos na etapa experimental mostraram que os três combustíveis (D, B11 e B11X) apresentaram valores de concentração dentro da faixa de tamanhos de partículas emitidas por motores a diesel (20-130 nm) (GUARIEIRO, 2014) (Figura 13).

Figura 13. Distribuição do número e tamanho de partículas de combustíveis: D, B11e B11 X.



O gráfico apresentado na figura 13 ratifica que partículas emitidas por motores a diesel apresentam valores de concentrações no modo acumulação (50 a 200 nm) numa faixa de 45 a 160 nm, demonstrando que os padrões obtidos estão de acordo com a literatura (GUARIEIRO, 2014). Diante deste cenário, foi possível observar que as barras de erro do gráfico se sobrepõem, enfatizando que os três combustíveis possuem distribuição de tamanho e número de partículas estatisticamente semelhantes, entretanto, na faixa de tamanho de 50 a 160nm ocorre uma diferença nesta distribuição.

A presença de biodiesel no diesel puro (B11) apresentou maiores índices de emissão, dentro da faixa de 45 a 160 nm, comparados ao B11X que demonstrou eficiência na utilização do aditivo à mistura ao emitir menor quantidade de partículas, o que corrobora com outros resultados da literatura (KUMAR, 2018). Porém, é necessário ressaltar que a adição de biodiesel reduz a massa total de MP, mas emite mais partículas finas e ultrafinas em comparação

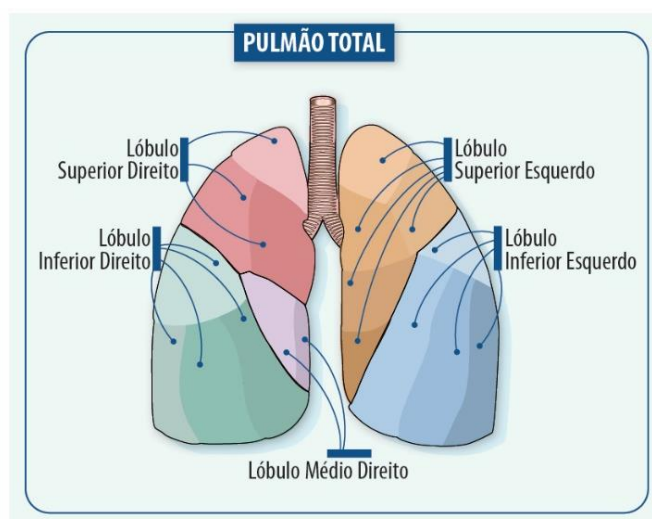
ao diesel puro, que apresentou valores menores que o B11 e B11X (GUARIEIRO, 2014).

#### 4.1.1. Avaliação do impacto à exposição de material particulado utilizando o MPPD – Sítio A (Sistema de motores ciclo a diesel)

A partir dos resultados discutidos no tópico 4.1 foi possível traçar um padrão para cada combustível estudado (D, B11 e B11X), considerando as características do biodiesel mencionadas no tópico destacado. A sequência formada consiste em: MP Diesel Puro < MPB11X < B11. Assim, os resultados obtidos desta etapa foram imputados no Modelo de Dosimetria de Caminhos Múltiplos (MPPD) com objetivo de avaliar o impacto do MP no trato respiratório humano.

Conforme mencionado na etapa experimental deste estudo, foi utilizado o modelo pulmonar estocástico 60%, que apresenta como principal dado de entrada, o diâmetro da partícula. Desta forma, o valor da fração de deposição vai variar de acordo com o tamanho de MP, independente do combustível e do seu valor de concentração (HUSSAIN, 2011). Para melhor compreensão de como o material particulado é depositado no pulmão, a figura 14 apresenta os 5 lóbulos pulmonares (superior esquerdo - SU; inferior esquerdo - IF; superior direito - SD; médio direito - MD e inferior direito - ID), que fazem parte da anatomia do sistema respiratório humano.

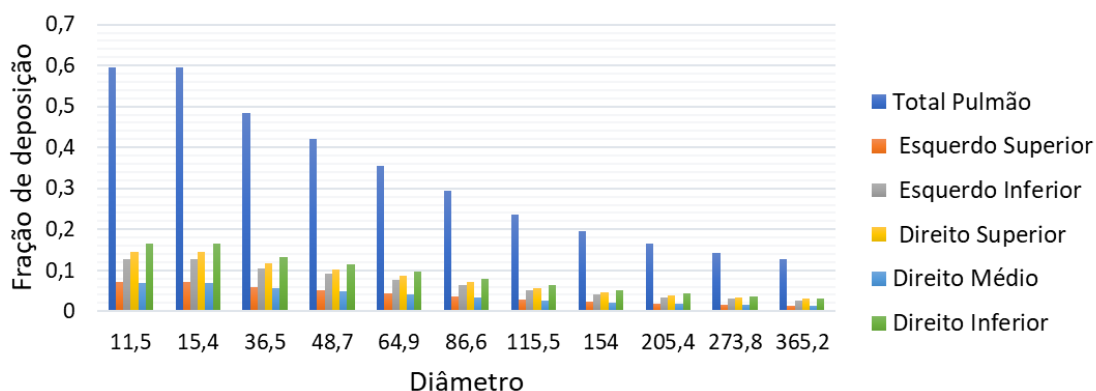
Figura 14. Diagrama dos lóbulos pulmonares humano.



A deposição de MP nos diferentes lóbulos pulmonares foi analisada na figura 15, considerando os diâmetros do MP emitido (11,5 a 365,2 nm) pelos combustíveis estudados (D, B11 e B11X). A figura 15 reforça que quanto menor o diâmetro, maior é a fração de deposição em todo o pulmão e nos 5 lóbulos pulmonares. É possível destacar que o lóbulo inferior direito tem tendência a acumular mais partículas, porém, nos lóbulos superior esquerdo e médio direito

a deposição de partículas é menor. Este resultado pode estar associado ao fato de o lóbulo direito ser mais largo, porém mais curto, e estar mais próximo a traqueia, de forma que, as partículas finas e ultrafinas (emitidas pelos combustíveis estudados) podem atingir com mais facilidade o lóbulo direito inferior. O lóbulo direito médio está localizado em uma posição mais retraída do lado direito do pulmão, de forma que, se torna mais difícil a trajetória das partículas para esta região, assim como na região do lóbulo superior esquerdo, que por ser mais extensa, as partículas se dispersam mais facilmente.

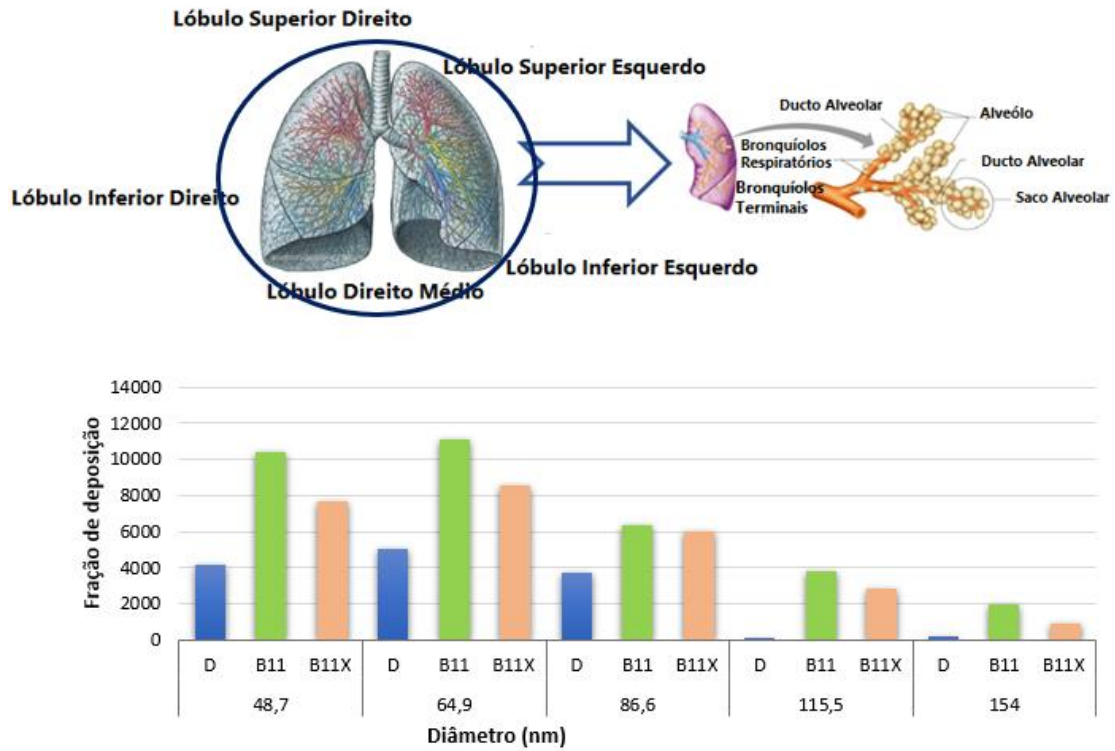
Figura 15. Fração de deposição de MP nos lóbulos pulmonares dos combustíveis estudados (D, B11 e B11X).



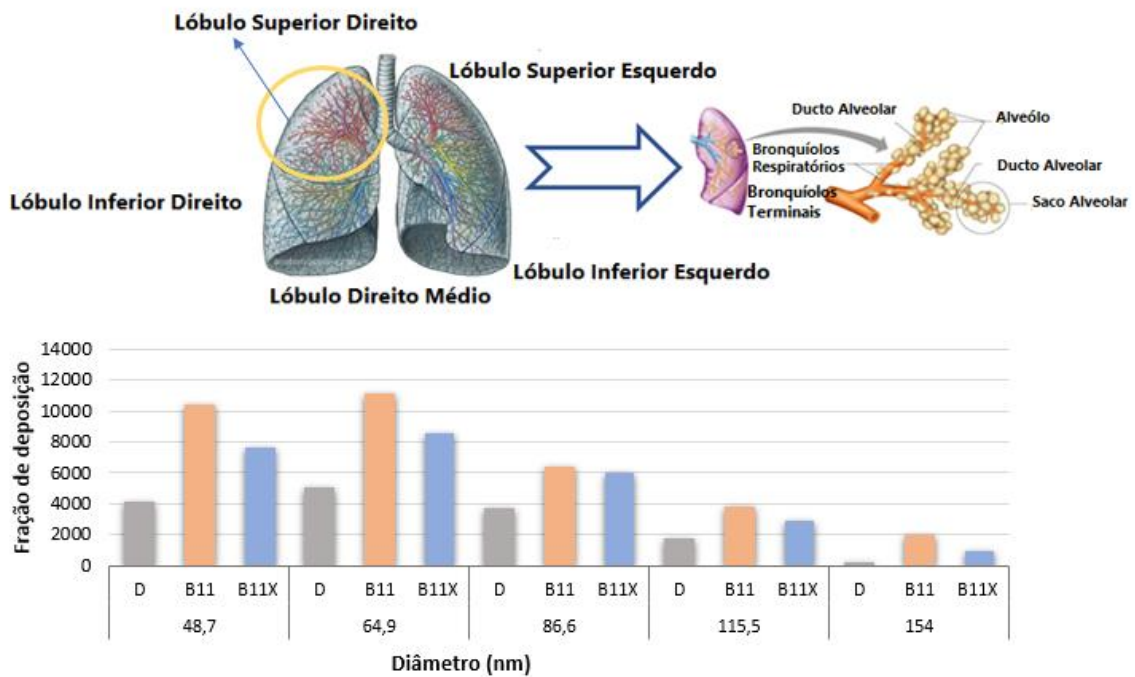
Além de gerar resultados da deposição de MP no trato respiratório humano, o MPPD fornece dados de como o número de partículas variam por alvéolo, em todo o pulmão e em cada lóbulo pulmonar. As figuras 16 (a, b c, d, e, f) consistem na análise da fração de deposição de MP por alvéolo, para os diâmetros que apresentaram valores de concentrações no modo acumulação (45nm a 160nm), explanado na figura 13, considerando os três combustíveis estudados.

Figura 16. Fração de deposição do número de partículas por alvéolo para o D, B11 e B11X (a) Pulmão Total; (b). Direito Superior; (c) Direito Médio; (d) Direito Inferior; (e) Esquerdo Superior; (f) Esquerdo Inferior.

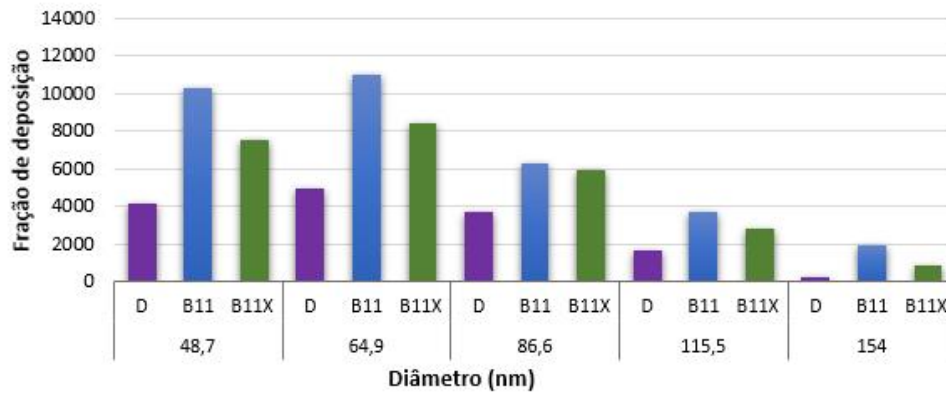
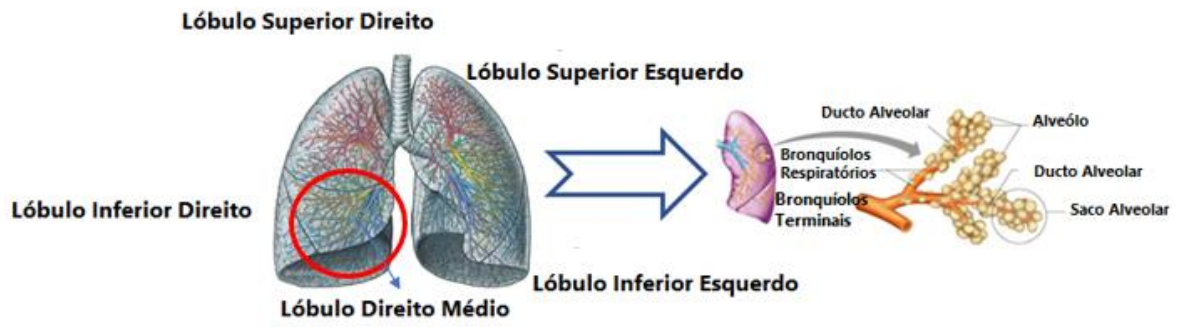
(a)



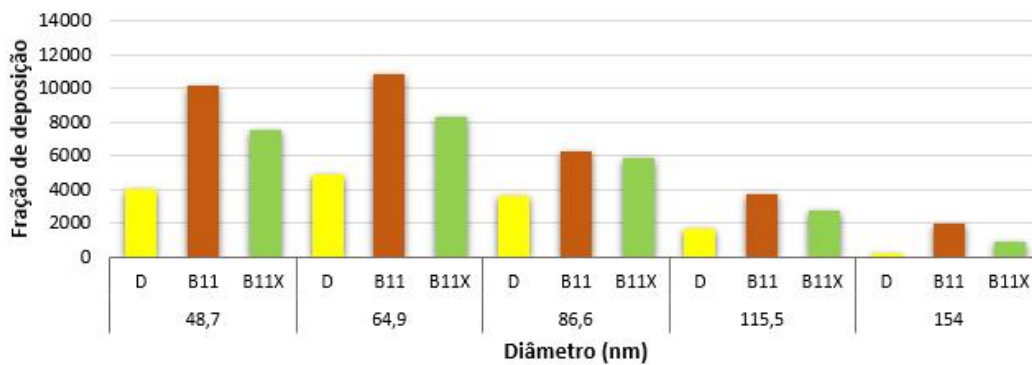
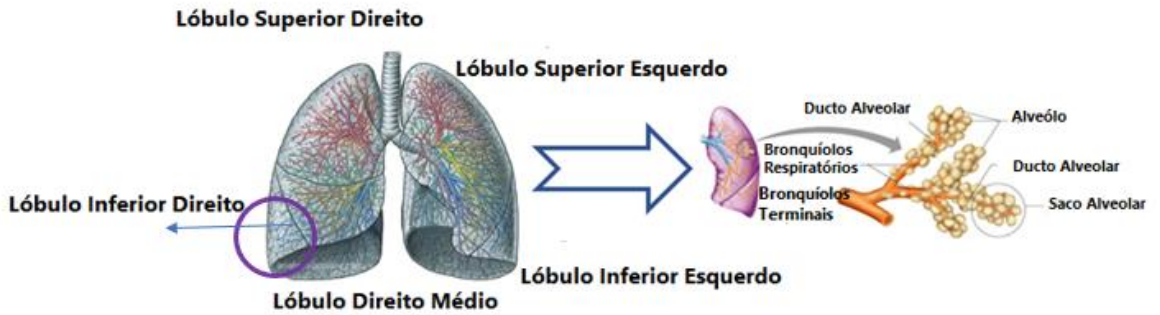
(b)



(c)

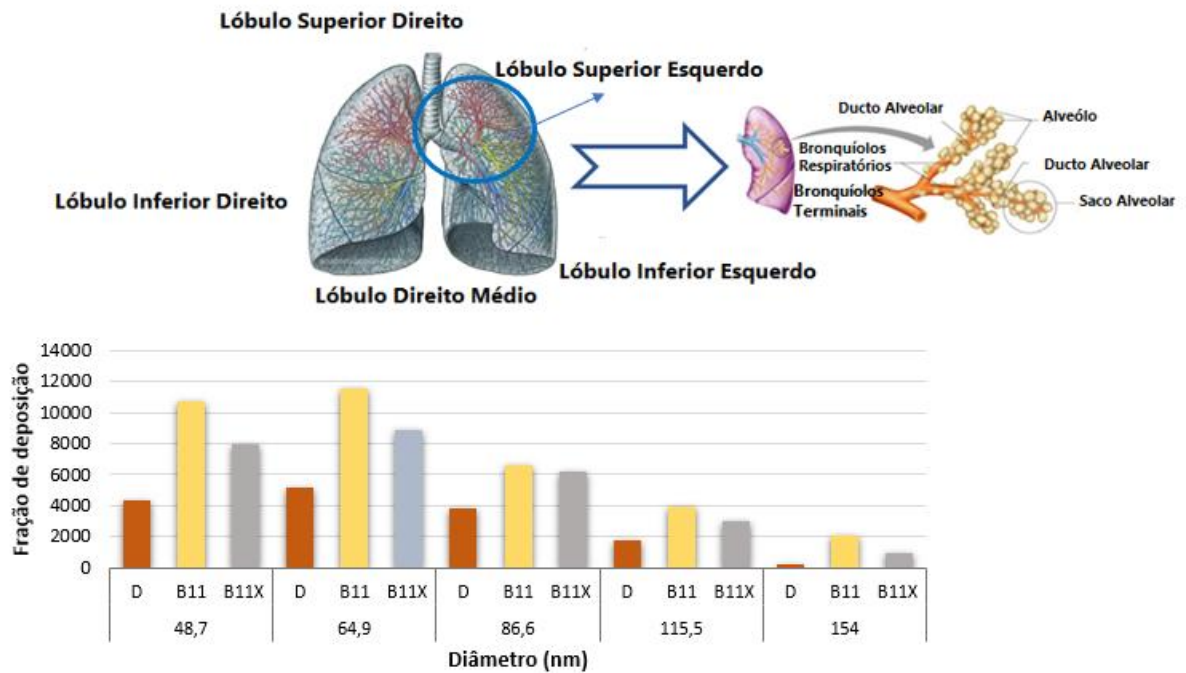


(d)

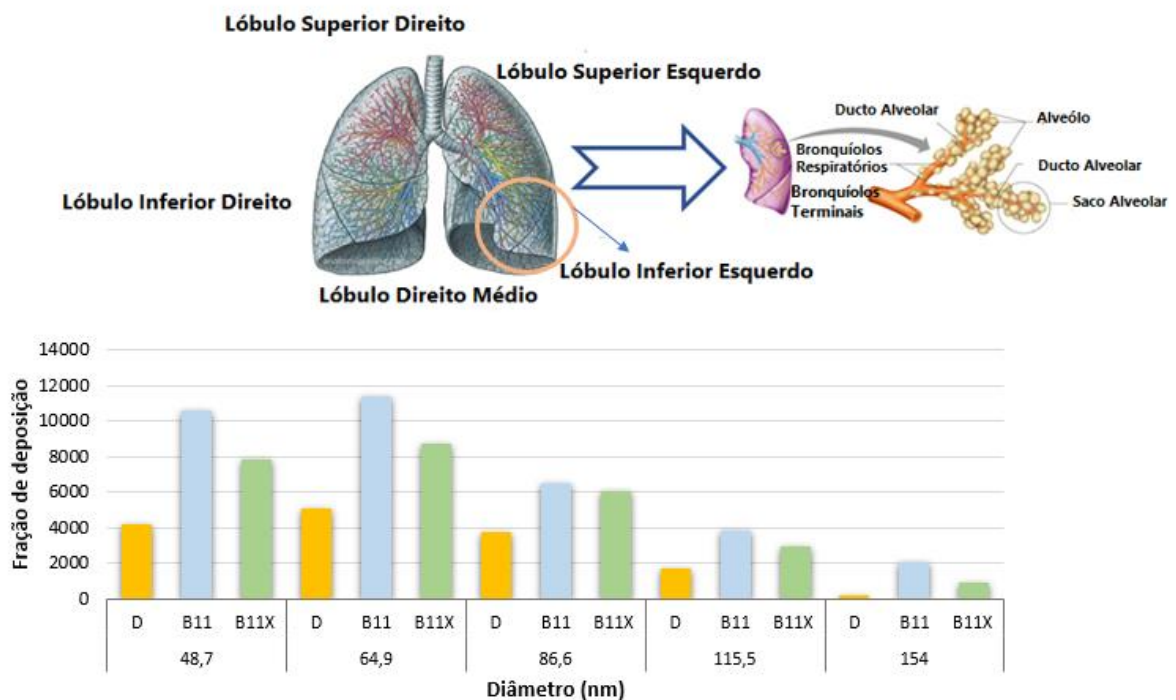




(e)



(f)



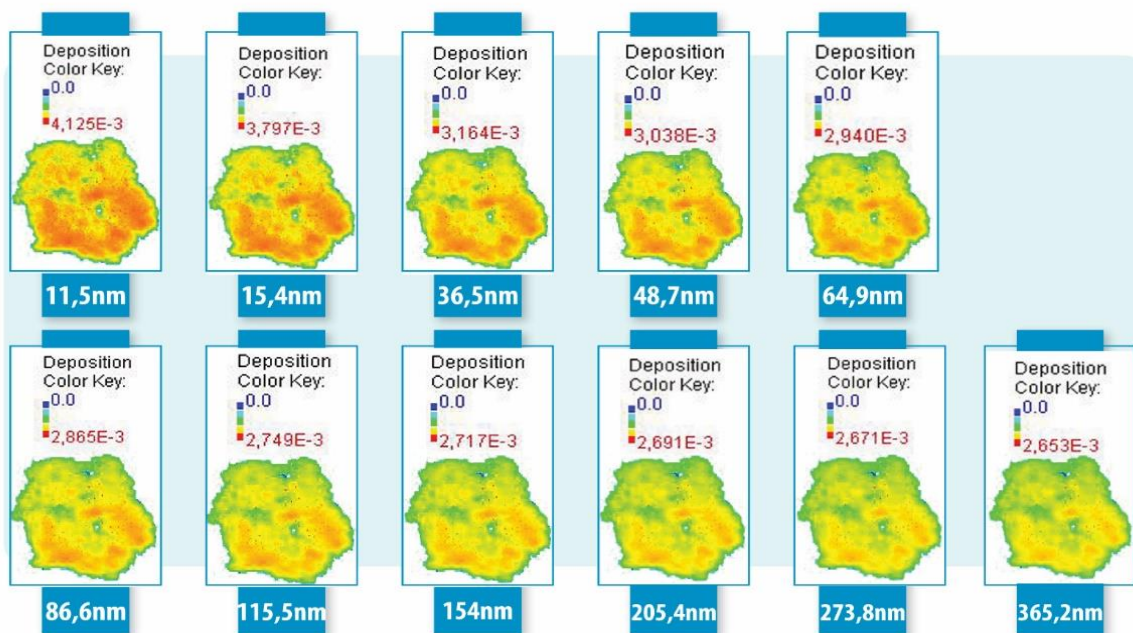
As figuras 16 (a, b, c, d, e, f) mostraram que a deposição numérica por alvéolo foi maior para o combustível B11, em todo o pulmão e nos 5 lóbulos pulmonares, principalmente para o diâmetro 64,9, que corresponde à região de maior valor de concentração de partículas no gráfico de emissão de MP (Figura 13). A deposição de MP para o D e o B11X mostrou-se semelhante ao

comportamento dos combustíveis no gráfico de emissão de partículas oriundas de motores ciclo a diesel (Figura 13), de forma que, a deposição de partículas por alvéolo é maior para o B11X do que para o diesel puro, em todas as regiões pulmonares. É importante mencionar também, que o fluxo de deposição por tamanho é o mesmo, quanto menor o diâmetro maior a fração de deposição no trato respiratório.

Além de dados de como o MP é depositado em todo o pulmão, o MPPD também fornece dados do trato respiratório humano, mostrando como cada tamanho de partícula pode impactar em todo pulmão. Estas visualizações estão apresentadas nas figuras 17 (a e b), as quais mostram a fração de deposição numérica e mássica de MP, para cada valor de diâmetro (11,5 a 365,2 nm) dos combustíveis estudados, ressaltando que o modelo considera o tamanho da partícula como característica fundamental para mensurar a deposição no aparelho respiratório.

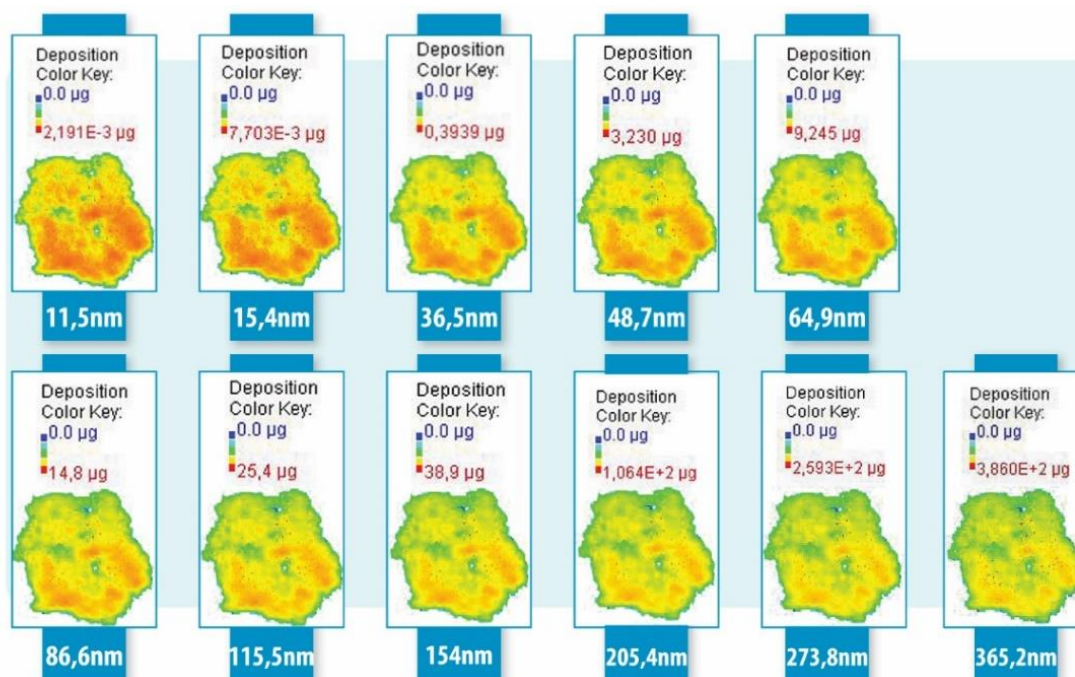
Figura 17. (a) Visualização da fração de deposição dos combustíveis estudados (D, B11 e B11X); (b) Visualização mássica de deposição dos combustíveis estudados (D, B11 e B11X).

(a)





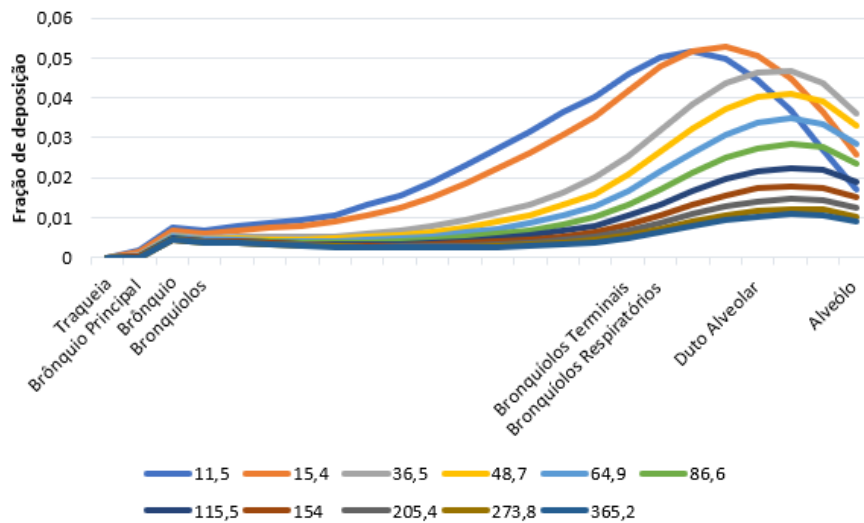
(b)



As ilustrações apresentadas nas figuras 17 (a e b) mostram que ambas as deposições numérica e mássica, apresentam valores de concentrações menores à medida que o valor do diâmetro aumenta. A intensidade da cor representa o comportamento do tamanho de partícula depositada, de forma que, quanto mais forte for a cor, maior é o nível de impacto causado pela deposição de material particulado. Diante disto, é possível observar que quanto maior for o tamanho da partícula, menor é a intensidade da deposição de MP no trato respiratório.

A figura 18 representa a fração de deposição de cada tamanho de diâmetro (11,5 a 365,2 nm) para os três combustíveis estudados (D, B11 e B11X), nas diferentes gerações (de 0 a 23) que fazem parte do trato respiratório humano. Cada geração é correspondente a cada região anatômica do pulmão, conforme já explicitado na figura 8.

Figura 18. Fração de deposição de partículas por número de geração do pulmão

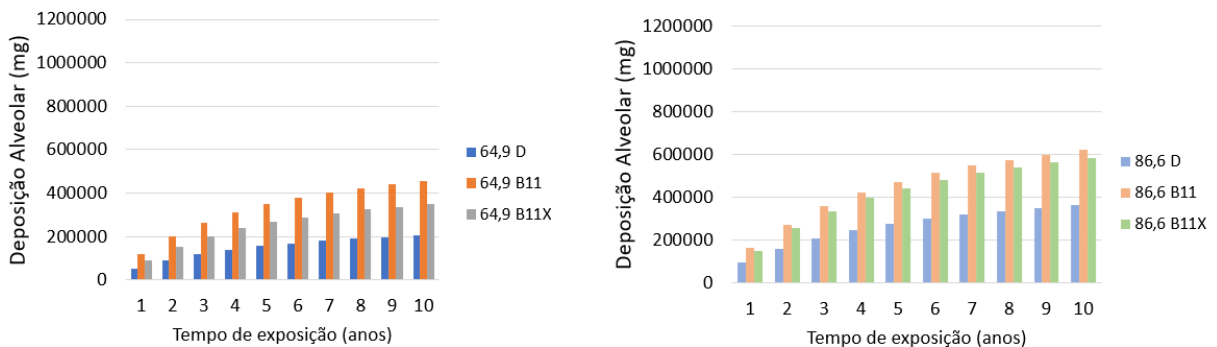


A figura 18 mostrou que as regiões dos bronquíolos respiratórios e do duto alveolar (geração 19 e 20) apresentaram maior tendência de possuírem partículas depositadas, independente do seu diâmetro. É possível constatar que a região do duto alveolar (geração 20 a 22) apresentou maior impacto na deposição de MP, comprovando que quanto menor for a partícula maior capacidade de atingir as regiões alveolares do pulmão.

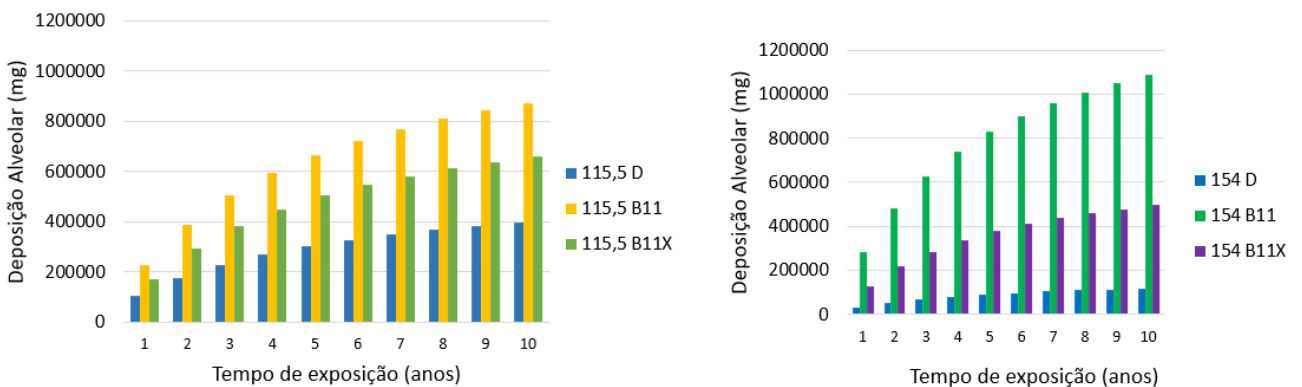
Além das diversas opções de como a deposição de MP pode impactar no sistema respiratório humano, o MPPD também fornece cenários de como um indivíduo pode estar exposto à emissão de partículas, incluindo variáveis como: postura corporal, respiração, número de horas por dia, número de dias por semana e número de semanas. Diante disto, a simulação considerou o seguinte cenário de exposição aos poluentes: o indivíduo no ponto de ônibus esperando 1 hora por dia (30 minutos de espera na ida e 30 min de espera na volta ao trabalho), em 7 dias por semana, considerando um tempo de 10 anos (522 semanas). As figuras 19 (a e b) apresentam um comparativo da deposição alveolar em 10 anos entre os combustíveis D, B11 e B11X, considerando os tamanhos 64,9nm, 86,6nm, 115,5nm e 154nm, os quais se encontram no modo de acumulação no gráfico de emissão de partículas (Figura 13).

Figura 19. Deposição de MP na região alveolar ao longo de 10 anos (a) 64,9 e 86,6nm; (b) 115,5 e 154nm

(a)



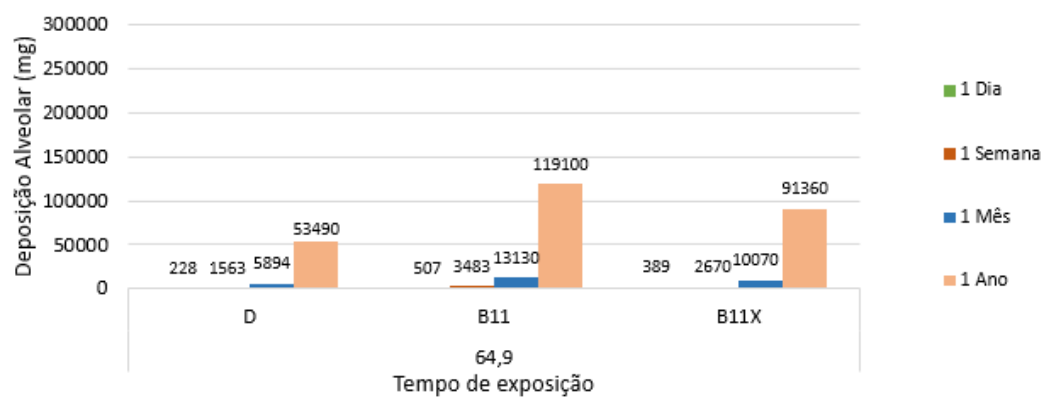
(b)



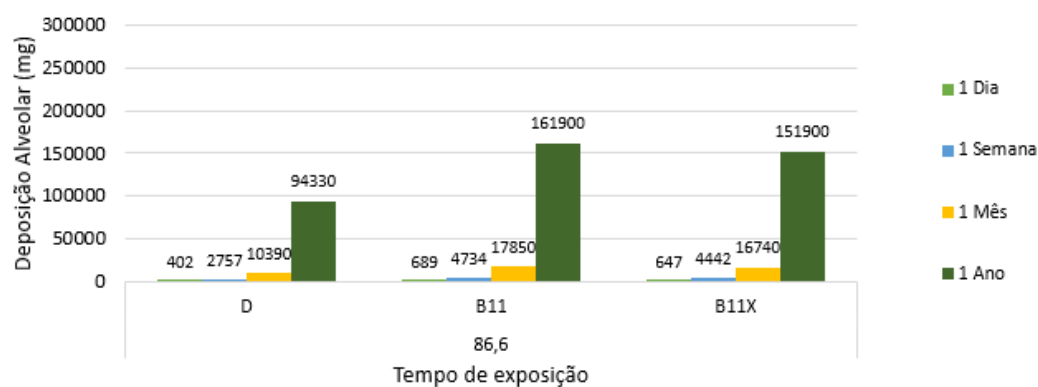
A partir das figuras 19 (a e b) foi possível constatar que a exposição ao material particulado aumenta com o passar dos anos, sinalizando o MP oriundo do combustível B11 como o de maior impacto no trato respiratório humano, para os tamanhos de diâmetro analisados e para o cenário estabelecido. Além disso, os diâmetros 64,9nm e 86,6nm para os três combustíveis estudados (D, B11 e B11X), se destacaram por apresentar maiores valores de deposição alveolar ao longo de 10 anos, correspondendo ao gráfico de emissão de MP (figura 13), onde os tamanhos mencionados também apresentaram valores altos de concentração de partículas. Foi observado também, que o cenário de exposição do indivíduo ao material particulado com o passar dos anos, manteve o padrão de deposição de partículas conforme a variação de seu tamanho, de forma que, quanto menor o diâmetro maior capacidade do MP de atingir as vias respiratórias do pulmão. Além de como ocorre a deposição de MP ao longo dos anos, foi realizada uma análise comparativa (Figuras 20 (a, b, c e d)), de como o número de partículas depositadas no trato respiratório humano variam com o passar de 1 dia, 1 semana, 1 mês e 1 ano, na mesma faixa de tamanhos (64,9nm a 154nm) analisada anteriormente.

Figura 20. Análise comparativa da deposição alveolar ao longo do tempo (a) 64,9nm; (b) 86,6nm; (c) 115,5nm; (d) 154nm.

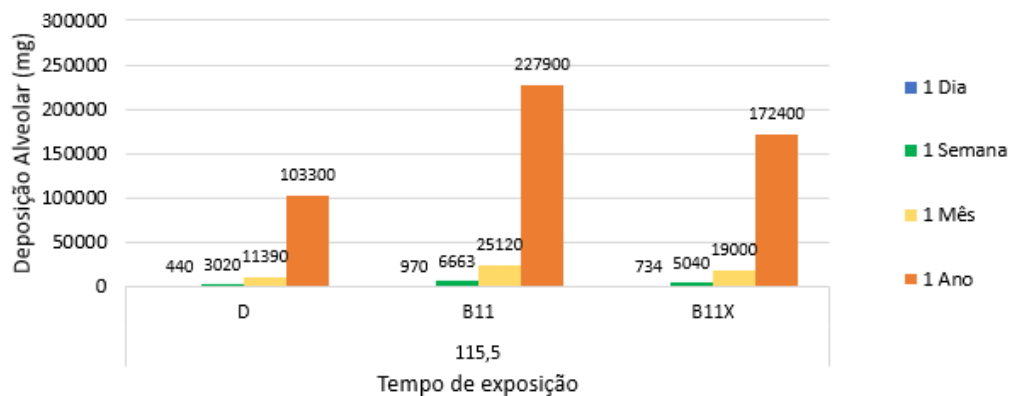
(a)



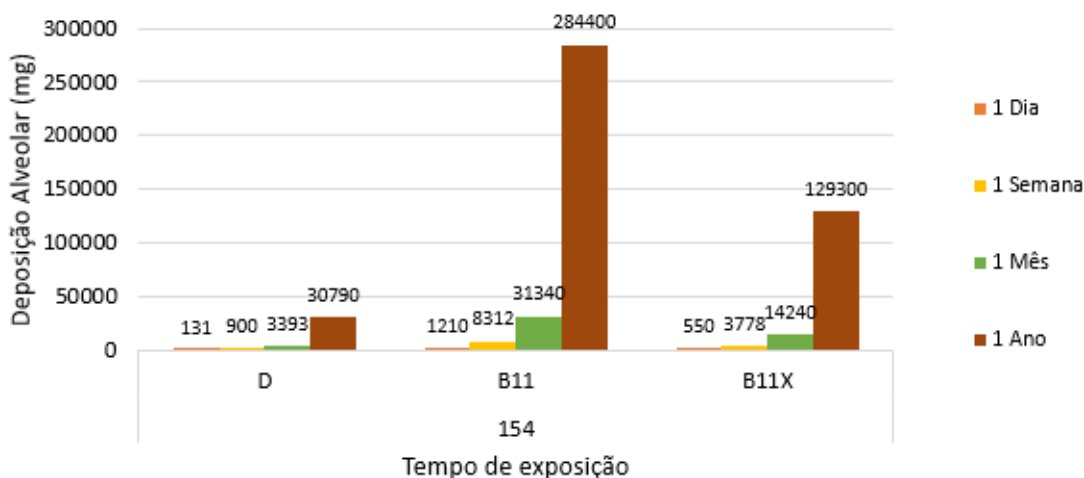
(b)



(c)



(d)



A análise entre os tempos de exposição para cada combustível e para cada tamanho estudado mostrou que a média da variação de um dia para uma semana, de uma semana para um mês, de um mês para um ano foi de 85,44%, 73,47% e 88,98%, respectivamente (Tabela 5).

Tabela 5. Variação do tempo de deposição alveolar

Varição tempo de exposição	Combustível D, B11 e B11X
1 Dia x 1 Semana	85,44%
1 Semana x 1 Mês	73,47%
1 Mês x 1 Ano	88,98%
1 Dia x 1 Ano	99,57%

Diante desses dados é possível constatar que a relação entre um mês e um ano de exposição apresentou uma variação da deposição de MP no pulmão de quase 90%, assim como a relação entre um dia e um ano de exposição é de aproximadamente 100%. Estes resultados mostram o quanto o MP oriundo de transporte público pode impactar no sistema respiratório humano, de forma que, quanto mais tempo no local maior a probabilidade que o indivíduo tem de inalar estas partículas. Nesta análise, o combustível B11 também se destaca para os tamanhos estudados (64,9nm, 86,6nm, 115,5nm e 154nm) apresentando maior capacidade de deposição de partículas a medida em que o tempo de exposição (Dia, semanas, meses e anos) aumenta, uma vez que, segundo a literatura, a mistura de diesel e biodiesel embora diminua a massa total de MP, emite mais partículas ultrafinas, justificando o impacto do B11 no trato respiratório.

#### 4.2. Avaliação dos valores de concentração de MP<sub>10</sub> e MP<sub>2,5</sub> para os sítios B a H– Estações CETESB

A avaliação dos dados diários de MP<sub>10</sub> e MP<sub>2,5</sub>, que correspondem aos sítios estabelecidos (estações CETESB), teve como base de estudo os relatórios anuais desenvolvidos pela CETESB, os quais avaliam o nível de emissão de cada poluente, através da média aritmética dos valores de concentração ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) diários obtidos em todo o ano. Desta forma, este estudo realizou uma análise comparativa entre os anos de 2019 e 2020, com o intuito de avaliar estes dados, em um mesmo intervalo de tempo, considerando que o ano atual (2020) ainda não foi finalizado. O período estabelecido para análise foi: 01 de janeiro a 30 de setembro de cada ano.

Os valores das médias anuais de cada estação, para MP<sub>10</sub> e MP<sub>2,5</sub>, foram analisados de acordo com a resolução CONAMA nº 491 de 19/11/2018, onde para cada valor de MP foi gerado um gráfico boxplot, com o objetivo de fornecer a distribuição da concentração de partículas entre os anos de 2019 e 2020 e visualizar os dados numa disposição gráfica comparativa, para cada sítio analisado (Figura 21 e 22).

Figura 21. Análise da média anual (2019 e 2020) de MP<sub>10</sub> para cada sítio da RMSP.

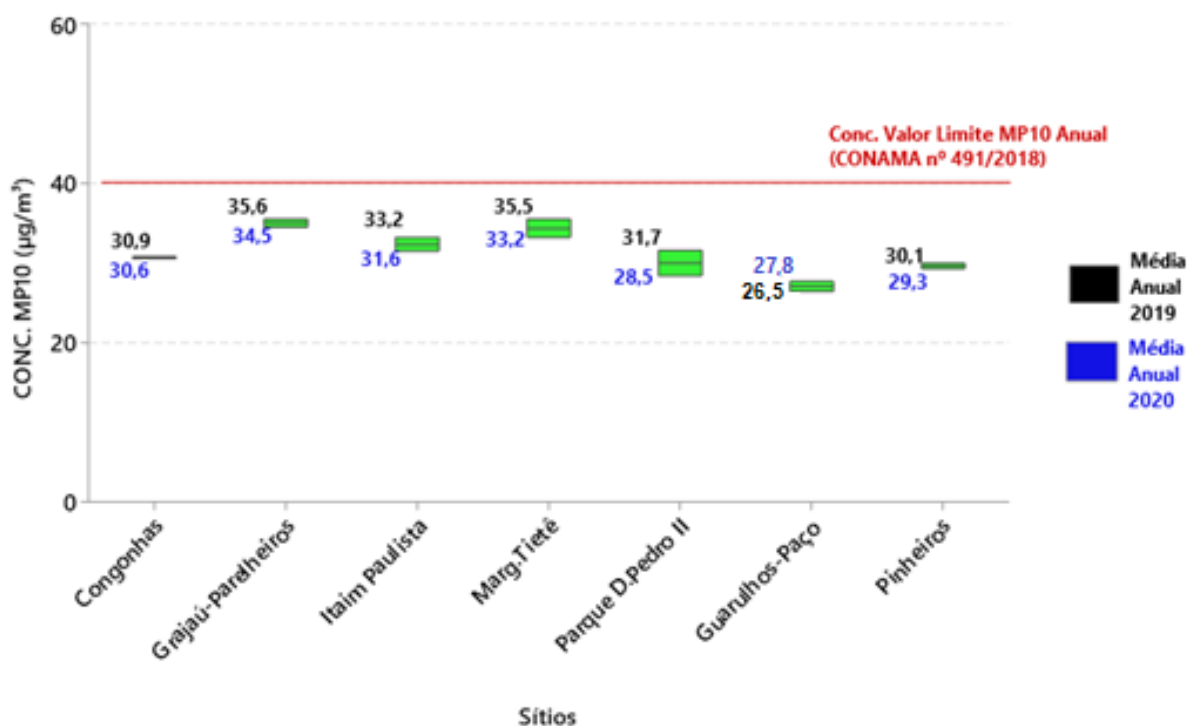
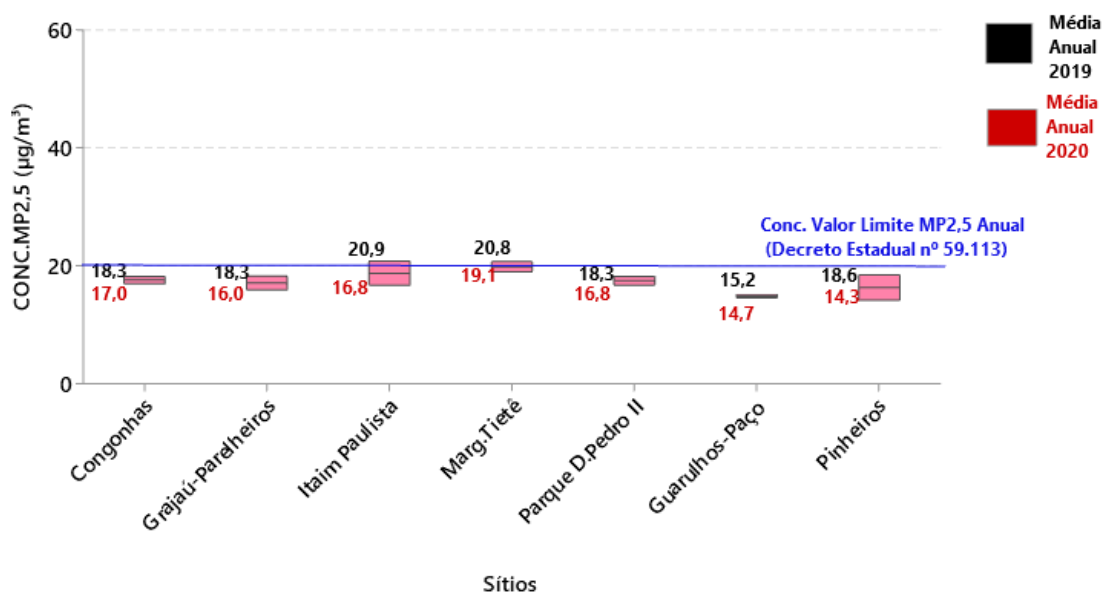


Figura 22. Análise da média anual (2019 e 2020) de MP<sub>2,5</sub> para cada sítio da RMSP



Os valores de concentração média anual ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) para o MP<sub>10</sub> e MP<sub>2,5</sub>, apresentaram uma diminuição no ano de 2020 para todos os sítios, com exceção da estação Guarulhos – Paço, que apresentou uma pequena elevação na média anual de MP<sub>10</sub>, podendo estar associado às queimadas ocorridas no mês de setembro de 2020, no Centro-Oeste do país. Este evento, atingiu o Estado de São Paulo, por meio da ação de vento, que levou as plumas de fumaça para a região, mas principalmente na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), onde está encontrada a estação Guarulhos – Paço Municipal (CETESB, 2020).

Além disso, São Paulo apresentou alto índice de emissão de MP na estação de inverno, no período compreendido entre os meses de maio a setembro, em que apresenta baixa umidade, baixos índices pluviométricos e ventos fracos, levando à baixa dispersão de poluentes na atmosfera. Em 2019, além de ter sofrido influência destes fatores no período de inverno, São Paulo passou pela ação do fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS) com fraca intensidade na parte continental do estado, ocasionando anomalias negativas de precipitação na RSMP (CETESB, 2019).

A diminuição da concentração anual de MP<sub>10</sub> e MP<sub>2,5</sub> em 2020 representa os efeitos das medidas impostas pela quarentena no cenário atual da pandemia da COVID-19, introduzidas no final de março de 2020 até o presente momento. Estes dados só reforçam os impactos positivos que a diminuição da circulação de automóveis pode trazer ao meio ambiente, como a redução de partículas oriundas da emissão veicular.

Além disso, através da análise gráfica comparativa, foi possível observar que para o gráfico de MP<sub>10</sub>, as estações Grajaú – Parelheiros e Marginal – Tietê apresentaram maior impacto na emissão de partículas grossas, enquanto que

para o gráfico de MP<sub>2,5</sub>, se destacou novamente a estação Marginal – Tietê, além da estação Itaim-Paulista, que apresentaram valor de concentração acima do valor limite de MP<sub>2,5</sub> estabelecido pela resolução CONAMA nº 491 de 19/11/2018, contribuindo para alta emissão de partículas finas para o meio.

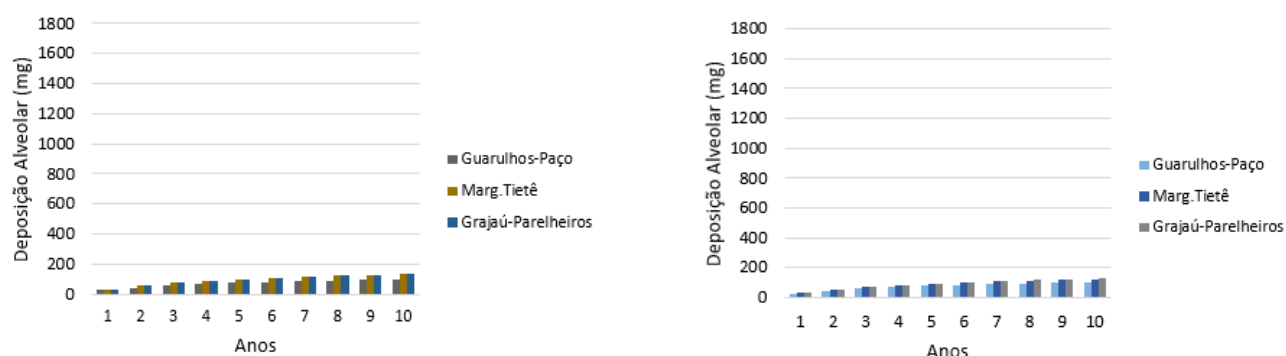
As estações Marginal Tietê-Ponte dos Remédios, Grajaú-Parelheiros e Itaim – Paulista estão localizadas em áreas que sofrem maior influência das emissões veiculares, além de estarem próximas a vias de tráfego. Entretanto, a estação Guarulhos- Paço Municipal, se destacou em ambos os gráficos de MP<sub>10</sub> e MP<sub>2,5</sub>, por apresentar menor incidência de emissão de partículas grossas e finas. Com base nestas observações, os dados que apresentaram maior e menor impacto na incidência de MP<sub>10</sub> e MP<sub>2,5</sub> para o meio atmosférico, precisam ser avaliados para mensurar se estes impactos (MP<sub>10</sub> e MP<sub>2,5</sub>), também ocorrem na saúde humana, sobretudo, no sistema respiratório.

#### 4.2.1. Avaliação do impacto à exposição de material particulado utilizando o MPPD – Sítios B – H (Estações CETESB)

Os resultados obtidos no tópico anterior, destacando os sítios com maior e menor incidência de emissão de MP<sub>10</sub> e MP<sub>2,5</sub>, foram analisados no MPPD, a fim de determinar se este padrão de impacto no ar atmosférico, também ocorre no trato respiratório humano. A simulação considerou o seguinte cenário de exposição aos poluentes: o indivíduo no ponto de ônibus esperando 1 hora por dia (30 minutos de espera na ida e 30 min de espera na volta ao trabalho), em 7 dias por semana, considerando um tempo 10 anos (522 semanas). As figuras 23 (a e b) apresentam um comparativo da deposição alveolar em 10 anos para MP<sub>10</sub> e MP<sub>2,5</sub>, nos sítios Marginal Tietê-Ponte dos Remédios, Grajaú-Parelheiros, Itaim – Paulista e Guarulhos – Paço Municipal, considerando o período estabelecido para análise (01/01 a 30/09 de 2019 e 2020).

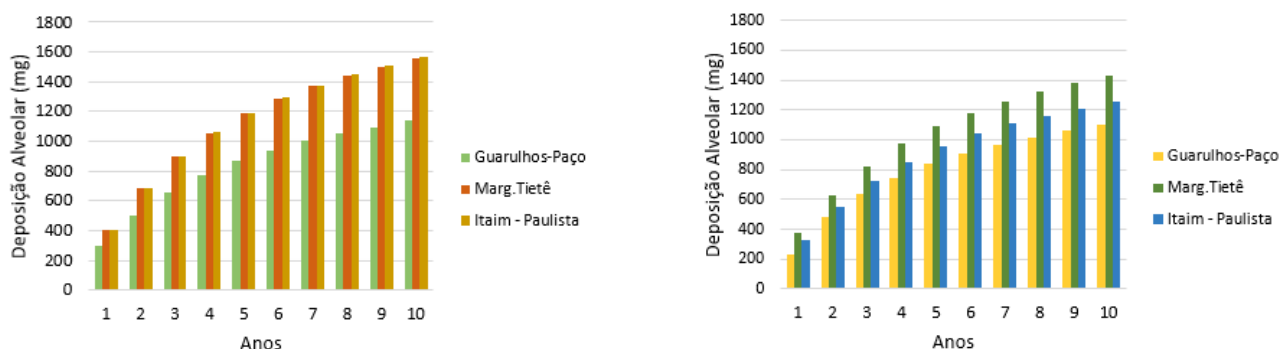
Figura 23. Deposição alveolar de MP ao longo de 10 anos (a) MP<sub>10</sub> em 2019 e 2020; (b) MP<sub>2,5</sub> em 2019 e 2020

(a)





(b)



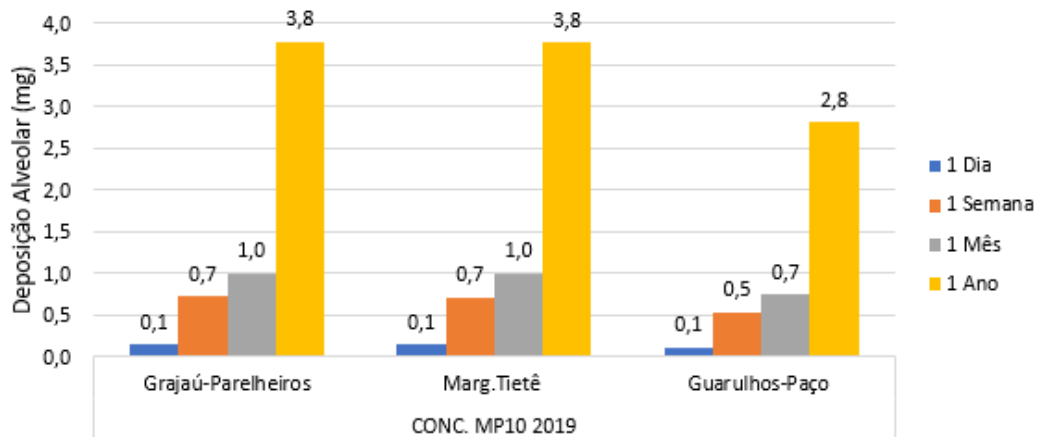
A partir das figuras 23 ( a e b) foi possível constatar que a exposição ao MP aumenta com o passar dos anos, sinalizando que os sítios identificados como maior e menor impacto de emissão de  $MP_{10}$  e  $MP_{2,5}$ , também apresentam o mesmo comportamento de deposição de MP no trato respiratório humano. Desta forma, o padrão do  $MP_{10}$  no trato respiratório, emitido por cada sítio destacado, foi: Grajaú-Parelheiros > Marginal Tietê-Ponte dos Remédios > Guarulhos – Paço Municipal. Este padrão mostra que os sítios Grajaú-Parelheiros e Marginal Tietê-Ponte dos Remédios por emitirem mais partículas, apresentam maior impacto no trato respiratório, enquanto que, o sítio Guarulhos – Paço Municipal por emitir menos MP, apresenta menor impacto na saúde humana.

Já o padrão do  $MP_{2,5}$  no trato respiratório, emitido por cada sítio destacado, foi: Itaim – Paulista > Marginal Tietê-Ponte dos Remédios > Guarulhos – Paço Municipal. Este resultado reforça que para os sítios que emitem mais (Itaim – Paulista e Marginal Tietê-Ponte dos Remédios Vale) e menos (Guarulhos – Paço Municipal)  $MP_{2,5}$ , apresentam maior e menor impacto, respectivamente, no sistema respiratório humano. Vale ressaltar que para o  $MP_{2,5}$ , as concentrações de deposição alveolar foram maiores em comparação ao  $MP_{10}$ , considerando que quanto menor o diâmetro maior impacto a partícula apresenta sobre o sistema respiratório humano.

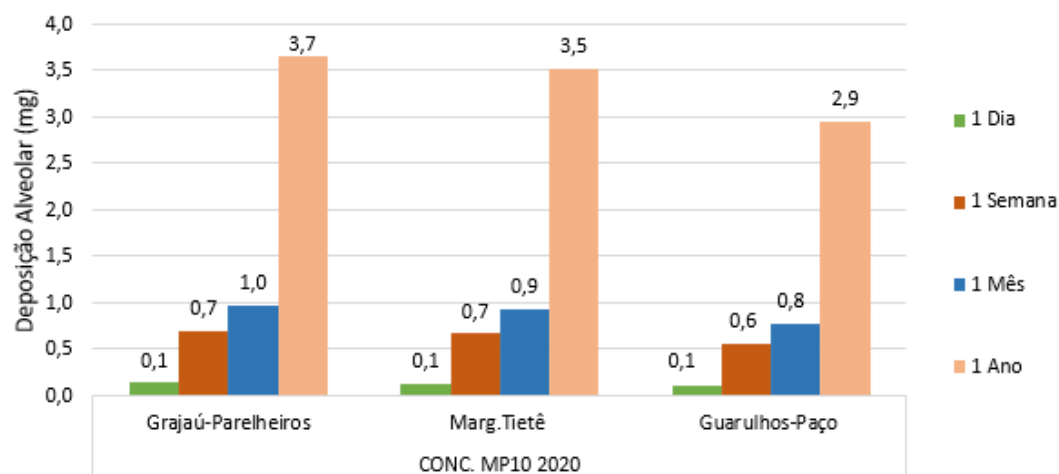
Além de como ocorre a deposição de MP ao longo dos anos, foi realizada uma análise comparativa (Figuras 24 (a, b, c e d)), de como o número de partículas depositadas no trato respiratório humano variam com o passar de 1 dia, 1 semana, 1 mês e 1 ano, para  $MP_{10}$  e  $MP_{2,5}$ , nos sítios Marginal Tietê-Ponte dos Remédios, Grajaú-Parelheiros, Itaim – Paulista e Guarulhos – Paço Municipal, considerando o período estabelecido para análise (01/01 a 30/09 de 2019 e 2020).

Figura 24. Análise comparativa da deposição alveolar ao longo do tempo (a) MP<sub>10</sub> em 2019; (b) MP<sub>10</sub> em 2020; (c) MP<sub>2,5</sub> – 2019; (d) MP<sub>2,5</sub> – 2020

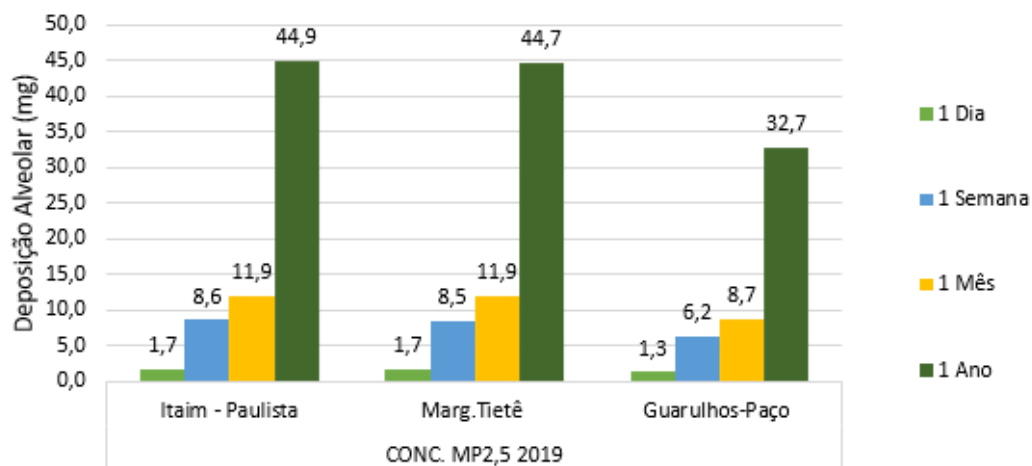
(a)



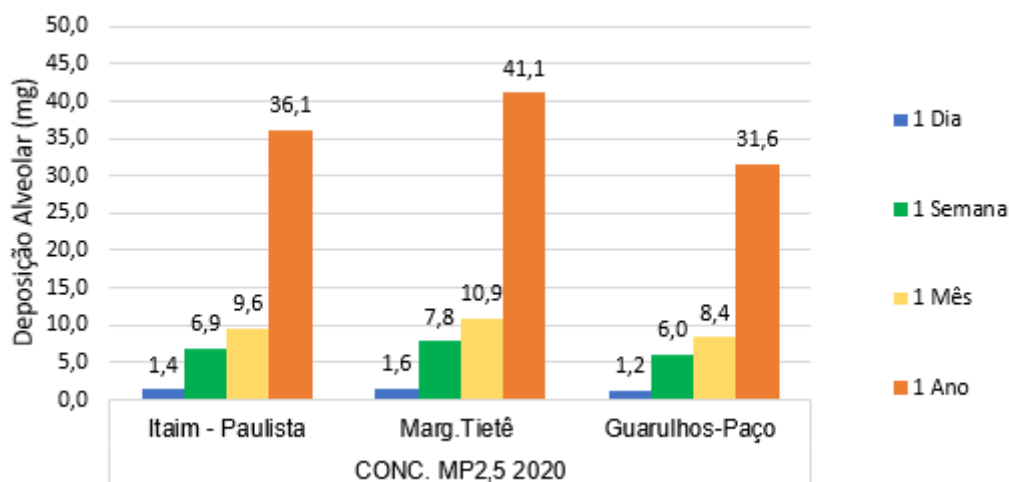
(b)



(c)



(d)



Diante desses dados é possível constatar que a relação entre os sítios, correspondem às mesmas apresentadas nas figuras 21 e 22, evidenciando que para os dados do ano de 2019, a exposição ao  $MP_{10}$  e  $MP_{2,5}$  foi maior em comparação aos de 2020, considerando que devido às medidas impostas pela quarentena, houve uma redução na circulação de automóveis.

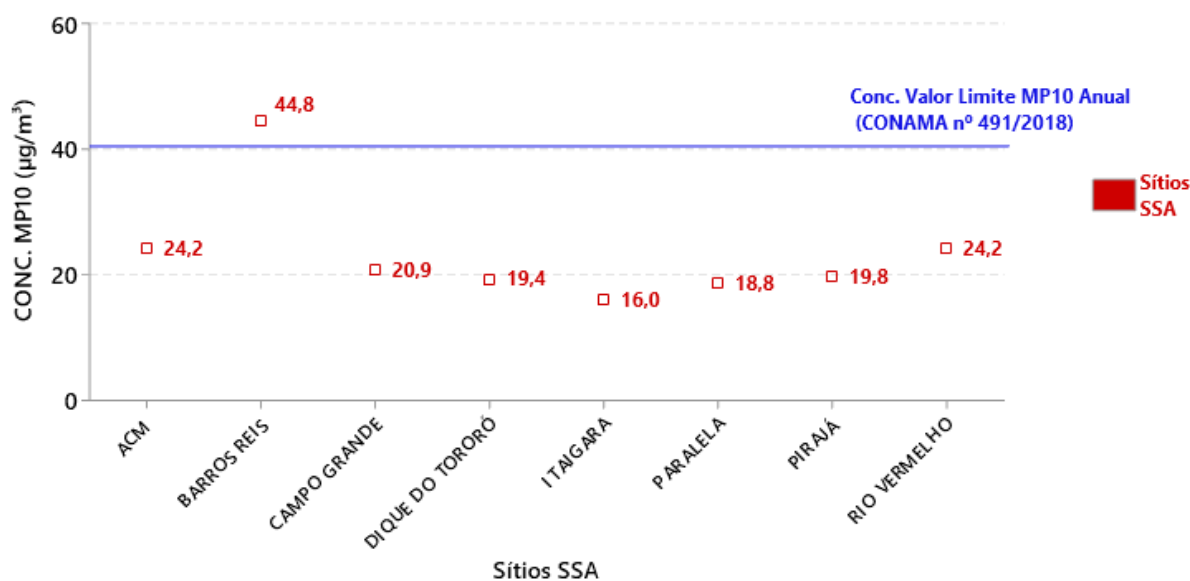
Novamente, o padrão de emissão  $MP_{10}$  e  $MP_{2,5}$  se manteve ao analisar a variação por determinado período de tempo, mostrando também que o indivíduo estando em um desses sítios, está completamente exposto à inalação de partículas grossas e finas, de forma que quanto mais tempo esperando no ponto de ônibus, maior o dano ao pulmão.

Este cenário apresentado promove efeitos severos à saúde humana, uma vez que ao inalar partículas finas e ultrafinas, o indivíduo pode apresentar quadros graves de diminuição da função pulmonar, ocasionando sintomas como falta de ar (dispneia), dor no peito, tosse e chiado no peito, além de doenças cancerígenas e mutagênicas (KIM, 2015).

#### 4.3. Avaliação dos valores de concentração de $MP_{10}$ para os sítios I a VIII – Estações CETREL

Assim como nos sítios da RMSP, foram analisadas nos sítios da cidade de Salvador, as médias anuais (2015) de cada estação, de acordo com a resolução CONAMA nº 491 de 19/11/2018. Desta forma, foi realizada uma avaliação comparativa entre os sítios estudados, a qual está explicitada na figura 25. Vale ressaltar que esta análise traz dados de apenas  $MP_{10}$ , uma vez que a rede de monitoramento de Salvador, não realizava medição de  $MP_{2,5}$  na cidade.

Figura 25. Análise comparativa da média anual de 2015 de MP<sub>10</sub> em SSA

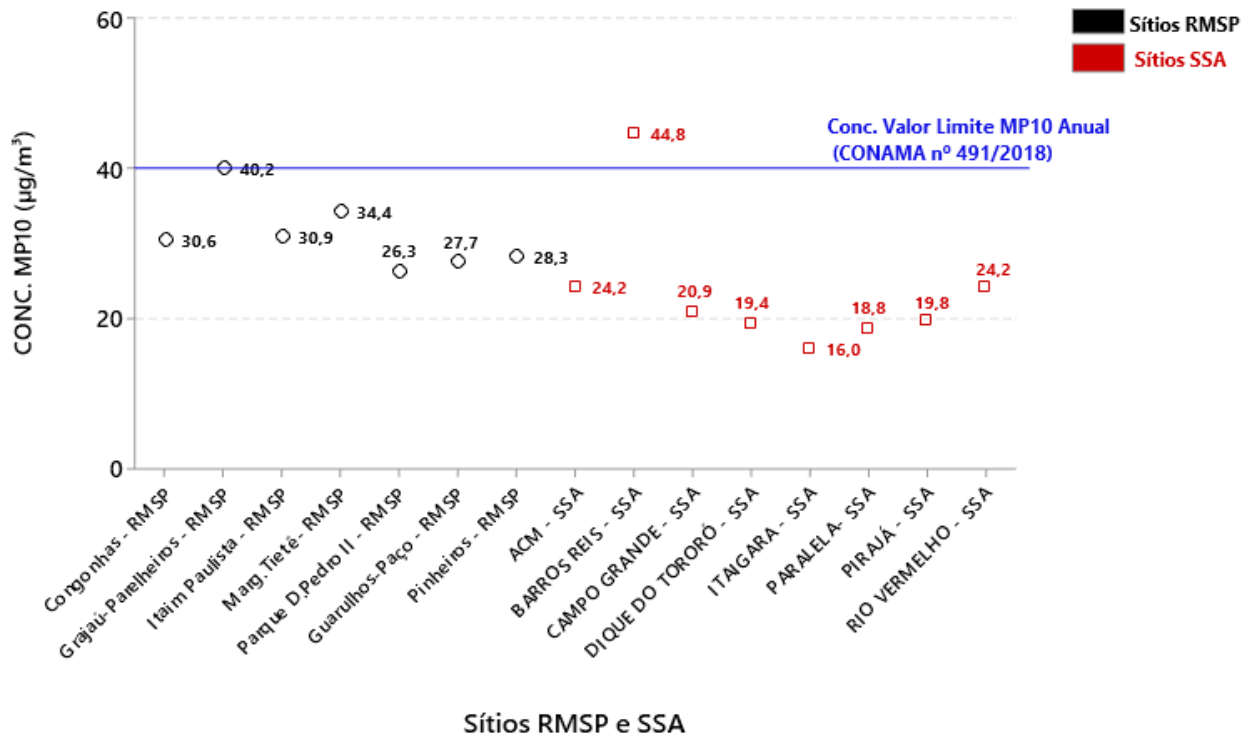


Com base na análise comparativa dos sítios de Salvador foi possível destacar, a estação Barros Reis e a estação Itagara, como as regiões de maior e menor incidência de MP<sub>10</sub>, respectivamente. A região da avenida Barros Reis é caracterizada pelo forte comércio, além da alta circulação de veículos e, sobretudo, da influência do tráfego na BR-324. Por conta destes fatores, a região é cercada de pontos de ônibus, de forma a apresentar um fluxo de transporte público intenso, principalmente no turno da manhã (período de pico), onde possui uma frequência de em torno de 179 ônibus por hora, segundo dados (sujeitos a alterações, por apresentar a última atualização em 2017) disponibilizados pela PLANMOB (Plano de Mobilidade Urbana Sustentável de Salvador) (PLANMOB, 2018). Estas características justificam a estação Barros Reis ter possuído a maior incidência de MP<sub>10</sub>, de forma a ultrapassar o limite estabelecido pela resolução CONAMA nº 491 de 19/11/2018.

A menor incidência de MP na estação Itagara pode estar associada à influência da extensa área verde pertencente ao Parque da Cidade, além de estar localizada em uma via que não apresenta uma alta rotatividade de automóveis e edifícios altos nos arredores. Desta forma, a existência de uma larga vegetação promove a absorção de poluentes, como o material particulado, de forma que, quanto mais densa for a área verde, menor a incidência de MP para o meio atmosférico (EMBRAPA, 2009).

Além disso, com o intuito de agregar esta pesquisa de mestrado, foi realizada uma análise comparativa entre os dados das estações de Salvador e os dados dos sítios da RMSP, analisados no tópico anterior. Foram avaliados dados da CETESB de 2015 e dados da CETREL do mesmo ano, afim de poder realizar a avaliação em um mesmo período de tempo. Esta análise comparativa está exposta na figura 26.

Figura 26. Análise comparativa da média anual de 2015 de MP<sub>10</sub> para SSA e a RMSP



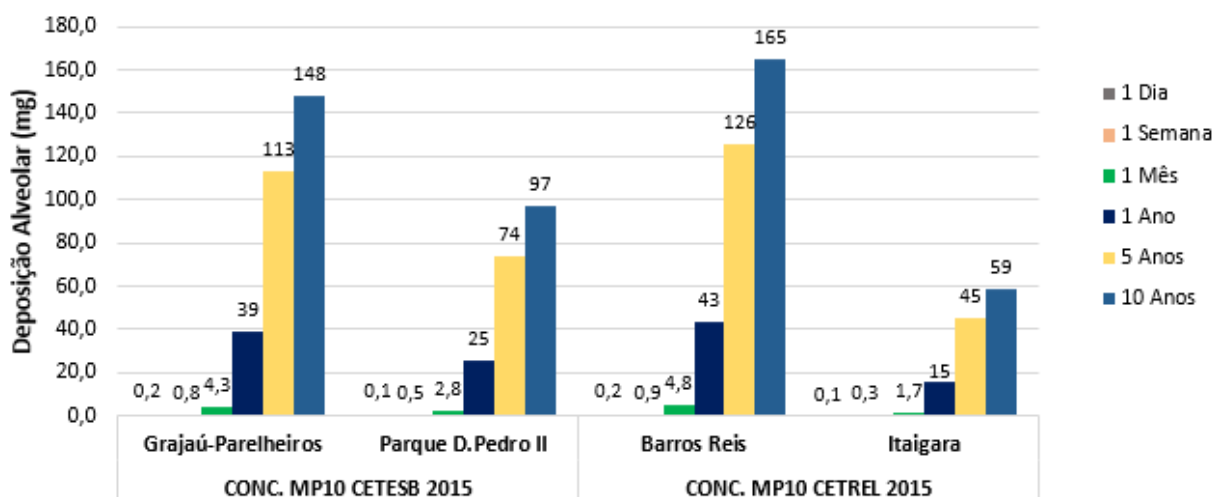
Com base nesta análise é possível observar uma diferença de emissão de partículas entre as duas cidades, destacando a RMSP como a de maior incidência de MP. Este fato pode estar associado ao fluxo de veículos distintos nas duas cidades, onde segundo o Departamento Estadual de Trânsito (DETRAN) da RMSP e da cidade de SSA, a média da frota de veículos por ano é de quase 30.000.000 milhões e 1.000.000 milhão, respectivamente, onde 13.883 mil corresponde à frota de ônibus em RMSP e 2.595 mil à frota de ônibus em SSA. Esses dados mostram a discrepância da circulação de automóveis em cada cidade, mostrando que na RMSP a circulação de veículos, principalmente de transporte público, é muito maior, entretanto, segundo a Planmob, na cidade de SSA existem mais usuários de ônibus (1.119 habitantes/ônibus) em comparação à RMSP (857 habitantes/ônibus) (PLANMOB, 2018)

Estas informações estão refletidas na figura 26, onde todas as estações de SSA, em comparação com as da RMSP, são identificadas com menor incidência de MP<sub>10</sub>, com exceção da estação Barros Reis que apresentou maiores valores de concentração, em comparação com a estação Grajaú – Parelheiros, a qual se destacou como maior incidência na região metropolitana de São Paulo.

#### 4.3.1. Avaliação do impacto à exposição de material particulado utilizando o MPPD - Estações CETESB e Estações CETREL

Na avaliação da deposição de MP no trato respiratório humano, também foi realizada uma análise comparativa entre os sítios da RMSP e de SSA, com o intuito de mensurar como a incidência de material particulado nestes locais podem impactar no pulmão de um indivíduo exposto a estas partículas em intervalos diferentes de tempo. Para isso, o mesmo cenário foi considerado para simulação: o indivíduo no ponto de ônibus esperando 1 hora por dia (30 minutos de espera na ida e 30 min de espera na volta ao trabalho), em 7 dias por semana, considerando um tempo 10 anos (522 semanas). A partir dos resultados obtidos foi analisado a exposição às partículas inaladas com o passar de um dia, de 1 semana, um mês, um ano, 5 anos e 10 anos, apresentado na figura 27.

Figura 27. Análise comparativa da deposição alveolar ao longo do tempo (Sítios CETESB e CETREL)



Esta avaliação considerou os sítios que tiveram maior e menor incidência de MP<sub>10</sub> na RMSP e na cidade de SSA. A figura 28 mostra que a emissão de MP<sub>10</sub> em ambas as cidades impactam negativamente no sistema respiratório humano, uma vez que a deposição de MP no pulmão aumenta gradativamente com o passar do tempo, seja em um dia, em uma semana, em meses ou em anos.

Além disso, os resultados obtidos na simulação, estão de acordo com os dados apresentados na análise comparativa (Figura 26) entre as duas cidades, onde dentre os sítios analisados, as estações Barros Reis e Grajaú-Parelheiros, foram destacadas como as de maiores incidência de MP<sub>10</sub> assim como, as que apresentam maior capacidade de deposição de partículas no sistema respiratório humano, ao longo do tempo. As estações Parque D. Pedro II (RSMP) e Itaipara (SSA) foram as que apresentaram menor incidência de MP<sub>10</sub> e menor capacidade de deposição de partículas no trato respiratório humano.

Vale destacar, que ao comparar ambas as cidades, é observado que os indivíduos da RMSP sofrem mais impacto na saúde ao estarem expostos à emissão de partículas, principalmente os usuários de transporte público, uma vez que trata-se de uma região em que o fluxo de ônibus é muito maior que o de SSA, aumentando o risco de exposição do organismo à emissão de MP<sub>10</sub>.

Estes resultados mostraram, que um usuário de transporte público em uma cidade poluída como a RMSP, está exposto diariamente à inalação de partículas, sujeito ao aumento da deposição de MP no respiratório, que pode desencadear em doenças cardiorrespiratórias graves. Isto chama atenção para a necessidade de uma melhor infraestrutura de ponto de ônibus nas cidades brasileiras, levando à uma menor exposição do indivíduo à exaustão veicular e conseqüentemente, diminuindo a deposição de MP no organismo.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O material particulado fino e ultrafino, oriundo da emissão veicular além de impactar negativamente no meio atmosférico, pode causar danos irreversíveis à saúde humana, uma vez que a inalação é o principal meio de contato entre as partículas e o sistema respiratório. Desta forma, quanto menor for o MP, maior a capacidade de deposição em regiões mais profundas do pulmão, ocasionando sintomas respiratórios severos como faltar de ar, dor no peito, tosse e sintomas de câncer pulmonar.

Neste contexto, a presente pesquisa de mestrado teve como enfoque, a avaliação da deposição de partículas no trato respiratório humano, em diferentes tamanhos e condições de ambiente e clima. Para isso, foi elaborado um inventário de dados de MP ( $MP_{2,5}$ ,  $MP_{10}$ , nanopartículas) com o intuito de mensurar o impacto das partículas no pulmão, o qual foi avaliado de acordo com os diferentes cenários estabelecidos, que se dividem em: coleta de nanopartículas em um sistema ciclo a diesel; inventário dados diários de  $MP_{10}$  e  $MP_{2,5}$  exportados da plataforma CETESB (empresa responsável pelo monitoramento do ar na região metropolitana de São Paulo (RMSP)); inventário de dados diários de  $MP_{10}$  das estações de monitoramento de ar de Salvador (SSA), fornecidos pela CETREL (empresa responsável pelo monitoramento de poluentes da cidade).

Os resultados obtidos da análise dos dados de cada ambiente, mostraram que no sítio A (Sistema motor ciclo a diesel), as partículas emitidas por motores a diesel, apresentaram valores de concentrações no modo acumulação, numa faixa de 45 a 160 nm, demonstrando que os padrões obtidos foram satisfatórios por estarem dentro da faixa tamanho mencionada na literatura (50 a 200 nm). Dentre os combustíveis estudados, foi possível constatar que a queima do combustível B11 apresentou maior incidência de partículas, uma vez que a adição do biodiesel promove a redução da massa total de MP, porém emite mais partículas finas e ultrafinas em comparação ao diesel puro (D). Além disso, o uso de aditivo Xmile reduziu a emissão de nanopartículas oriundas da queima do combustível, mostrando-se eficaz no objetivo de viabilizar menor emissão de poluentes para o meio.

Os sítios B a H referentes às estações da CETESB, foram analisados de acordo com a média anual de concentração de  $MP_{10}$  e  $MP_{2,5}$ , nos anos de 2019 e 2020. A partir desta análise foi possível evidenciar, que em 2020, todas as estações apresentaram diminuição na incidência de  $MP_{10}$  e  $MP_{2,5}$ , representando os efeitos das medidas impostas pela quarentena no cenário atual da pandemia da COVID-19, introduzidas no final de março de 2020 até o presente momento. A única estação que não teve redução de concentração de  $MP_{10}$  no ano de 2020, foi a Guarulhos – Paço Municipal, uma vez que o estado de São Paulo sofreu influência das queimadas ocorridas no mês de setembro de



2020, no Centro-Oeste do país, de forma que, ocasionou a transição das plumas de fumaça para a região, principalmente na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), onde está encontrada a estação Guarulhos – Paço Municipal. Além disso, foram destacadas as estações Grajaú – Parelheiros e Marginal – Tietê como as de maiores incidência de  $MP_{10}$ , e as estações Itaim – Paulista e Marginal – Tietê como as de maiores incidência de  $MP_{2,5}$ . Entretanto, a estação Guarulhos- Paço Municipal, foi que apresentou menor incidência de  $MP_{10}$  e  $MP_{2,5}$ .

Os sítios I a VIII referentes às estações da CETREL foram analisados de acordo com a média anual de concentração de  $MP_{10}$ , no ano de 2015, uma vez que por falta de renovação de contrato entre a empresa e a prefeitura local, não foi possível realizar o estudo com dados atuais. Entretanto, a avaliação destes dados foi importante, não só para mensurar o nível de poluição na cidade de Salvador, como também, para comparar a emissão de poluentes de SSA e da RMSP. Desta forma, a estação Barros Reis foi identificada como a de maior incidência de  $MP_{10}$ , uma vez que se encontra em uma região em que o fluxo de veículos, sobretudo transporte público, é extremamente intenso. Já a estação Itagira apresentou menor incidência de  $MP_{10}$ , por estar próxima a uma extensa área verde que possibilita a absorção de poluentes.

Uma vez identificada o perfil dos sítios da CETESB e da CETREL, foi realizada uma comparação entre ambas, com o objetivo de analisar a incidência de poluentes em cada região. Assim, foi possível observar que todas as estações de Salvador, ao serem comparadas com as estações da RMSP, apresentaram menor incidência de  $MP_{10}$ , com exceção da estação Barros Reis. Este resultado indicou que em São Paulo ocorre maior incidência de MP para o meio atmosférico em detrimento a frota elevada de veículos, principalmente de ônibus. Desta forma, ao comparar a RMSP com a cidade de SSA, foi observado que em SSA há uma menor incidência de partículas, podendo estar associado à menor circulação de veículos em comparação com a RMSP.

Diante dos resultados obtidos na análise de dados, foi realizado a avaliação da deposição de partículas no trato respiratório humano, através da modelagem no software MPPD. Desta forma, para o sítio A, foi analisado o impacto dos três combustíveis estudados (D, B11 e B11X) no sistema respiratório humano, identificando o combustível B11 como o que apresentou maior capacidade de depositar partículas nas regiões pulmonares. Além disso, também foi possível constatar que quanto menor o diâmetro das partículas, maior a fração de deposição nos lóbulos pulmonares, destacando o lóbulo direito inferior, como maior tendência de acumular partículas. Foi analisado também, que quanto menor for a partícula, maior a probabilidade de atingir regiões mais profundas do pulmão, como a região do duto alveolar, que apresentou maior impacto na deposição de MP. Nesta análise foi destacada que a adição do aditivo

Xmile, não só promove a redução da emissão de partículas, mas também contribui para um menor impacto no sistema respiratório humano.

Para os sítios A (Sistema motor ciclo a diesel) , B – H (Estações CETESB) e os sítios I – VIII (Estações CETREL), a modelagem no MPPD considerou o seguinte cenário: o indivíduo no ponto de ônibus esperando 1 hora por dia (30 minutos de espera na ida e 30 min de espera na volta ao trabalho), em 7 dias por semana, considerando um tempo 10 anos (522 semanas). Diante disso, foi constatado que para todos os sítios, a exposição ao material particulado aumenta com o passar dos anos, destacando no sítio A, o combustível B11 como o de maior impacto no trato respiratório humano. Para os sítios B-H, foram destacadas as estações Grajaú-Parelheiros (MP<sub>10</sub>) e Itaim – Paulista (MP<sub>2,5</sub>) como as de maiores impacto de MP na saúde humana, respectivamente. Já para os sítios I – VIII, foram destacadas as estações Barros Reis e Itaipara como as de maior e menor impacto de MP<sub>10</sub> no sistema respiratório.

A avaliação comparativa entre os sítios da RMSP e de SSA, na saúde humana, mostrou-se em conformidade com a análise comparativa entre os sítios de ambas cidades, sinalizando que na RMSP o indivíduo está mais sujeito à exposição e conseqüente deposição de MP. Desta forma, quanto mais tempo um passageiro espera no ponto de ônibus, na RMSP, maior é a probabilidade de inalar as partículas oriundas da emissão veicular e assim, maior impacto no trato respiratório humano.

Diante disto, os resultados mostraram-se satisfatórios não só por estarem de acordo com a literatura, mas por evidenciarem o efeito negativo que o material particulado pode causar no trato respiratório humano, como sérios quadros de diminuição da função pulmonar. Desta forma, pretende-se expandir e apresentar este estudo a órgãos públicos, com o intuito de viabilizar meios que possam reduzir as emissões veiculares, assim como reduzir a exposição dos transeuntes a estas partículas, sugerindo uma melhor infraestrutura de pontos de ônibus para as cidades, preservando a saúde dos usuários de transporte público.

## 6. REFERÊNCIAS

ALI, Muhammad Ubaid et al. A systematic review on global pollution status of particulate matter-associated potential toxic elements and health perspectives in urban environment. **Environmental geochemistry and health**, p. 1-32, 2018.

ANTP. **Sistema de Informações da Mobilidade Urbana da Associação Nacional de Transportes Público - SIMOB/ANTP**. 2020. Disponível em: <<http://www.antp.org.br/relatorios-a-partir-de-2014-nova-metodologia.html>>. Acesso em: 02 dez. 2020.

ASGHARIAN, Bahman; PRICE, Owen; OBERDÖRSTER, Gunter. A modeling study of the effect of gravity on airflow distribution and particle deposition in the lung. **Inhalation toxicology**, v. 18, n. 7, p. 473-481, 2006.

ASGHARIAN, Bahman et al. Computational modeling of nanoscale and microscale particle deposition, retention and dosimetry in the mouse respiratory tract. **Inhalation toxicology**, v. 26, n. 14, p. 829-842, 2014.

BUI, Vu Khac Hoang et al. Prediction of Aerosol Deposition in the Human Respiratory Tract via Computational Models: A Review with Recent Updates. **Atmosphere**, v. 11, n. 2, p. 137, 2020.

CETESB. **Relatório da qualidade do ar no Estado de São Paulo**. São Paulo, 2018. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/ar/wp-content/uploads/sites/28/2019/07/Relat%C3%B3rio-de-Qualidade-do-Ar-2018.pdf>>. Acesso em: 12 set. 2020.

CETESB. **Operação Inverno Qualidade do ar**. São Paulo, 2019. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/ar/wp-content/uploads/sites/28/2020/03/Relat%C3%B3rio-Opera%C3%A7%C3%A3o-Inverno-2019.pdf>>. Acesso em: 01 nov. 2020.

CETESB. **Relatório da qualidade do ar no Estado de São Paulo**. São Paulo, 2019. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/ar/wp-content/uploads/sites/28/2020/07/Relat%C3%B3rio-de-Qualidade-do-Ar-2019.pdf>>. Acesso em: 12 set. 2020.

CETESB. **Boletim Mensal da Qualidade do Ar para o Estado de São Paulo Setembro de 2020**. São Paulo, 2020. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/ar/wp-content/uploads/sites/28/2020/11/Boletim-Mensal-da-Qualidade-do-Ar-Setembro-2020.pdf>>. Acesso em: 01 nov. 2020.

DA SILVA BRITO, Gabriel Ferreira; SODRÉ, Fernando Fabríz; ALMEIDA, Fernanda Vasconcelos. O Impacto do Material Particulado na Qualidade do Ar. **Revista Virtual de Química**, v. 10, n. 5, 2018.

DÉDELĖ, Audrius; MIŠKINYTĖ, Aukšė. Seasonal and site-specific variation in particulate matter pollution in Lithuania. **Atmospheric Pollution Research**, v. 10, n. 3, p. 768-775, 2019.

ĐORDEVIC, Dragana et al. Can volcanic dust suspended from surface soil and deserts of Iceland Be transferred to central Balkan similarly to African dust (Sahara). **Atmosphere–Cryosphere Interaction in the Arctic, at High**

**Latitudes and Mountains with Focus on Transport, Deposition and Effects of Dust, Black Carbon, and other Aerosols, 2019.**

EMAS. Particulate matter from natural sources and related reporting under the EU Air Quality Directive in 2008 and 2009. **EEA Technical report**, 2012. Nº 10/2012.

EMBRAPA. **Por que manter árvores na área urbana?** São Paulo, 2009. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/82803/1/Documentos89.pdf>>. Acesso em: 28 out. 2020

FIGUEIREDO, I. S. Modelagem de Deposição Pulmonar de Partículas Ultrafinas: Uma Avaliação da Exposição à Saúde Humana em Diferentes Ambientes. **Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC**, Brasil, 2018.

FIORDELISI, Antonella et al. The mechanisms of air pollution and particulate matter in cardiovascular diseases. **Heart failure reviews**, v. 22, n. 3, p. 337-347, 2017.

FRANCHINI, Massimo; MANNUCCI, Pier Mannuccio. Mitigation of air pollution by greenness: A narrative review. **European journal of internal medicine**, v. 55, p. 1-5, 2018.

GRABER, M. et al. Air pollution and stroke. A new modifiable risk factor is in the air. **Revue neurologique**, 2019.

GUARIEIRO, L. L. N.; GUARIEIRO, A. L. N. Vehicle Emissions: What Will Change with Use of Biofuel? In: **Biofuels - Economy, Environment and Sustainability**. [s.l.] InTech, 2013.

GUARIEIRO, Lílian Lefol Nani et al. Assessment of the use of oxygenated fuels on emissions and performance of a diesel engine. **Microchemical Journal**, v. 117, p. 94-99, 2014.

GUERRERA, Elena et al. Cytotoxicity and genotoxicity of size-fractionated particulate matter collected in underground workplaces. **Air Quality, Atmosphere & Health**, v. 12, n. 3, p. 359-367, 2019.

GUERREIRO, E. T. A. Avaliação da exposição de passageiros a partículas ultrafinas no interior de um veículo em condições típicas de tráfego em um grande centro urbano. **Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC**, Brasil, 2016.

HIME, Neil J.; MARKS, Guy B.; COWIE, Christine T. A comparison of the health effects of ambient particulate matter air pollution from five emission sources. **International journal of environmental research and public health**, v. 15, n. 6, p. 1206, 2018.

HU, Zimei et al. Concentrations and source apportionment of particulate matter in different functional areas of Shanghai, China. **Atmospheric Pollution Research**, v. 5, n. 1, p. 138-144, 2014.

HUSSAIN, Majid; MADL, P.; KHAN, A. Lung deposition predictions of airborne particles and the emergence of contemporary diseases, Part-I. **Health**, v. 2, n. 2, p. 51-59, 2011.

ICRP. Human respiratory tract model for radiological protection. **Annals of the ICRP**, v. 24, n. 1–3, p. 1–482, 1994

INEMA. **Qualidade do ar**. Salvador, 2013. Disponível em: <<http://www.inema.ba.gov.br/servicos/monitoramento/qualidade-do-ar-direcional-para-a-pagina-da-cetrel/>>. Acesso em: 30 set. 2020

JI, Jun Ho; YU, Il Je. Estimation of human equivalent exposure from rat inhalation toxicity study of silver nanoparticles using multi-path particle dosimetry model. **Toxicology Research**, v. 1, n. 3, p. 206-210, 2012.

KIM, Ki-Hyun; KABIR, Ehsanul; KABIR, Shamin. A review on the human health impact of airborne particulate matter. **Environment international**, v. 74, p. 136-143, 2015.

KOBLINGER, László; HOFMANN, Werner. Monte Carlo modeling of aerosol deposition in human lungs. Part I: Simulation of particle transport in a stochastic lung structure. **Journal of Aerosol Science**, v. 21, n. 5, p. 661-674, 1990.

KUMAR, M. Vijay; BABU, A. Veeresh; KUMAR, P. Ravi. The impacts on combustion, performance and emissions of biodiesel by using additives in direct injection diesel engine. **Alexandria Engineering Journal**, v. 57, n. 1, p. 509-516, 2018.

LI, Xiaoying et al. Modeled deposition of fine particles in human airway in Beijing, China. **Atmospheric environment**, v. 124, p. 387-395, 2016.

LIORA, Natalia et al. Impacts of natural emission sources on particle pollution levels in Europe. **Atmospheric environment**, v. 137, p. 171-185, 2016.

MADHWAL, Sandeep et al. Distribution, characterization and health risk assessment of size fractionated bioaerosols at an open landfill site in Dehradun, India. **Atmospheric Pollution Research**, v. 11, n. 1, p. 156-169, 2020.

MANOJKUMAR, N.; SRIMURUGANANDAM, B.; NAGENDRA, SM Shiva. Application of multiple-path particle dosimetry model for quantifying age specified deposition of particulate matter in human airway. **Ecotoxicology and environmental safety**, v. 168, p. 241-248, 2019.

MMA. **RESOLUÇÃO N. 491, DE 19 DE NOVEMBRO DE 2018** Brasil CONAMA, 2018. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=740>>

MORAWSKA, Lidia; HE, Congrong. Indoor particles, combustion products and fibres. In: **Indoor Air Pollution**. Springer, Berlin, Heidelberg, 2014. p. 37-68.

MOORE, Adam; FIGLIOZZI, Miguel; MONSERE, Christopher M. Air quality at bus stops: empirical analysis of exposure to particulate matter at bus stop shelters. **Transportation research record**, v. 2270, n. 1, p. 76-86, 2012.

NGOC, Le Thi Nhu et al. Particulate matter exposure of passengers at bus stations: a review. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 15, n. 12, p. 2886, 2018.

ONU. **17 Objetivos para transformar nosso mundo**. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/pos2015/>>. Acesso em: 09 dez. 2019.

PLANMOB. **Relatório Técnico RT14: Plano de Mobilidade Urbana Sustentável de Salvador TOMO I**. Salvador, 2018. Disponível em: <[http://www.planmob.salvador.ba.gov.br/images/consulte/planmob/358\\_RT\\_14-PlanMob\\_SSA-TOMO\\_I.pdf](http://www.planmob.salvador.ba.gov.br/images/consulte/planmob/358_RT_14-PlanMob_SSA-TOMO_I.pdf)>. Acesso em: 01 nov. 2020.

QIAN, Yong et al. Review of the state-of-the-art of particulate matter emissions from modern gasoline fueled engines. **Applied energy**, v. 238, p. 1269-1298, 2019.

RAJAGOPALAN, Sanjay; AL-KINDI, Sadeer G.; BROOK, Robert D. Air pollution and cardiovascular disease: JACC state-of-the-art review. **Journal of the American College of Cardiology**, v. 72, n. 17, p. 2054-2070, 2018.

ROSTAMI, Ali A. Computational modeling of aerosol deposition in respiratory tract: a review. **Inhalation toxicology**, v. 21, n. 4, p. 262-290, 2009.

SCAFATI, Ferdinando Tagliatela et al. Modeling of Particle Size Distribution at the Exhaust of Internal Combustion Engines. In: **Nonlinear Systems and Circuits in Internal Combustion Engines**. Springer, Cham, 2018. p. 33-46.

SHARMA, Shubham et al. Effect of restricted emissions during COVID-19 on air quality in India. **Science of The Total Environment**, v. 728, p. 138878, 2020.

TANG, Yingjie; GUO, Bing. Computational fluid dynamics simulation of aerosol transport and deposition. **Frontiers of Environmental Science & Engineering in China**, v. 5, n. 3, p. 362, 2011.

WHO. **Ambient (outdoor) air quality and health**. Disponível em: <[https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health/](https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health/)>. Acesso em: 05 ago. 2019

WU, Weidong; JIN, Yuefei; CARLSTEN, Chris. Inflammatory health effects of indoor and outdoor particulate matter. **Journal of Allergy and Clinical Immunology**, v. 141, n. 3, p. 833-844, 2018.

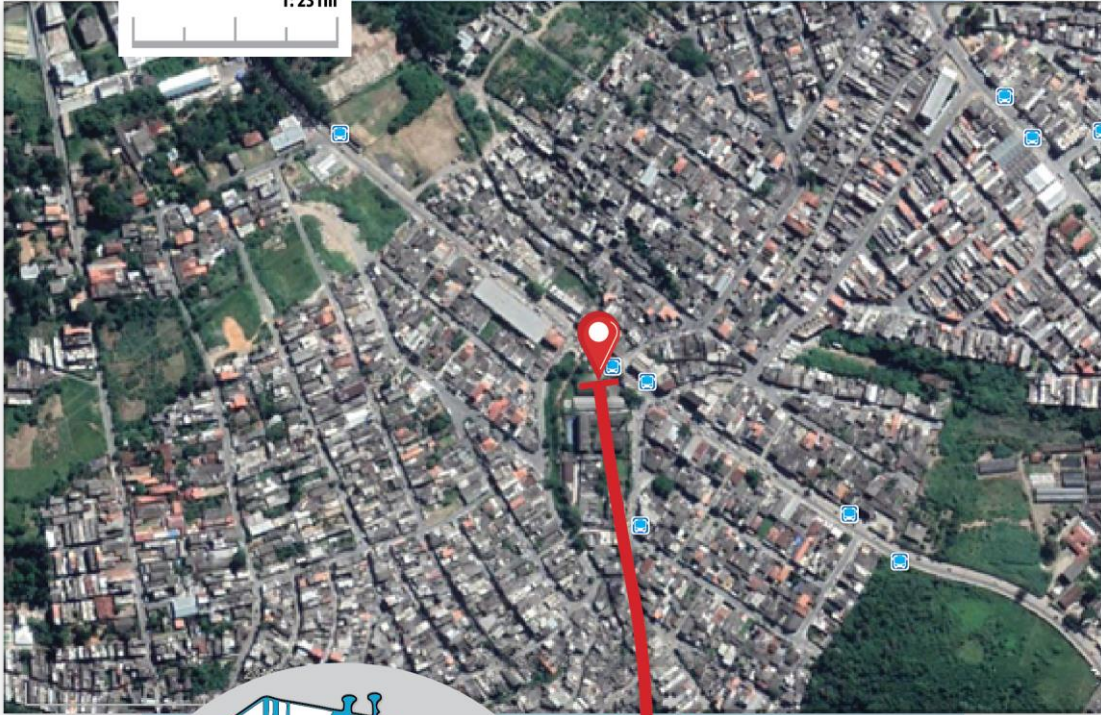
## ANEXO I - Localização Sítios CETESB

(a)






(b)




1:231m



**ESTAÇÃO GRAJAÚ  
PARELHEIROS**

Escola Estadual Presidente  
Tancredo de Almeida Neves  
Av. Paulo Guilguer Reimberg, nº 2448  
Jd. Novo Horizonte – São Paulo

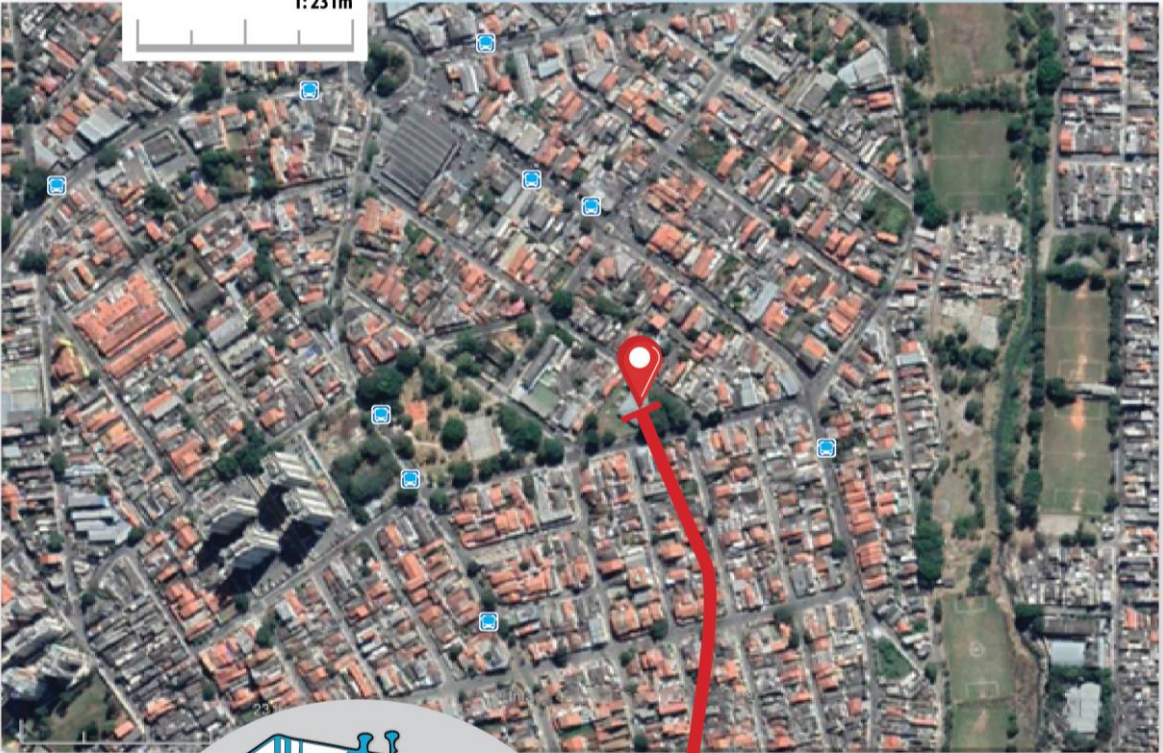
COORD. UTM (SIRGAS 2000):  
23k 327086 7369511  
**23°46'34.65"S 46°41'49.12"O**




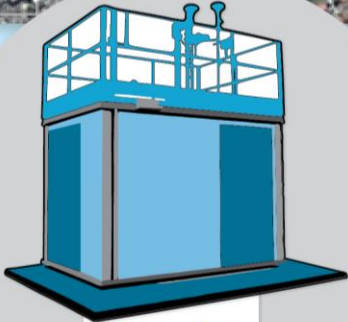
Pontos de ônibus



(c)




1:231m



**CETESB**

**ESTAÇÃO ITAIM PAULISTA**  
Biblioteca Municipal Vicente Paulo Guimarães  
Rua Jaguar, nº 225, Vila Curuçá  
São Paulo

COORD. UTM (SIRGAS 2000):  
23k 354934 7400240  
**23°30'5.57"S 46°25'14.65"O**



**Pontos de ônibus**

(d)



**1:231m**



**CETESB**

**ESTAÇÃO MARG. TIETÊ  
PONTE DOS REMÉDIOS**

Centro de Treinamento do  
Comando de Policiamento  
Rodoviário da Polícia Militar  
*Av. Embaixador Macedo Soares,  
nº 12889 Vila Leopoldina – São Paulo*

COORD. UTM (SIRGAS 2000):  
23k 322013 7397977  
**23°31'7.34"S 46°44'35.95"O**



**Pontos de ônibus**



(e)



1:231m



**CETESB**


**ESTAÇÃO GUARULHOS  
PAÇO MUNICIPAL**

Jardim Bom Clima  
Av. João Bernardo Medeiros, Nº173,  
Paço Municipal  
Guarulhos – São Paulo


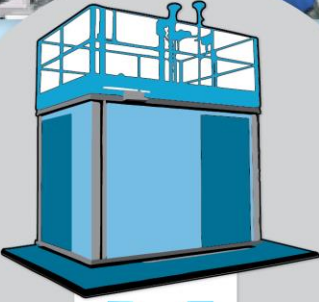
COORD. UTM (SIRGAS 2000):  
23k 344893 7405233  
**23°27'19.92"S 46°31'6.72"O**

 **Pontos de ônibus**

(f)




1:235m



**ESTAÇÃO PARQUE D. PEDRO II**  
Palácio das Indústrias  
Parque D. Pedro II, s/nº, Centro  
São Paulo

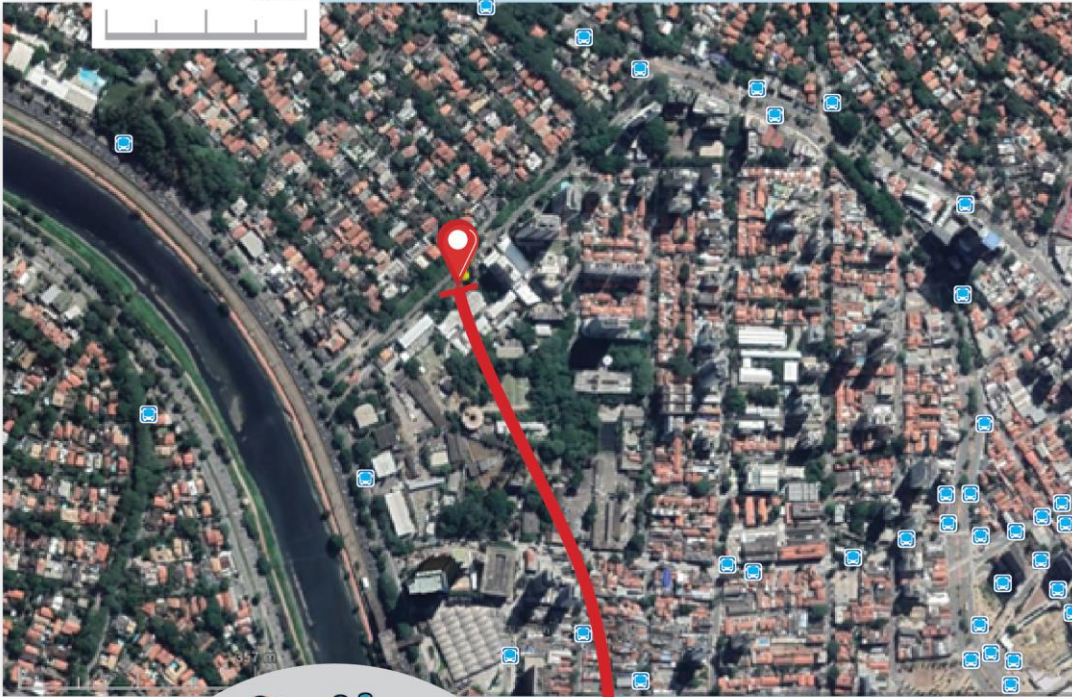
COORD. UTM (SIRGAS 2000):  
23k 333855 7395221  
**23°32'41.47"S 46°37'39.76"O**




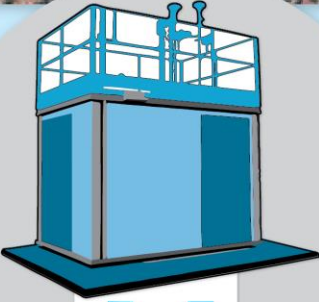
**Pontos de ônibus**



(g)




1:357m



**CETESB**

**ESTAÇÃO PINHEIROS**  
CETESB  
Av. Prof. Frederico Hermann Jr.,  
nº 345 Alto de Pinheiros  
São Paulo

COORD. UTM (SIRGAS 2000):  
23k 326287 7393293  
**23°33'41.58"S 46°42'7.39"O**



Pontos de ônibus

## ANEXO II - Localização Sítios CETREL

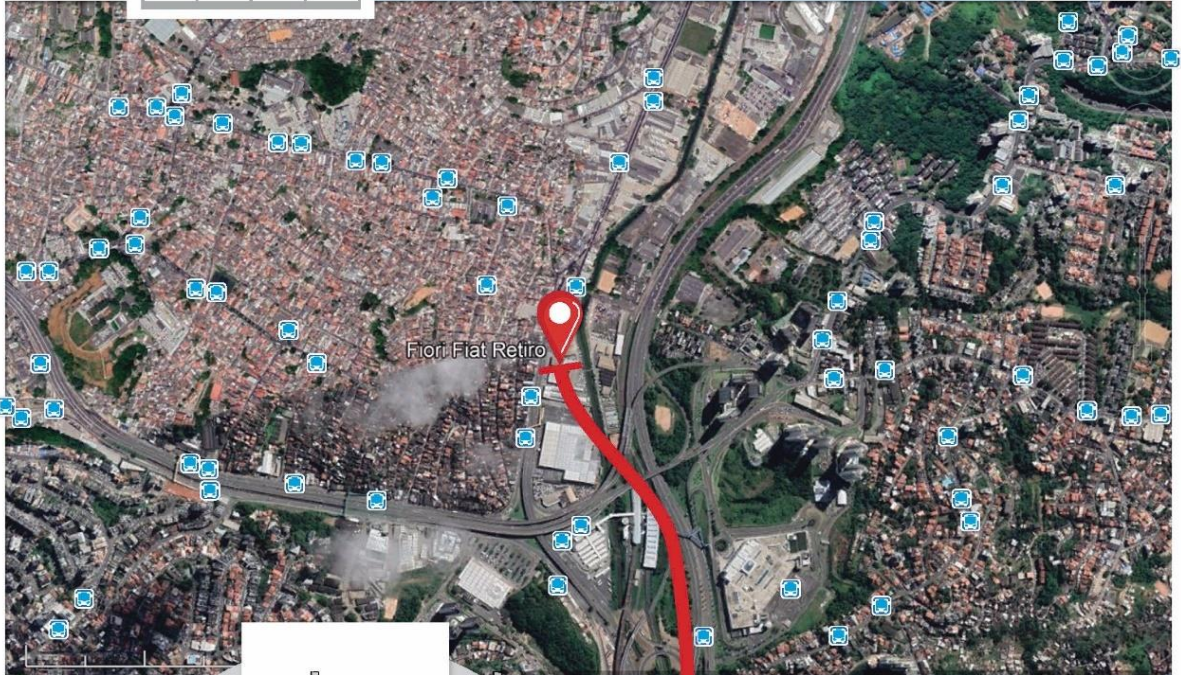
(a)





(b)

1: 649m




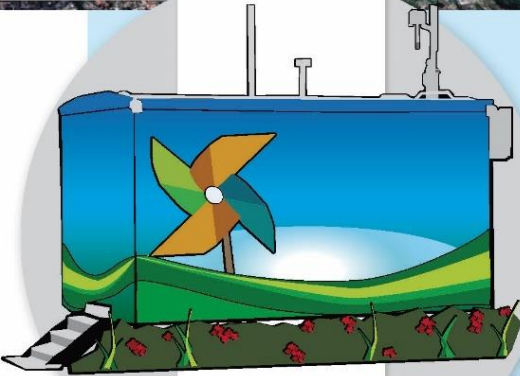

Fiori Fiat Retiro

**ESTAÇÃO BARROS REIS**

Canteiro central em frente à concessionária de automóveis Fiori Avenida Barros Reis, Arraial do Retiro Salvador – Bahia

12°57'53.82"S 38°28'45.26"O

 Pontos de ônibus

  
cetrel 

(c)



1:336m

Teatro Castro Alves

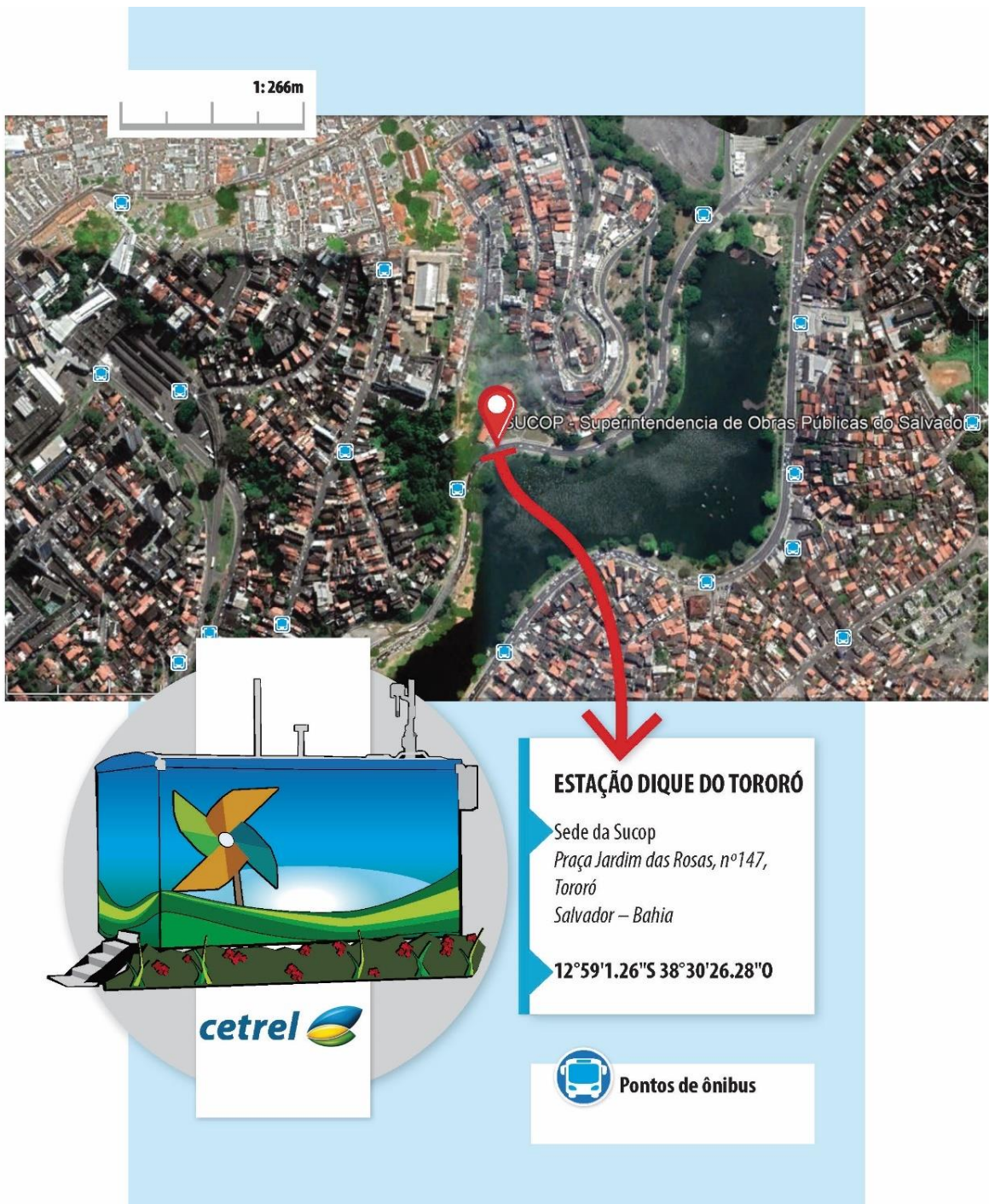
**ESTAÇÃO CAMPO GRANDE**  
Canteiro central em frente ao  
Teatro Castro Alves  
*Praça Dois de Julho, Campo Grande  
Salvador – Bahia*  
12°59'23.19"S 38°31'12.67"O

**cetrel**

 Pontos de ônibus



(d)




1:266m


SUCOP - Superintendencia de Obras Publicas do Salvador

**ESTAÇÃO DIQUE DO TORORÓ**

Sede da Sucop  
Praça Jardim das Rosas, nº147,  
Tororó  
Salvador – Bahia

12°59'1.26"S 38°30'26.28"O

 Pontos de ônibus

**cetrel** 

(e)

1:410m

Parque da Cidade Joventino Silva

**ESTAÇÃO ITAIGARA**

Ao lado do Parque da Cidade  
*Av. Antônio Carlos Magalhães, s/n,  
Itaipava  
Salvador – Bahia*

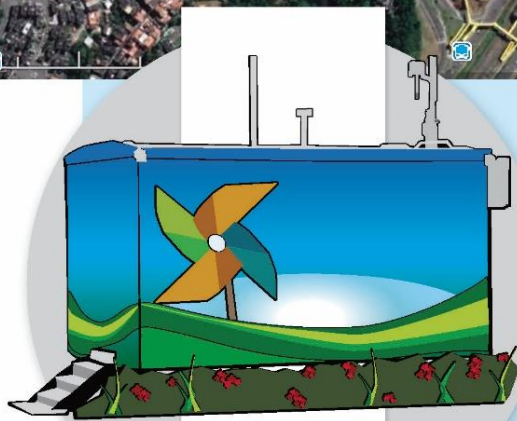
12°59'46.49"S 38°28'26.59"O

 Pontos de ônibus





(f)



### ESTAÇÃO PARALELA

Sede da Secretaria do Planejamento (SEPLAN)  
Avenida Luís Viana Filho, 2ª  
Avenida, nº250, Centro  
Administrativo da Bahia  
Salvador – Bahia

12°57'12.52"S 38°25'42.80"O



Pontos de ônibus

(g)

1:336m



**ESTAÇÃO PIRAJÁ**  
Embasa Unidade Pirajá  
R. Elísio Mesquita, nº763, Pirajá  
Salvador – Bahia  
12°53'55.39"S 38°27'30.40"O

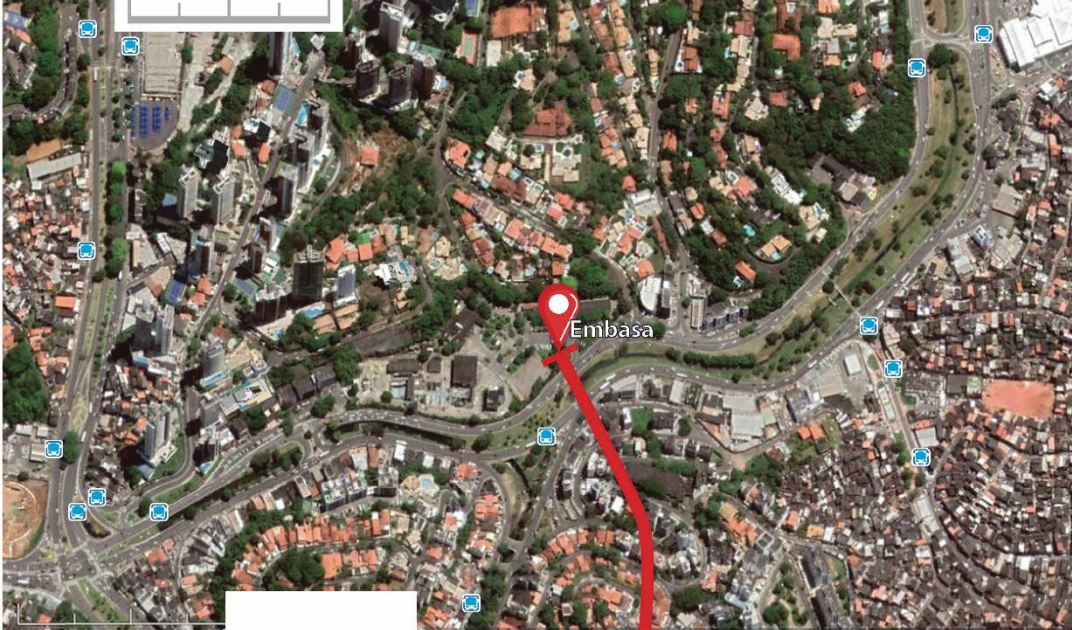


**Pontos de ônibus**



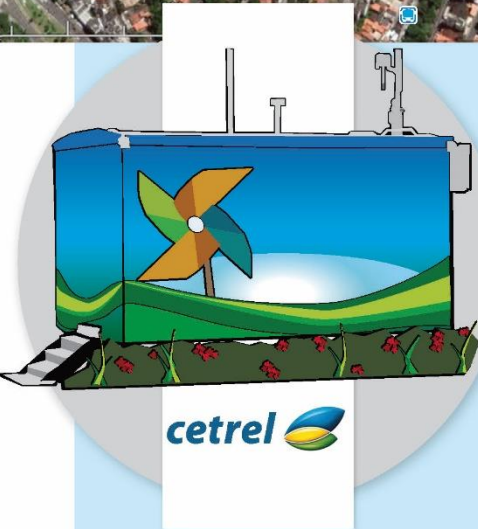


(h)



1:266m


Embasa



**ESTAÇÃO RIO VERMELHO**

Embasa - Estação de Condicionamento Prévio - Lucaia  
*Avenida Juracy Magalhães Júnior,  
s/n, Horto Florestal  
Salvador – Bahia*

**13° 0'19.12"S 38°29'14.06"O**

 **Pontos de ônibus**