

Metais pesados no ar atmosférico – Uma revisão teórica

Heavy metals in atmospheric air - A theoretical review

Luís Felipe Rosa¹; Emerson Leandro da Silva¹

Centro Universitário Sagrado Coração - UNISAGRADO, Bauru/SP.

**Autor para correspondência, E-mail: Felo_lipe@hotmail.com (autor principal)*

RESUMO

O ar atmosférico gradativamente está se tornando preocupante à humanidade, pois as altas emissões de material particulado (PM) pelas atividades antropogênicas, veiculares, naturais (vulcões, poeira,) e industriais (mineradoras, siderúrgicas) associado aos metais pesados estão contribuindo uma taxa de mortalidade relativamente alta em todo o mundo. Estudos relatam que a presença desses metais, tais como As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn, no PM podem trazer efeitos adversos a saúde, como doenças respiratórias e cardiovasculares, além de afetar diretamente os biomas terrestres e aquáticos (animais e plantas). O presente trabalho tem como objetivo comparar estudos nacionais e internacionais relacionados a presença de metais no ar atmosférico associados ao PM, bem como as suas respectivas fontes de emissões, métodos de detecção e possíveis formas de minimização, dando enfoque nas leis vigentes utilizadas para cada país, por meio de uma revisão teórica sistemática. Diante disso, os resultados mostraram que os metais, em sua grande parte, se encontram associados ao PM fino (MP_{2,5}), ou seja, é a fração considerada transportadora ativas de metais tóxicos devido sua grande superfície de contato e conseqüentemente mais prejudicial à saúde. Sobre as leis de controle desse poluente foi demonstrado que, no âmbito internacional, a OMS disponibiliza legislações mais efetivas, fazendo com que todos estados/municípios monitorem com frequência a emissão de PM através da AQQC, já no âmbito nacional, faltam investimentos e recursos e apenas a CETESB monitora alguns municípios do Estado de São Paulo.

Palavras-Chave: Material Particulado, Metais, Leis de controle, OMS

ABSTRACT

Atmospheric air is gradually becoming a concern for humanity, since the high emissions of particulate matter (PM) by anthropogenic, natural (volcanoes, dust,) and industrial (mining, steel mills) activities associated with metals are leading to a relatively high mortality rate. all around the world. Studies report that the presence of these metals, such as As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn, in PM can have adverse health effects, such as respiratory and cardiovascular diseases, in addition to directly affecting terrestrial biomes (plants) and aquatic (animals). The present work aims to compare national and international studies related to the presence of metals in the atmospheric air associated with PM, as well as their respective sources of emissions, detection methods and possible ways of minimization, focusing on the laws used for each country, through a systematic theoretical review. In view of this, the results appreciated that metals, for the most part, are associated with fine PM (PM_{2.5}), that is, it is considered a carrier of active transactions of toxic metals due to its large contact surface and consequently more harmful to health. Regarding the control laws of this pollutant, it was demonstrated that, at the international level, the WHO provides more effective legislation, making all states/municipalities frequently monitor the emission of PM through AQQC, while at the national level, there is a lack of investments and resources and only CETESB monitors some municipalities in the State of São Paulo.

Keywords: *Particulate matter, Metals, Control laws, WHO*

1 INTRODUÇÃO

O ar é essencial para sobrevivência de todos os seres vivos da Terra, porém diversos compostos podem alterar a sua qualidade e torná-lo prejudicial, tais como fontes naturais vulcões (fuligens) e, principalmente, fontes antropogênicas como a industrialização, crescimento desordenado das cidades, aumento populacional que, de fato, promovem os maiores níveis de poluição do ar (SLIWINSKI, 2022). Dito isso, dados estimam que os impactos da poluição do ar nos problemas de saúde aumentarão em todo o mundo e atingirão por volta de 3,1 milhões de mortes prematuras anualmente até 2030 (MOLINA, 2021). Nesse sentido, torna-se fundamental o estudo das origens, impactos e possíveis métodos de minimização e controle desse tipo de poluente.

Dentre os poluentes presentes no ar atmosféricos provenientes de atividades antropogênicas, estão os poluentes chamados primários, os quais são emitidos diretamente para a atmosfera, como por exemplo, os compostos orgânicos voláteis (COVs), óxidos de nitrogênio (NO₂ ou NO_x), dióxido de enxofre (SO₂) e monóxido de carbono (CO) (SHLUTOW, et al, 2021). Além desses compostos, outros são denominados secundários, que decorrem das reações químicas entre os poluentes primários, por exemplo, o poluente ozônio (O₃) pode ser formado a partir da reação química induzida pela oxidação fotoquímica entre os poluentes primários COVs e NO₂ na presença de raios ultravioleta irradiados pelo sol (SANTOS, et al, 2019).

Outro tipo de poluente presente na atmosfera é o material particulado (PM, do inglês particulate matter), sendo caracterizado como um conjunto de partículas no estado sólido ou líquido, capaz de permanecer em suspensão na atmosfera por dias ou até semanas de acordo com o seu tamanho aerodinâmico, podendo ser transportado a grandes distâncias por meio das correntes aéreas, fato que contribui para a modificação dos compostos químicos atmosféricos em escala local e global (SAVOIA, 2013). As fontes estacionárias (industriais) são as maiores causadoras da emissão do PM, podendo variar de acordo com o tipo da indústria, sua matéria prima, combustíveis e seu processo operacional que, por sua vez, pode conter substâncias altamente tóxicas ligadas aos PM, dentre as quais, podem-se destacar os metais pesados (NETO, 2007). Dito isso, os metais pesados mais encontrados no PM são: Pb (II), Cd (II), Cr (II/III), As (III), Cu (II), Mn (II), Hg (II), Fe (II/III), Al (III), Zn (II), além de outros, que ao serem inalados pelos organismos vivos podem entrar em contato com a corrente sanguínea, podendo então acarretar doenças respiratórias, cardiovasculares, intoxicações, convulsões e cânceres de médio a longo prazo (SOUZA, 2020).

Há evidências que o PM do ar atmosférico, em grande parte, seja responsável pela toxicidade e efeitos adversos à saúde provocados por metais pesados. Pois, além da contaminação direta dos seres vivos por via respiratória, os íons metálicos que se encontram adsorvidos ao PM se acumulam por via deposição úmida e/ou seca nos solos, corpos d'água e folhas da vegetação que por meio de processos químicos contaminam plantas, águas e animais os quais podem, de forma indireta, contaminar os seres humanos ao consumirem esses produtos (HUIMING, et al, 2013).

Em várias localidades do mundo, os efeitos da poluição atmosférica têm causado preocupações e instituições como a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA), a Organização Mundial de Saúde (OMS/WHO) e a União Européia instituíram padrões de qualidade do ar, a fim de determinar níveis máximos da concentração dos metais Pb, Mn, Hg, Cd, Cr, entre outros, que estão associados ao PM no ar atmosférico (BRIFA et al., 2020). Somando-se a isso, os países da União Europeia por meio das Diretivas 2004/107/CE e 2008/50/CE indicaram limites de concentrações para os metais As, Pb, Cd, Ni, além de outros (SCHULUTOW et al., 2021). Já no Brasil, os níveis máximos de concentrações de poluentes atmosféricos são estabelecidos pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), por meio da Resolução CONAMA nº 491/2018 regulamentada pelo Decreto nº 99.274, de 6 de julho de 1990, que estabelece níveis das concentrações de poluentes atmosféricos de curtos e longos períodos de exposição, porém a resolução estabelece limite apenas para o Pb (SILVA, 2020).

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho é levantar dados e informações, por meio de uma revisão sistemática da literatura, sobre estudos realizados das fontes de emissão, técnicas de detecção e caracterização, bem como métodos de minimização dos poluentes do ar atmosférico associados aos PM ligados à metais pesados no âmbito internacional e nacional, baseando-se nas legislações ambientais vigentes.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

1.1.1 2.1 Atmosfera

A atmosfera é uma camada relativamente fina de gases e material particulado (aerossol atmosférico) que envolve a Terra, está dividida em cinco camadas: Troposfera, Estratosfera, Mesosfera, Termosfera e Exosfera. A troposfera é a camada da atmosfera mais próxima da superfície da terra e mais importante sob a meteorologia; a altura máxima da troposfera é de 17 km quando medida da região do Equador, podendo variar dependendo da superfície de onde é medida, responsável pelos fenômenos climáticos contendo materiais particulados e vapores de água variando de 0,02 a 6% (BARBOSA, 2017).

É composta por uma mistura de gases formada por 78,09% de nitrogênio diatômico (N₂), 20,95% de oxigênio diatômico (O₂) que ocupam quase 99% do volume do ar seco e limpo, e 0,94% de outros gases; o dióxido de carbono, ozônio e vapor d'água, mesmo ocorrendo em pequenas concentrações são fundamentais em fenômenos meteorológicos (LATORRE et al., 2002). A presença de vapor de água, ozônio e gás carbônico tem um papel fundamental em absorver a radiação infravermelha emitida pelo solo e, por esse fato, percebe-se que tais gases influenciam de forma direta na temperatura da Terra (DIAS, 2007).

A atmosfera das áreas urbanas vem causando divergências ao meio ambiente e causando desordem na qualidade de vida, o crescimento irregular das cidades, aumento populacional e o número de veículos automotores vem contribuindo amplamente para o avanço de poluentes na atmosfera (SAVOIA, 2013).

1.2 Poluentes do ar atmosférico

A poluição atmosférica pode ser classificada como a interposição antropogênica, de gases ou partículas de aerossol acumulados em concentrações altas e suficientes para causar danos diretos ou indiretos aos biomas terrestres e aquáticos afetando plantas, animais e outras formas de vida (SLIWINSKI, 2022). Ocasionalmente consequências adversas na saúde da população, acarretando doenças respiratórias, cardiovasculares e neurológicas, especialmente em crianças e idosos, além de estar sendo associada às ocorrências de diferentes tipos de câncer (SILVA, 2020).

A Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) associa os poluentes em primários e secundários, sendo os primários aqueles diretamente emitidos para a atmosfera, como poeiras, fuligem, gases dos automóveis, entre outros e secundários que resultam das reações químicas de poluentes primários com substâncias presentes na camada baixa da atmosfera (NETO, 2007). Sendo que entre os poluentes-padrões os principais são: monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), dióxido de nitrogênio (NO₂), dióxido de enxofre (SO₂) e material particulado (PM) (NASCIMENTO, 2020). A Tabela 1 consiste em informar as fontes e seus diversos poluentes emitidos.

Tabela 1 - Principais gases poluentes no ar e suas emissões

Fontes		Principais Poluentes
Fontes estacionárias	Combustão	Material particulado, SO ₂ , SO ₃ , CO, hidrocarbonetos e óxidos de nitrogênio.
	Processos Industriais	Material particulado (fumos, poeiras e névoas), Gases- SO ₂ , SO ₃ , HCl, hidrocarbonetos, mercaptanas, HF, H ₂ S, NO _x .
	Queima de Resíduo Sólido	Material particulado, gases - SO ₂ , SO ₃ , HCl, NO _x .
	Outros	Hidrocarbonetos e material particulado.
Fontes Móveis	Veículos Gasolina/Diesel Álcool, Aviões, Motocicletas, barcos, etc.	Material particulado, monóxido de carbono, óxidos e nitrogênio, hidrocarbonetos, aldeídos, dióxido de enxofre, ácidos orgânicos.
Fontes Naturais		Material particulado – poeiras Gases – SO ₂ , H ₂ S, CO, NO, NO ₂ , hidrocarbonetos.
Reações Químicas na Atmosfera Ex.: hidrocarbonetos + óxidos de nitrogênio (luz solar)		Poluentes secundários – ozônio, aldeídos, ácidos orgânicos, aerossol fotoquímico, etc.

Fonte: BARBOSA (2017)

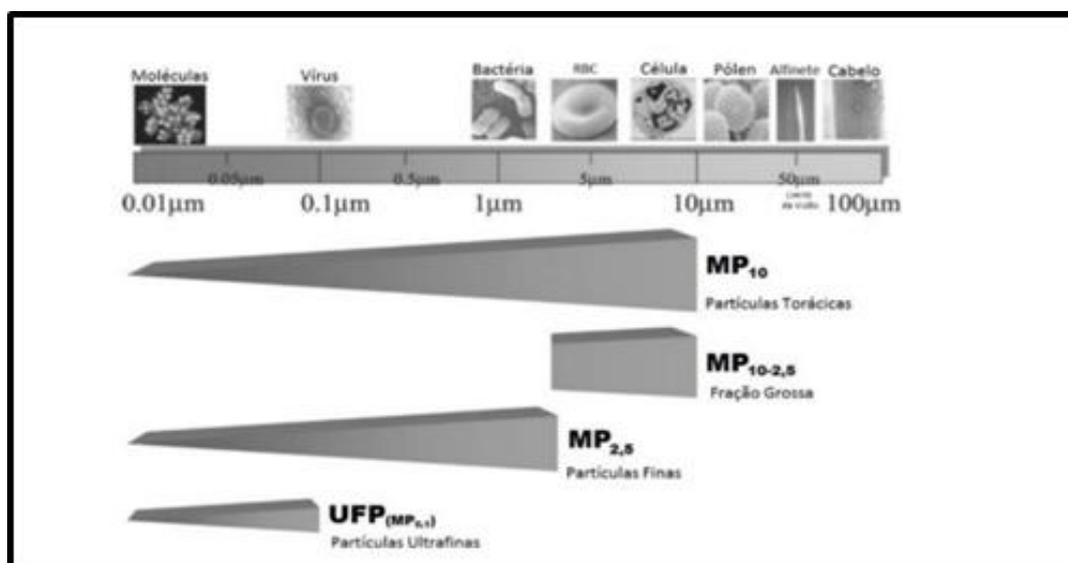
Entre esses poluentes, o material particulado vem sendo um dos objetivos principais de pesquisas científicas e de projetos de saúde pública devido seus riscos à saúde humana, ecossistemas e interferências em processos atmosféricos (AIKES, 2019). Em 2014, a Organização Mundial de Saúde relatou, que a poluição do ar foi responsável pela morte de cerca de 7 milhões de pessoas ao redor do mundo em 2012 e informou que as partículas suspensas, especialmente as finas estão diretamente relacionadas a essa taxa de mortalidade ressaltando a importância do monitoramento e da implementação de estratégias para a redução dos poluentes atmosféricos nos países desenvolvidos e subdesenvolvidos (SILVA, 2020).

1.2.1 2.3 Materiais particulados

O Material Particulado (PM) é uma mistura complexa de partículas sólidas e líquidas em suspensão no ar, sua composição é variável pois depende de suas fontes de emissão sejam elas (antropogênicas ou naturais) e suas reações químicas presentes na atmosfera (compostos orgânicos adsorvidos, metais de transição, íons, material de origem biológica e minerais) podem acarretar diferentes propriedades físicas ou químicas as tornando mais tóxicas (SLIWINSKI, 2022). Os materiais particulados dividem-se em (poeira, fumaça, fumos e aerossol), suas partí-

culas possuem tamanhos menores que 100 μm que não são perceptíveis a olho nu somente a microscópios e outras podem ser grandes, escuras e visíveis como a fumaça e a fuligem (SAVOIA, 2013). A classificação do PM pode ser realizada através do tamanho de suas partículas sendo elas; as partículas finas ou respiratórias (MP_{2,5}) podem penetrar até os alvéolos pulmonares com diâmetro que variam de 0,1 a 2,5 μm , as grossas ou partículas inaláveis (MP₁₀ ou PTS) inalado pela boca e nariz, podendo depositar-se até a traqueia que variam de 2,5 a 10 μm e as partículas ultrafinas podem se depositar em quase todo o sistema respiratório possuem diâmetro inferior a 0,1 μm . Como pode ser observado na Figura 1 (SILVA, 2020).

Figura 1- Material particulado atmosférico em relação ao seu tamanho



Fonte: AIKES (2019)

As partículas menores com diâmetros de 0,1 a 2,5 denominadas MP 2,5, possuem maior superfície de contato contribuindo com o aumento da capacidade de veicular metais pesados que, por sua vez, potencializa sua toxicidade (AIKES, 2019). Esses metais podem sofrer várias alterações necessárias à dissolução, precipitação, fenômenos de complexação e sorção interferindo no seu procedimento e biodisponibilidade afetando seus complexos orgânicos modificando-os para mais tóxicos aumentando os riscos a longo prazo para a saúde humana e ao ecossistema local (NASCIMENTO, 2020).

1.1 Metais pesados

Os metais pesados são substâncias presentes na crosta terrestre. As atividades antropogênicas, veiculares e industriais estão acarretando um aumento significativo da exposição desses elementos nocivos no ar atmosférico (SLIWINSKI, 2022). Esses metais, representam dois terços dos elementos da tabela periódica e são classificados como não degradáveis, ou seja, capazes de bioacumular-se no meio ambiente. Tem como características brilho metálico, boa condutividade elétrica e térmica (AIKES, 2019). A forma mais tóxica de um metal não é a livre, mas sim a encontrada como cátion ou ligado a cadeias carbônicas, pois podem formar comple-

xos. Já em corpos d'água a toxicidade varia em função do pH, pois a acidez e a alcalinidade determinam a formação de espécies químicas no meio aquoso (MERÇON, 2011). Ilustrado na Figura 2, podemos ver quais são os metais, suas definições e a qual grupo pertence.

Figura 2- Classificação dos metais de acordo com os grupos da Tabela Periódica

Metal	Grupo	Classificação
Be, Ba	II a	Metais leves (densidade < 5)
V	V b	Elemento de transição; caráter metálico
Cr	VI b	Elemento de transição; caráter metálico
Mn	VII b	Elemento de transição; caráter metálico
Co, Ni	VIII	Caráter metálico
Cu, Ag	I b	Metal nobre
Zn, Cd, Hg	II b	Metais pesados
Tl	III a	Metal
Sn, Pb	IV a	Metais
As, Sb	V a	Caráter metálico
Se, Te	VI a	Posição intermediária entre metal e não metal

Fonte: NETO (2007)

Metais tóxicos adjunto ao material particulado atmosférico são prejudiciais à saúde porque eles podem ser absorvidos nos tecidos pulmonares durante a respiração (AIKES, 2019). De acordo com a OMS, as partículas em suspensão, especialmente as respiráveis, com diâmetro inferior a 2,5 µm, possuem elevadas concentrações de metais com propriedades toxicológicas, como Cu, As, Ni, Mn, Zn, Pb e Cd, entre outros, que podem apresentar riscos à saúde pública (SILVA, 2020).

1.2 Legislações internacionais e nacional

Internacionalmente a Organização mundial da saúde (OMS) e a Agência de Proteção Ambiental do Estados Unidos (EPA), conforme as Tabelas 2 e 3, estabeleceram padrões de qualidade do ar determinando os níveis máximos de concentração de poluentes atmosféricos, incluindo os metais associados ao MP como Pb, Mn, Hg, Cd e Cr (SILVA, 2020). Em 2016, a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) anunciou a manutenção do limite para a concentração de chumbo (Pb) na atmosfera de 0,15 µg m⁻³, a fim de garantir a manutenção do bem-estar público (SLIWINSKI, 2022).

Tabela 2: Padrões de emissão do PM estabelecidas pela OMS

Poluente	Concentração ($\mu\text{m}/\text{m}^3$)	Período
PM_{2,5}	10	1 ano
	25	24 horas
PM₁₀	20	1 ano
	50	24 horas
Chumbo	0,5	1 ano

Fonte: World Health Organization (2005)

Tabela 3: Padrões Estados Unidos EPA do PM para qualidade do ar

Qualidade do ar	Índice de qualidade do ar	PM_{2,5} ($\mu\text{m}/\text{m}^3$)	PM₁₀ ($\mu\text{m}/\text{m}^3$)
Boa	0-50	0-15,4	0-54
Moderada	51-100	15,5-40,4	55-154
Insalubre para grupos específicos	101-150	40,5-65,4	155-254
Insalubre	151-200	65,5-150,4	255-354
Muito insalubre	201-300	150,5-250,4	355-424

Fonte: U.S Environmental Protection Agency (2008)

Na Europa, a legislação que estabelece os padrões e objetivos para os poluentes presentes no ar é determinada pela Comissão Europeia (E.C.) por meio das Diretivas 2004/107/CE e 2008/50/CE estabeleceram limites de concentrações para os metais As, Pb, Cd e Ni (AIKES, 2019). Como visualizado na Tabela 4.

Tabela 4: Padrões E.C do PM e metais pesados para assegurar a qualidade do ar.

Poluente	Concentração	Período (ano)
PM_{2,5}	25 $\mu\text{m}/\text{m}^3$	1 ano
PM₁₀	40 $\mu\text{m}/\text{m}^3$	1 ano
As	6 ng/m^3	1 ano
Cd	5 ng/m^3	1 ano
Pb	0,5 $\mu\text{m}/\text{m}^3$	1 ano
Ni	20 ng/m^3	1 ano

Fonte: European Commission. (Directiva 2004/2008)

No Brasil, nos dias atuais os padrões de qualidade do ar são determinados através do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2018) por meio da Resolução nº 491/18, inclui em seus padrões os limites de concentração para o PM10 e PM2,5 (SLIWINSKI, 2022). A tabela 5 representa os padrões nacionais do ar, diariamente e anualmente separados em seus padrões.

Tabela 5: Padrões nacionais de qualidade do ar e métodos de referência

Poluente	Período de Referência	Padrão primário (µg/m³)	Padrão secundário (µg/m³)	Padrão Terciário (µg/m³)	Padrão Final	ppm
MP ₁₀	24 horas	120	100	75	50	-
	Anual ¹	40	35	30	20	-
MP _{2,5}	24 horas	60	50	37	25	-
	Anual ¹	20	17	15	10	-
Dióxido de Enxofre SO ₂	24 horas	125	50	30	20	-
	Anual ¹	40	30	20	-	-
Dióxido de Nitrogênio NO ₂	1 hora ²	260	240	220	200	-
Ozônio O ₃	Anual ¹	60	50	45	40	-
Fumaça	8 horas ³	140	130	120	100	-
	24 horas	120	100	75	50	-
Monóxido de Carbono CO	Anual ¹	40	35	30	20	-
	8 horas ³	-	-	-	-	9
Partículas totais em suspensão	24 horas	-	-	-	240	-
	Anual ⁴	-	-	-	80	-
PTS						
Chumbo Pb _s	Anual ¹	-	-	-	0,5	-

Fonte: CONAMA (2018)

2 METODOLOGIA

Foram utilizados artigos nacionais e internacionais, voltada a comparação e discussão das leis empregadas vigentes junto a correlações sobre métodos e possibilidades para minimizar o problema global atribuído à presença de metais no ar atmosférico, propondo uma pesquisa bibliográfica com a utilização de materiais já publicados em livros, artigos de periódicos, artigos de eventos, entre outros.

A busca foi feita através de sites como Scielo (Scientific Electronic Library Online), Google Acadêmico, Science.gov, no qual foi atribuída como palavras chave material particulado e análises de metais presentes no ar atmosférico. Os critérios para a inclusão dos artigos foram os publicados nos últimos 10 anos, em língua inglesa e portuguesa condizentes com o tema, contabilizando um total de 30 artigos relacionados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

1.2.2

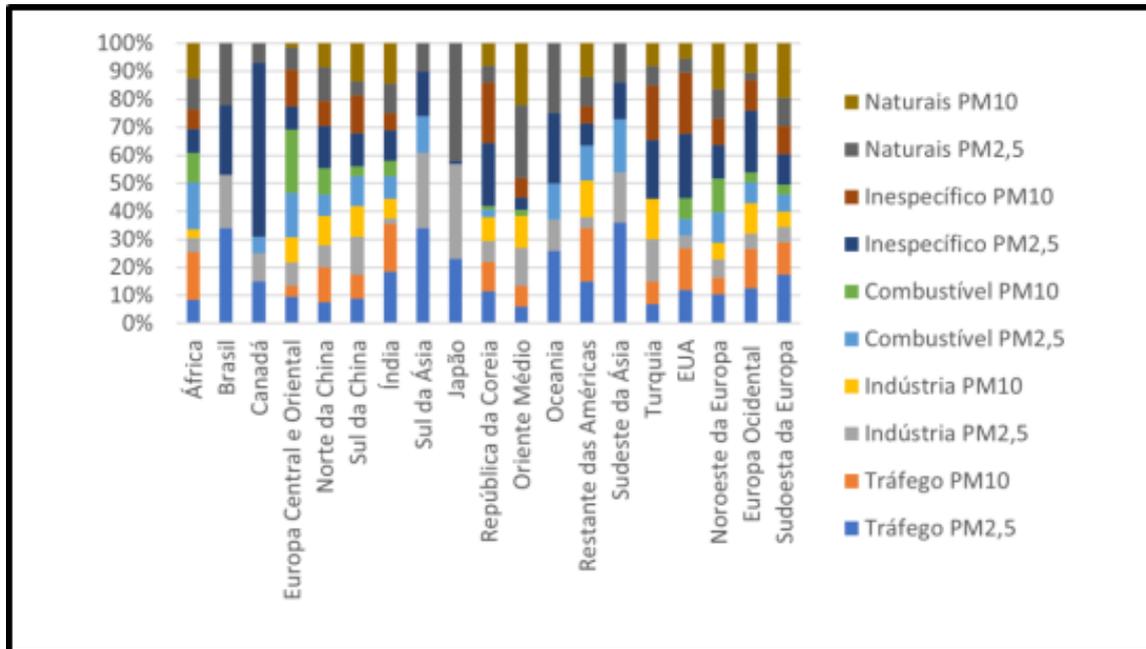
1.2.3 4.1 Fontes de emissão

Em meio aos diversos contaminantes do ar atmosférico, o PM é classificado de acordo com a sua fonte de emissão que pode ser de origem natural (erupções vulcânicas, tempestades de areia, ressuspensão de poeira do solo pelos ventos, incêndios naturais em florestas, pólen das plantas, dentre outros) ou atividades antropogênicas (operações industriais, a queima de combustíveis transporte e produção de energia, incineração de lixo, entre outros) onde o ser humano atua (AIKES, 2019).

Segundo a USEPA (2016), alguns PM são emitidos diretamente de uma fonte exclusiva como canteiros de obras, rodovias não pavimentadas, incêndios e chaminés. Além disso, a frota veicular é também umas das principais fontes do PM e a sua emissão acontece devido aos combustíveis (gasolina, álcool, diesel, etc.), desgastes dos pneus, componentes das ligas metálicas dos motores, desgaste dos freios, materiais de construção das vias de tráfego e ressuspensão do solo (AIKES, 2019). Dentre os combustíveis, o diesel, apesar de produzir quantidades menores de monóxido de carbono e hidrocarbonetos totais (THC), é uma das principais fontes de PM com pequenos diâmetros e a sua composição pode conter elementos como Alumínio (Al), Cálcio (Ca), Ferro (Fe), Magnésio (Mg) e Silício e vale ressaltar que 80% dos traços metálicos no ar são provenientes desse tipo de poluente com pequeno diâmetro (HOINASKI, 2010).

Além do tráfego veicular, o PM está diretamente ligado às emissões industriais, tais como as metalúrgicas, siderúrgicas e de fundição que são consideradas grandes geradoras do poluente, pois suas etapas de processo permitem gerar diferentes tipos de composições que podem conter íons metálicos, óxidos de minerais e óxidos metálicos (OLIVEIRA, 2009). Na Figura 3 está ilustrada a emissão de PM em diversas regiões do mundo, bem como suas frações de tamanho.

Figura 3: Gráfico da correlação de diferentes fontes para emissões de PM



Fonte: SLIWINSKI (2022)

Como pode ser observado na Figura 3, as maiores fontes de emissão do poluente MP no mundo são antropogênicas, as atividades cotidianas da humanidade em conjunto com seus bens materiais (automóveis) e consumos aumentam drasticamente as emissões, somando-se a isso, o ramo industrial auxilia ainda mais nessas proporções.

1.2.4 4.2 Estudos internacionais e nacionais sobre o material particulado associado aos metais tóxicos

No cenário internacional, estudo efetuado em Atenas (Grécia) referente ao tráfego, combustão estática e materiais da crosta terrestre (poeira, ressuspensão do solo) mostraram a presença de metais em amostras de materiais particulados em suspensão (PTS) nas frações MP2,5 e MP10, sendo que os metais Fe, Zn, Pb e Cu somavam 90% dos metais encontrados nesses materiais (VALAVANIDIS, et al., 2006). Na cidade de Yokohama (Japão), um estudo qualificou as frações MP2,5 e MP10 dos PTS como elementos perigosos devido a associação aos metais e, além disso, mostraram que metais como Mg, Al, Ca, Zn, Mn e Pb estavam presentes nas concentrações de 0,32; 0,69; 0,42; 0,13; 32,5 e 27,2 $\mu\text{g m}^{-3}$, respectivamente, excedendo o permitido pela USEPA e pela OMS/WHO de acordo com a Tabela 2 e 3, que correlacionou o alto agravante de doenças respiratórias ocorridos na região a esses poluentes atmosféricos (Khan et al., 2010). Em um Túnel de Hong Kong, foi feita uma análise no MP2,5 devido ao grande fluxo de carros e seu comprimento, que resultou na presença de gases NO₂, NO e CO, mas segundo os autores estava tudo regular perante as leis (CHENG et al., 2006). Na cidade de Jinan, leste

da China, aconteceu um o estudo sobre metais associados ao material particulado e obtiveram que o Cu, Fe, Mn, Pb e Zn presentes nas amostras eram de emissões de tráfego de veículos, já os metais As, Pb e Cr eram das usinas termelétricas a carvão e os metais Ba e Al da poeira das estradas e do próprio solo ambiental. Os autores destacaram que os metais Fe e Zn poderiam trazer efeitos adversos na saúde, ressaltando que as pessoas com moradias próximas às indústrias poderiam ser as mais afetadas (Zhou et al., 2014). Na Carolina do Norte (Estados Unidos), em uma rodovia interestadual uma pesquisa mostrou que no MP2,5 foi encontrado Mn, Cr, Sb, Ni, Pb, As, Co, Cd, Se e Be, sendo que o Pb excedeu os limites estabelecidos pela EPA (Tabela 3) (Hays et al., 2011).

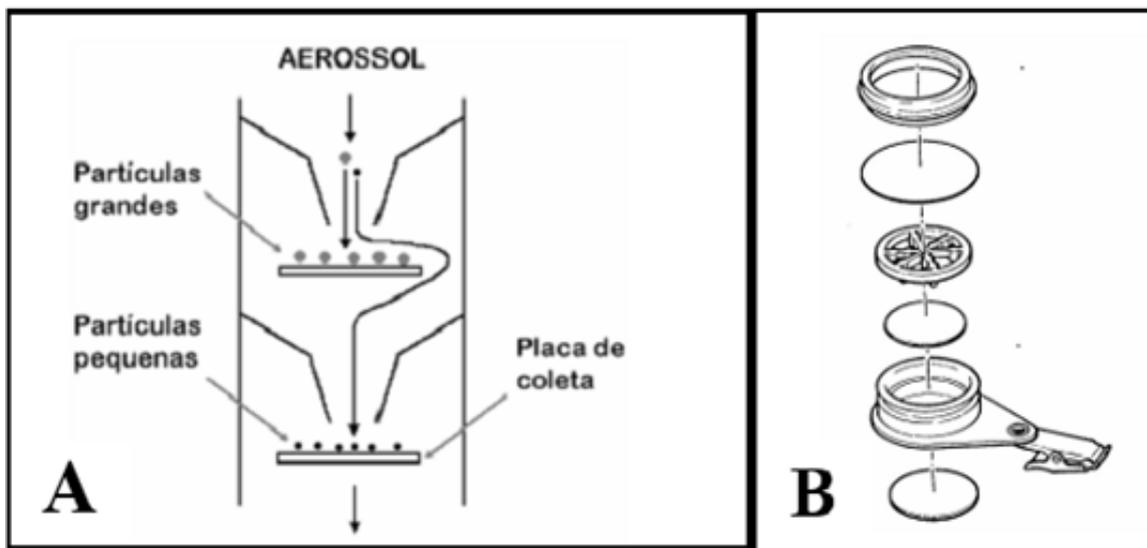
Já estudos realizados no Brasil, Ventura et al., (2017), na cidade do Rio de Janeiro, desenvolveu uma pesquisa sobre a composição química das PTS nas frações MP2,5 e encontrou concentrações de metais variando de 0,4 a 13,0 $\mu\text{g m}^{-3}$. Este estudo mostrou que nas emissões industriais estavam presentes os metais Cu, Cd e Pb, nas emissões de tráfego os metais Cr, Mn, Ni, Pb, V e Zn e nas emissões naturais Na, K, Ca, Ti, Al, Mg e Fe, todas as análises estavam coerentes com os estabelecidos pela OMS/WHO demonstrados na Tabela 3. No Médio Paraíba - RJ, foi avaliado em um distrito industrial as concentrações, fontes e distribuição dos metais Ca, Mg, K, Na, Mn, Fe, Zn, Cu, Cr, Ni, Al, Cd e Pb no PM e as maiores concentrações que encontradas foram dos metais Ca, Zn, Al, Fe e Mg sendo 19,12; 11,61; 12,28; 5,22 e 172 ng m^{-3} , respectivamente, e essa contaminação, segundo os autores, pode estar interligada à fabricação do aço e, além disso, de acordo com a Tabela 2 e Tabela 3, esses números excedem as leis vigentes (Loyola et al., 2006). Na área urbana da cidade de Manaus (Amazonas) foi realizada também a análise de metais na fração MP2,5 para 12 elementos metálicos (Al, Ba, Ca, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni e Zn) e foram todos encontrados, porém apenas o Fe apresentou maiores concentrações com 1,26 $\mu\text{g m}^{-3}$. Os autores relataram que o tráfego veicular foi a principal causa, juntamente com as emissões industriais (SILVA, 2020). As análises das fontes de emissões do PM são fundamentais para entender a relação entre a concentração do poluente no ar e os aumentos de veículos e indústrias. Além disso, possibilita também diferenciá-lo dos poluentes emitidos por fontes naturais. E, sobretudo, permite elucidar a contaminação ambiental por metais pesados, os quais contribuem para um perigo iminente em uma escala global, pois a presença de metais no PM influencia no aumento da sua toxicidade, acarretando efeitos nocivos à saúde humana, animais e plantas.

1.1 Métodos de detecção e caracterização

Para efetuar uma análise de um PM é necessário primeiramente analisar as condições meteorológicas da região, pois efeitos como umidade relativa, precipitação, velocidade e direção do vento podem influenciar na variabilidade das concentrações (SLIWINSKI, 2022). Após as análises meteorológicas, os amostradores ativos são utilizados para efetuar a coleta do PM

sendo eles conhecidos como High-Volume (High-Vol) grande volume, (Medium-Vol) médio volume e (Low-Vol) pequeno volume. Esses amostradores funcionam através de um mecanismo de sucção por bomba onde contém um filtro que mede o volume do ar amostrado, e dependendo do tipo do amostrador, os filtros podem ser de membranas de teflon, fibra de quartzo ou fibra de vidro como demonstrado Figura 4A (SILVA, 2020). Também existem amostradores passivos (Figura 4B), que recolhem as partículas da atmosfera sem o auxílio de uma bomba, não necessitam de energia e podem trabalhar durante um longo período (AIKES, 2019).

Figura 4: Desenho esquematizado de amostradores.



A - Filtro ativo com mecanismo de sucção por bomba; B - Filtro passivo sem o auxílio de uma bomb

Fonte: LOPES (2007); FEYGLEY, et al (1994)

Já para efetuar as análises químicas do PM, são utilizadas técnicas conhecidas como espectroscopia no qual seu papel fundamental é determinar qualitativamente e quantitativamente compostos orgânicos e inorgânicos (NASCIMENTO, 2020). Essas técnicas vêm sendo utilizadas para a determinação de metais em amostras de material particulado por possuírem alta precisão e sensibilidade, algumas delas vão ser descritas a seguir:

4.3.1 Espectrofotometria de absorção atômica (AAS)

A AAS é uma técnica que analisa apenas um elemento de interesse por vez se caracterizando monoelementar, ela se baseia na absorção de radiação por átomos livres no estado gasoso, na qual são estimulados por uma fonte de energia (chama ou forno de grafite) impulsinando um salto quântico absorvendo a luz em um determinado comprimento de onda, a absorção é específica para cada elemento portanto pode ocorrer interferências espectrais devido a alguns elementos que absorvem em comprimentos de onda bem próximos (SLIWINSKI, 2022).

4.3.2 Fluorescência de raios-X (XRF)

A medição por raios-X (XRF), acontece em uma amostra de elementos sólidos ou líquidos irradiados por elétrons, prótons ou Raio-X (gama). Os elétrons da camada mais internas do átomo interagem com fótons através dos Raios X, fazendo com que ocorra a foto ejeção criando uma vacância no qual promove estabilidade, suas vagas eletrônicas são preenchidas de acordo com os elétrons das camadas mais próximas, resultando há um excesso de energia capaz de manifestar a forma de emissão raio x caracterizando as ondas presentes na amostra (Pellegrini, 2022).

4.3.3 Espectrometria de massas com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS)

No ICP-MS, devido ao espectrômetro de massa ocorre uma combinação de plasma a uma alta temperatura e pressão atmosférica. Após o plasma ser acoplado, e o ar exposto, recebe uma descarga elétrica criando elétrons e íons. A existência de um campo magnético de alta frequência faz com que as partículas carregadas esquentam o argônio, ou seja, encarregando com que o plasma alcance temperatura de 5700 – 8300 °C. Enfim os compostos do analito do aerossol são dissociados, levando uma vaporização semi completa do analito, exercendo uma alta eficiência de atomização e formando íon com uma carga positiva (OLIVEIRA, 2009).

4.3.4 Espectrofotometria de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES)

Técnica analítica multielementar empregada na determinação quantitativa de mais de 70 elementos, no qual utiliza uma fonte de plasma para estimular átomos na iminência de emitir fótons de luz com comprimento de onda característicos e específicos de certo elemento (SILVA, 2020). Após a amostra líquida ser inserida no equipamento através de uma bomba, chega até o nebulizador ultrassônico onde os aerossóis são formados. Coletados pelo dreno, os maiores de 5 mm são retirados pela câmara de nebulização, já os menores seguem para o plasma formados através dos três tubos concêntricos de quartzo. Na parte externa o gás argônio se manifesta de forma turbulenta com vazão entre 5 a 20 L/min, energia entre 12-15 eV, chegando a temperaturas de até 10000 K, logo na parte interna passa o aerossol que em contato com o argônio promove a ionização dos elétrons da camada de valência, fazendo com que cada elemento emita luz em seus respectivos comprimentos de onda (AIKES, 2019).

4.3.5 Cromatografia iônica

A Cromatografia iônica permite a separação de componentes análogos há misturas complexas, a amostra pode ser gasosa ou líquida na qual é transportada por uma fase móvel ou uma

fase líquida, forçada a passar através de uma fase estacionária imiscível fixa sobreposta a uma coluna ou a uma superfície sólida. A escolha das duas fases acontece após a amostra se distribuir de acordo com seu grau em cada fase, ao final do processo a estimativa é que os componentes saiam em tempos diferentes. Essa separação acontece devido ao mecanismo de troca iônica, onde íons presos por um sólido (poroso, natural ou sintético, insolúvel) são trocados por íons de mesmo sinal presente na solução levada em contato com o sólido. Após a separação uma célula supressora fica responsável para suprimir os íons do efluente encaminhando apenas os íons da amostra para a detecção. No final, uma célula de condução monitora e mede a condutância elétrica dos íons da amostra, produzindo um sinal baseado em uma propriedade física ou química do analito (Pellegrini, 2022).

Esses métodos foram utilizados em estudos mundialmente para tentar manter a regularidade na qualidade do ar, a importância de seus dados produzidos tem um impacto gigantesco na sociedade, a fim de alcançar uma boa qualidade de vida para a humanidade junto ao meio ambiente. A análise de partículas sólidas, líquidas ou gasosas têm a devida importância qualitativamente quanto quantitativamente da determinação de compostos orgânicos e inorgânicos, buscando revelar suas fontes, seus níveis de emissões, junto a taxa de toxicidade (metais) presente na partícula como demonstrado na Figura 5. Enfatizando suas respectivas doenças no qual podem acarretar à saúde e buscando melhorias nas diretrizes vigentes atuais para evitar maiores fatalidades ao decorrer dos anos.

Figura 5: Limite de concentrações estabelecidas para metais.

Poluente	EPA	WHO	União Europeia	CONAMA
	Concentração ($\mu\text{g m}^{-3}$)			
Pb	0,15	0,5	0,5	0,5
Cd	-	0,005	0,005	-
Mn	-	0,15	-	-
Hg	-	1,0	-	-
As	-	-	0,006	-
Ni	-	-	0,02	-
Cr	-	0,11	-	-

Fonte: EPA, 2016; WHO, 2000; DIRECTIVA, 2004/2008; CONAMA, 2018

1.2 Métodos para minimização do PM no ar atmosférico

Internacionalmente, a OMS foi a responsável pelos eventos relacionados a emissões atmosféricas em conjunto com a AQG (air quality guideline level) no ano de 2021, devido à alta taxa de mortalidade e o aumento relativo de doenças respiratórias envolvendo o PM e sendo assim foi decretada a atualização das diretrizes antigas de 2005 como mostra na Tabela 6.

Tabela 6: Novas diretrizes da AQG 2021 em relação às de 2005

POLUENTES	MÉDIA DE TEMPO	2005 (air quality guideline)	2021 AQG Nível
$PM_{2.5}$, $\mu\text{g}/\text{m}^3$	ANUAL	10	5
	24/HORAS	25	15
PM_{10} , $\mu\text{g}/\text{m}^3$	ANUAL	20	15
	24/HORAS	50	45

Fonte: Modificada de WHO global air quality guidelines (2021)

Além da atualização das diretrizes, segundo Organização Mundial da Saúde (OMS, 2022), a implantação de leis envolvendo emissões industriais e veiculares repercutiu positivamente. Para as indústrias foi adotado leis de tecnologia limpa no qual reduzem as emissões das chaminés. Já para ramo automobilístico foi incentivado a utilização do diesel em veículos pesados, logo para veículos leves combustíveis menos poluentes. Além disso, promoveu incentivo a investimentos de locais de caminhada e ciclismo, bem como a utilização de transportes ferroviários de cagar/passageiro e, diante desse cenário, foram políticas que ajudaram na redução dos poluentes atmosféricos (OMS, 2022).

As redes de monitoramento também são umas das maiores responsáveis no incentivo a melhoria da qualidade do ar à população, essas redes alcançam vários estados/municípios, tendo a proposta de mostrar as principais fontes de emissões, a área onde está sendo afetada e qual prejuízo está causando à população com o intuito de minimizar os danos.

Atualmente, a USEPA possui uma das maiores redes de monitoramento da qualidade do ar, no qual exige que os Estados apresentem, anualmente, um plano onde consiste em especificar os tipos de estações instaladas, exigindo evidências de que a localização e a operação atendam aos requisitos científicos (EPA, 2012). A SIP (Implementation Plan) é responsável por analisar e classificar áreas com maior nível de contaminação, definindo planos estaduais para exigências específicas. Após a aprovação da EPA essas leis têm caráter federal obrigatórias e, caso não demonstrem progresso nas melhorias ou não cumpram as SIPS, a EPA pode tomar para si o gerenciamento da área ou até mesmo proibir os recebimentos de fundos federais destinado à manutenção e construção de rodovias no estado (SANTANA et al, 2012).

Os programas de controle de qualidade do ar nos EUA são divididos entre AQ (Quality Assurance) na qual fornece o gerenciamento que interfere na qualidade/processo e QC (Quality Control) procedimento que recebe os dados precisos. Na agencia ambiental da California, de acordo com o Ato de Proteção da Saúde Ambiental das Crianças, o ARB (Conselho de Recursos

do Ar) junto à o Escritório de Avaliação de Perigo à Saúde Ambiental (OEHHA) são encarregados de realizar as revisões dos padrões de qualidade do ar. A revisão para cada poluente dá-se a cada cinco anos, podendo ser antecipada de acordo com os estudos correlacionados ou aumento decorrente de adoecimentos. Esse documento é colocado à disposição pública para comentários junto a workshops correlacionado a pesquisas científicas resultando em um relatório final atribuído pelo AQQC podendo acarretar um novo padrão (EPA, 2012).

Vários governos internacionais, estão tomando medidas para melhorar a qualidade do ar, mas a OMS está pedindo uma rápida intensificação das ações para:

- Adotar ou revisar e implementar padrões nacionais de qualidade do ar de acordo com as últimas diretrizes da OMS;
- Monitorar a qualidade do ar e identificar fontes de poluição;
- Apoiar a transição para o uso exclusivo de energia doméstica limpa para cozinhar, aquecer e iluminar;
- Construir sistemas de transporte público seguros e acessíveis e redes amigáveis para pedestres e ciclistas;
- Implementar padrões mais rígidos de emissões e eficiência dos veículos; e impor inspeção e manutenção obrigatórias para veículos;
- Investir em habitação com eficiência energética e geração de energia;
- Melhorar a gestão de resíduos industriais e municipais;
- Reduzir a incineração de resíduos agrícolas, incêndios florestais e certas atividades agroflorestais (por exemplo, produção de carvão);
- Incluir a temática de poluição do ar nos currículos dos profissionais de saúde e fornece ferramentas para o envolvimento do setor da saúde;
- Países de renda mais alta têm menor poluição por partículas, mas a maioria das cidades tem problemas com dióxido de nitrogênio.

Já no âmbito nacional, os padrões nacionais de qualidade do ar foram estabelecidos por meio da Portaria Normativa IBAMA nº 348 de 14/03/1990, transformados na Resolução CONAMA nº 03/90, de 28/06/1990 e recentemente aprimorados pela Resolução CONAMA nº 491/18, de 19/11/2018 onde inclui em seus padrões os limites de concentração estabelecidos por base da OMS (Tabela 2) (AIKES, 2019).

Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), a poluição atmosférica é a principal causa de mortalidade no mundo decorrente de fatores ambientais. Em São Paulo, os níveis de poluição atmosférica pelo material particulado encontram-se em níveis mais elevados do que o recomendado pela OMS (RODRIGUES et al., 2016). A CETESB é a única rede de monitoramento do ar existente no Brasil e responsável por monitorar o Estado de São Paulo. No estado de São Paulo é utilizado o decreto estadual nº 59.113, de 23/04/2013 para estabelecer padrões de qualidade do ar representado na Figura 5, o qual toma como base as diretrizes estabelecidas pela OMS (CETESB, 2020).

Figura 5 -Metas intermediárias do decreto estadual nº 59.113, de 23/04/2013

<ul style="list-style-type: none">• Metas Intermediárias - (MI) estabelecidas como valores temporários a serem cumpridos em etapas, visando à melhoria gradativa da qualidade do ar no Estado de São Paulo, baseada na busca pela redução das emissões de fontes fixas e móveis, em linha com os princípios do desenvolvimento sustentável.• As MI devem ser atendidas em três etapas até que se alcancem os valores dos padrões finais.• Padrões Finais (PF). São os valores-guia indicados pela OMS-2005 para a proteção da saúde das pessoas.	<p>MI1 - Valores de concentração poluentes atmosféricos vigentes de 24/04/2013 a 31/12/2021.</p> <p>MI2 - Valores de concentração de poluentes atmosféricos que devem ser respeitados subsequentemente à MI1, vigentes a partir de 01/01/2022 por Decisão CONSEMA nº 04/2021 de 19/05/2021 (SÃO PAULO, 2021).</p> <p>MI3 - Valores de concentração de poluentes atmosféricos que devem ser respeitados nos anos subsequentes à MI2, com seu prazo de duração definido pelo CONSEMA, com base nas avaliações realizadas na Etapa 2.</p> <p>PF - Padrões determinados pelo melhor conhecimento científico para que a saúde da população seja preservada ao máximo em relação aos danos causados pela poluição atmosférica.</p>
--	--

Fonte: CETESB (2020)

Atualmente, a CETESB efetua seu monitoramento através de redes automáticas composta por 62 estações fixas e uma estação móvel monitorando em 42 municípios. É constituída de estações medidoras que mostram e analisam os poluentes continuamente e estão alocadas tanto na Região Metropolitana de São Paulo como no interior e litoral. O Setor de Telemetria é responsável por registrar as concentrações dos poluentes na atmosfera de hora em hora. Já a rede manual é composta por 22 estações monitoradas em 16 municípios com amostradores de Grandes Volumes para partículas inaláveis (MP10) e amostradores de partículas inaláveis finas (MP2,5) as amostras são coletadas no campo e trazidas para análise no Setor de Amostragem e Análise do Ar (CETESB, 2020).

Segundo a Cetesb (2020), foi realizada na Macrometrópole Paulista (São Paulo) uma análise de poluente devido ao alto tráfego veicular, como resultado tiveram que o Ozônio ultrapassou os limites do padrão de qualidade do ar e, sobretudo, o material particulado mostrou níveis impactantes. E dessa forma, foi apontada a necessidade de melhorias do controle desses poluentes em todo o estado. Diante desses fatos, planos como o PCPV (Planos de Controle da Poluição Veicular) têm sido elaborados desde 2011, porém só foram aprovados no início

de 2021, após o término da pandemia (CETESB, 2021). A CETESB junto ao Plano de Redução de Emissão de Fontes Estacionárias (PREFE) está tentando adotar maneiras de minimizar os poluentes gerados pela atividade industrial no Estado de São Paulo, algumas medidas como controle direcionado às fontes, planejamento da expansão da rede de monitoramento e lista de empreendimentos de maior contribuição para a condição de criticidade da qualidade do ar nas sub-regiões estão sendo implantadas. Somando-se a isso, o Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar (PRONAR), é responsável por uma Rede Básica de Monitoramento exercida nacionalmente, que permitirá o acompanhamento dos níveis de qualidade do ar e sua comparação com os respectivos padrões estabelecidos (SANTANA et al., 2012). Em contrapartida, o PRONAR não é preciso sobre a quem incumbe as responsabilidades pelo monitoramento, tanto na parte de implantação quanto suporte econômico. A carência de regulamentação no nível federal, aliadas aos problemas econômicos e financeiros vivenciada pela administração pública tem contribuído para o péssimo controle da qualidade do ar do país. Além disso, o IEMA (Instituto de Energia e Meio Ambiente) relatou recentemente que apenas doze estados da Federação têm algum tipo de monitoramento da qualidade no ar, sendo que a grande maioria enfrenta problemas como manutenção dos equipamentos e uma série de dados não representativa. (IEMA, 2014).

Portanto nota-se que é necessário a implementação de novas diretrizes mais rigorosas no âmbito nacional para o monitoramento contínuo, a integração das redes de monitoramento estaduais/municipais e a participação da academia na caracterização da composição do material particulado, pois o Brasil é composto por 26 Estados e apenas um contém tais análises controladas. Diante disso, medidas como o uso de combustíveis menos poluentes, transportes alternativos, controle das emissões industriais e a manutenção de áreas verdes deveriam ser tomadas em todos os estados para evitar o aumento das doenças e nos custos com a saúde pública.

Os países internacionais devido a um amplo desenvolvimento sustentável e econômico atualmente se encontram mais qualificados que os nacionais, suas formas de minimizar os poluentes existentes do ar, junto a seus meios de monitoramentos perto do âmbito nacional, são extremamente mais eficazes. A clareza e resiliência que é adotada com a população internacional em relação aos poluentes é algo inexplicável, o auxílio e incentivo de estudos junto a comentários para melhorias sempre são aceitos pelos programas de monitoramentos tal qual nacionalmente não é nem um plano existente.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nota-se que no âmbito internacional existem métodos mais efetivos perto do âmbito nacional, porém o fato do PM estar relacionado à toxicidade dos metais é um problema gigantesco mundialmente. Diante dos fatos, ficou nítida a falta de conhecimento sobre a mitigação desses po-

luentes, principalmente, dos PMs finos (MP_{2,5}) que são responsáveis pela veiculação de metais tóxicos que afeta todo o bioma terrestre e aquáticos. Somando-se a isso, o contato com esse ar poluído ao longo dos anos pode também apresentar risco à saúde humana de uma forma direta ou indireta. Ficou claro que, tanto nacionalmente quanto internacionalmente, os problemas são os mesmos no qual os maiores responsáveis pelas emissões de PM são as indústrias e a frota de veículos terrestres. Diretrizes mais coerentes com a realidade precisam ser criadas, principalmente, em relação aos metais presentes no PM, pois vários estudos realizados apontaram para alta toxicidade desse poluente o qual pode causar vários tipos de doenças respiratórias (rinite, sinusite, bronquite, asma, pneumonia, etc), cardiovasculares (comprometimento dos vasos, circulação sanguínea, taquicardia, etc), e até mesmo câncer. A OMS é tida como base mundialmente na área da saúde, contudo, nas últimas diretrizes criada em 2021, os metais e os COVs foram os únicos que não obtiveram atualizações. Está claro que a presença dos metais no ar atmosférico existe e certamente é um dos principais responsáveis pelo aumento da mortalidade na atualidade relacionada a intoxicação por metais pesados, entretanto, é um assunto pouco falado e citado mundialmente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIKES, MATIAS ALFREDO ET AL, Avaliação de metais em material particulado MP10 na fronteira Brasil-Paraguai (Ponte da Amizade). 2019. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. <http://riut.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/25489>

CETESB. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Qualidade do ar no Estado de São Paulo, 2021. Disponível em : <https://cetesb.sp.gov.br/ar/publicacoes-relatorios/>

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 491, de 19 de novembro de 2018. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar. Disponível em: < <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi-740>>

DE SOUZA PELLEGRINI, INGRID Desenvolvimento de métodos para determinação de metais e metalóides em amostras de sangue animal por DMA e TXRF. 2022. <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/45147>

DIAS, A. A. C. Andrade-Neto, A. V., & Miltão, M. S. R. (2007). A ATMOSFERA TERRESTRE: COMPOSIÇÃO E ESTRUTURA. AAC Dias, AV Andrade-Neto, MSR Miltão - 2007 - academia.edu

EDUARDO SANTANA et al - Padrões de qualidade do ar: experiência comparada Brasil, EUA e União Européia - São Paulo: Instituto de Energia e Meio Ambiente, 2012.

EPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. National Ambient Air Quality Standards. Disponível em : <http://www.epa.gov/air/criteria.html>.

EPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. National Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter: Proposed Rule. 40 CFR Parts 50, 51, 52, et al. Fed. Regist. Vol. 77, Nº 126, 2012a.

FEIGLEY, C. E.; Riley, T. D.; Underhill, D. W.; Lungu, C. T.; Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 1996, 57, 551.

HAYS, M. D. et al. Particle size distributions of metal and non-metal elements in an urban near-highway environment. Atmos. Envir., 45, p. 925-934, 2011.

HOINASK, LEONARDO, "Avaliação de métodos de identificação de fontes emissoras de material particulado inalável (MP10)." (2013). <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/103289>

JANE MERI SANTOS, Neyval Costa Reis Junior Elson Silva Galvão (orgs.) Material Particulado na atmosfera urbana e suas interações com a saúde humana.– Goiânia: Alta Performance, 2022.

KHAN, M. F., et al. Characterization of PM2.5, PM2.5-10 and PM10 in ambient air, Yokohama, Japan. Atmos. Research, vol. 96, p.159-172, 2010a.

KHAN, M. F., et al. Quantifying the sources of hazardous elements of suspended particulate matter aerosol collected in Yokohama, Japan. Atmos Environment, vol. 44, p. 2646-2657, 2010b.

LOPES, W. A. Determinação de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos associados ao material particulado atmosférico. Tese de Doutorado – Instituto de Química, Universidade Federal da Bahia, 2007.

LOYOLA, J., et al. Concentration and emission sources of airborne metals in particulate Matter in the industrial district of Médio Paraíba, state of Rio de Janeiro, Brazil. *Archi. of Enviro. Contam. and Toxic.*, vol. 51, p. 485-493, 2006.

MINISTERIO DA SAUDE, SECRETARIA DE CIENCIA, TECNOLOGIA E INSUMOS ESTRATEGICOS - Síntese de Evidências para Políticas de Saúde: reduzindo a emissão do poluente atmosférico: material particulado em benefício da saúde no ambiente urbano Departamento de Ciência e Tecnologia. – Brasília: Ministério da Saúde, 2016

NASCIMENTO, RITA DE KÁSSIA SILVA DO, Material particulado atmosférico da cidade de São Carlos e sua toxicidade em culturas de células pulmonares. 2022. <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/15876>

NETO, J. W. (2007). AVALIAÇÃO DE METAIS PESADOS EM EMISSÕES ATMOSFÉRICAS DE INDÚSTRIA AUTOMOTIVA POR FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X. JW NETO - 2007 - repositório.unicamp.br

OLIVEIRA, Valéria Vidal de. Análise gravimétrica e avaliação de metais traço presentes em material particulado coletado durante abertura dos fornos de uma indústria de fundição. 2008. VV Oliveira - 2008 - repositório.ufsc.br

SANTOS, H. L., FIALHO, M. L., REIS, K. P. FRANCO, M. V., & OLIVEIRA, R. B. D. (2019). Relação entre poluentes atmosféricos e suas consequências para a saúde. *Revista Científica Intr@ ciência*, 17, 01-24. https://uniesp.edu.br/sites/_biblioteca/revistas/20190312105045.pdf

SCHLUTOW, A., Schröder, W. & Scheuschner, T. Avaliando a relevância da deposição de metais pesados atmosféricos em relação à integridade do ecossistema e à saúde humana na Alemanha. *Environ Sci Eur* 33 , 7 (2021). <https://enveurope.springeropen.com/articles/10.1186/s12302-020-00391-w>

SILVA, SILVANA, "Análise de metais no material particulado atmosférico fino (mp2, 5) na área urbana da cidade de Manaus." (2020). <https://repositorio.inpa.gov.br/handle/1/36461>

SILVA, LUCA CORREIA MARTINS DA - Caracterização química do material particulado atmosférico (MP10) do Distrito Federal. 2021. <https://bdm.unb.br/handle/10483/31294>

SLIWINSKI, JACQUELINE, Meta-análise dos metais pesados presentes no material particulado da atmosfera: uma perspectiva global. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/49624>

VALAVANIDIS, A. FIOTAKIS, K. VLAHOGIANNI, T.; BAKEAS, E. B.; TRIANTAFILLAKI, S.; PARASKEVOPOULOU, V.; DASSENAKIS, M. Characterization of atmospheric particulates, particle-bound transition metals and polycyclic aromatic hydrocarbons of urban air in the centre of

Athens (Greece). *Chemosphere*, 65, 760– 768, 2006.

WHO - World Health Organization. *Air Quality Guidelines for Europe*, 2 nd edition, WHO: Copenhagen, 2000.

WHO - World Health Organization. *Health aspects of air pollution with particulate matter, ozone and nitrogen dioxide*, WHO: Geneva, 2003.

WHO global air quality guidelines. *Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. Geneva: World Health Organization; 2021.

WHO - World Health Organization. *Ambient (outdoor) air pollution*. World Health Organization; 2022

ZHOU, S. et al. Trace metals in atmospheric fine particles in one industrial urban city: Spatial variations, sources, and health implications. *Jour. of Enviro. Sciences*, vol. 26, p. 205-213, 2014.