



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE CIÊNCIAS DA SAÚDE
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS FARMACÊUTICAS

WENDELL SANTOS DE CARVALHO

**IMPACTOS NA SAÚDE HUMANA CAUSADOS PELA POLUIÇÃO
ATMOSFÉRICA PROVENIENTE DA QUEIMA DE COMBUSTÍVEIS E
BIOMAS: REVISÃO DE LITERATURA E ESTUDO *IN SILICO***

RECIFE

2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE CIÊNCIAS DA SAÚDE
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS FARMACÊUTICAS

WENDELL SANTOS DE CARVALHO

**IMPACTOS NA SAÚDE HUMANA CAUSADOS PELA POLUIÇÃO
ATMOSFÉRICA PROVENIENTE DA QUEIMA DE COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS
E BIOMAS: REVISÃO DE LITERATURA E ESTUDO *IN SILICO***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à disciplina TCC2 do curso de graduação em Farmácia da Universidade Federal de Pernambuco como parte do requisito para aprovação no curso de Farmácia.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Brandão e
Co-orientadora: Prof.^a Dra. Jane Hígino.

RECIFE

2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Carvalho, Wendell Santos de .
IMPACTOS NA SAÚDE HUMANA CAUSADOS PELA POLUIÇÃO
ATMOSFÉRICA PROVENIENTE DA QUEIMA DE COMBUSTÍVEIS
FÓSSEIS E BIOMAS: REVISÃO DE LITERATURA E ESTUDO IN SILICO /
Wendell Santos de Carvalho. - Recife, 2024.
58 : il., tab.

Orientador(a): Ricardo Brandão
Coorientador(a): Jane Higinio
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de
Pernambuco, Centro de Ciências da Saúde, Farmácia - Bacharelado, 2024.
9.5.

Inclui referências, apêndices.

1. Poluição . 2. Saúde . 3. Análise in silico. I. Brandão, Ricardo. (Orientação).
II. Higinio, Jane. (Coorientação). IV. Título.

010 CDD (22.ed.)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE CIÊNCIAS DA SAÚDE
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS FARMACÊUTICAS
CURSO DE BACHARELADO EM FARMÁCIA



Aprovada em: 04/10/2024.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
gov.br RICARDO BRANDAO
Data: 04/10/2024 16:23:41-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Ricardo Brandão
(Presidente e Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Documento assinado digitalmente
gov.br JACIANA DOS SANTOS AGUIAR
Data: 05/10/2024 21:32:03-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Jaciana dos Santos Aguiar
(Examinadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Documento assinado digitalmente
gov.br SILVIA REGINA DA SILVEIRA NEVES
Data: 08/10/2024 15:56:13-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Sílvia Regina da Silveira Neves
(Examinadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Dr. Thiago Silva de Almeida
(Suplente)
CETENE

Esta monografia é dedicada aos meus pais, **José Francisco de Carvalho** e **Jozelia Santos de Carvalho**, pilares da minha formação como ser humano. E a todos os meus amigos e professores que me ajudaram ao longo desta caminhada.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a Deus, por ter me concedido saúde, força e resiliência para superar cada desafio que encontrei ao longo desta jornada.

A minha família, parentes e amigos, sou eternamente grato por seu amor incondicional e por todo o incentivo que me deram. Cada palavra de encorajamento, cada gesto de apoio, foi crucial para que eu pudesse concluir meu curso. Vocês foram, e continuam sendo, minha base sólida e meu refúgio.

Gostaria de agradecer a todos os professores que, ao longo da minha formação, compartilharam comigo não apenas conhecimento acadêmico, mas também valores que moldaram meu caráter e visão de mundo. Cada aula foi uma oportunidade de crescimento, não apenas intelectual, mas também pessoal. A dedicação e a paciência de vocês fizeram toda a diferença na minha trajetória.

A palavra "mestre" nunca será suficiente para expressar a minha admiração e gratidão por aqueles que se dedicaram a ensinar, mas também a despertar em mim a paixão pelo aprendizado. Obrigado por terem me ensinado a aprender.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente com este trabalho, muito obrigado.

“...todas as pessoas no planeta têm direito a um meio ambiente limpo e saudável”

Organização das Nações Unidas

RESUMO

No século XIX, com a expansão da indústria petrolífera e o surgimento de novos combustíveis como o diesel e a gasolina, a liberação de gases tóxicos na atmosfera atingiu níveis alarmantes. Esse processo histórico levou à deterioração progressiva da qualidade do ar. Os impactos dessa poluição são vastos, afetando não apenas o meio ambiente, mas também a sociedade em termos socioeconômicos e de saúde pública. Esta pesquisa focou no levantamento bibliográfico para análise, e processamento *in silico*, das classes de poluentes atmosféricos e seus impactos na saúde respiratória. Para a busca bibliográfica, foram utilizados os termos combinados “poluição atmosférica x impacto na saúde x impactos socioeconômicos” em três plataformas de busca: Scientific Electronic Library Online, ScienceDirect® e Google Acadêmico. Após a aplicação de critérios de exclusão, a janela de tempo de busca foi de 2000 a 2024, como critérios de exclusão foram adotados os seguintes: exclusão de artigos duplicados, artigos com fuga do tema, e que não abordavam impactos a saúde e socioeconômicos. Sendo selecionados quinze (15) trabalhos publicados entre 2000 e 2024. A partir desses estudos, foram identificados e analisados representantes de cada classe de poluentes, incluindo material particulado (MP), óxidos de nitrogênio (NO_x), compostos orgânicos voláteis (COVs), chumbo e dióxido de enxofre (SO₂). Esses poluentes atmosféricos contribuem para o aumento e agravamento de doenças respiratórias, como asma, bronquite crônica e Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica (DPOC), além de estarem associados ao desenvolvimento de outras condições, como câncer de pulmão e doenças cardiovasculares. Utilizando simulações *in silico*, caracterizaram-se quimicamente esses poluentes e seus comportamentos, indicando efeitos carcinogênicos, neurotóxicos e ecotóxicos, entre outros. Esta revisão e a análise *in silico* proporcionou uma visão aprofundada das interações desses poluentes com o corpo humano e seu papel no agravamento de doenças respiratórias, além de oferecer um potencial embasamento para futuras pesquisas e políticas públicas voltadas à mitigação dos impactos da poluição atmosférica.

Palavras-chave: Poluição atmosférica, Poluentes, Doenças respiratórias

ABSTRACT

In the 19th century, with the expansion of the oil industry and the emergence of new fuels such as diesel and gasoline, the release of toxic gases into the atmosphere reached alarming levels. This historical process led to the progressive deterioration of air quality. The impacts of this pollution are vast, affecting not only the environment but also society in socioeconomic and public health terms. This research focused on a bibliographic review for analysis and in silico processing of classes of atmospheric pollutants and their impacts on respiratory health. For the bibliographic search, the combined terms “air pollution x health impact x socioeconomic impacts” were used on three search platforms: Scientific Electronic Library Online, ScienceDirect®, and Google Scholar. After applying exclusion criteria, the search time frame was set from 2000 to 2024, with the following exclusion criteria: duplicate articles, articles deviating from the topic, and those that did not address health and socioeconomic impacts. Fifteen (15) studies published between 2000 and 2024 were selected. From these studies, representatives of each class of pollutants were identified and analyzed, including particulate matter (PM), nitrogen oxides (NO_x), volatile organic compounds (VOCs), lead, and sulfur dioxide (SO₂). These atmospheric pollutants contribute to the increase and worsening of respiratory diseases, such as asthma, chronic bronchitis, and Chronic Obstructive Pulmonary Disease (COPD), and are also associated with the development of other conditions, such as lung cancer and cardiovascular diseases. Using in silico simulations, these pollutants and their behaviors were chemically characterized, indicating carcinogenic, neurotoxic, and ecotoxic effects, among others. This review and in silico analysis provided an in-depth view of the interactions of these pollutants with the human body and their role in exacerbating respiratory diseases, as well as offering a potential foundation for future research and public policies aimed at mitigating the impacts of atmospheric pollution.

Keywords: Air pollution, Pollutants, Respiratory diseases

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01	Contribuições dos gases estufa mais importantes desde a era pré-industrial até 2020 (Fonte: WMO Greenhouse Gas Bulletin No. 17).	24
Figura 02	Emissões totais de CO ₂ no mundo desde o início da revolução industrial	25
Figura 03	Quantidade de partículas de poluição no ar medida a 550 nm nesta terça-feira (03/09/2024) às 0h (horário de Brasília), segundo o CAMS, o Serviço de Monitoramento da Atmosfera do Copernicus	26
Fluxograma 1	Fluxograma das etapas seguidas na metodologia	27
Quadro 01	Artigos selecionados após aplicação dos critérios de seleção	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 01	Parâmetros físico-químicos e metabolismo de alguns poluentes atmosféricos	35
Tabela 02	Parâmetros toxicológicos in sílico para representantes de poluentes atmosféricos.	50
Tabela 03	Predição de efeitos toxicológicos para o benzeno e benzopireno.	51

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
2 OBJETIVOS.....	16
2.1 Objetivo geral.....	16
2.2 Objetivos específicos.....	16
3 REFERÊNCIAL TEÓRICO.....	18
3.1 Principais poluentes da atmosfera.....	18
3.1.1 Combustíveis fósseis.....	20
3.1.2 Poluentes oriundos das queimadas.....	20
3.2 Impactos ambientais dos gases e partículas poluentes.....	20
3.3 Impactos sociais e econômicos da poluição atmosférica.....	21
3.4 Ações globais para o gerenciamento da poluição atmosférica.....	22
3.5 Evidências do acúmulo de partículas e gases poluentes na atmosfera.....	23
4 METODOLOGIA.....	27
4.1 Revisão integrativa.....	27
4.2 Análises <i>in silico</i>	29
4.2.1. Estrutura dos compostos identificados para processamento <i>in silico</i>	29
4.2.2 Parâmetros ADME/T.....	29
4.2.3 Predição de toxicidade <i>in silico</i>	29
4.3 Análise de dados.....	30
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	31
5.1 Perfil de composição dos gases e partículas poluentes.....	34
5.2 Principais Efeitos no Organismo Causados pelos Poluentes atmosféricos.....	41
5.2.1 Material particulado.....	41
5.2.2 Ozônio.....	43
5.2.3 Óxidos de nitrogênio.....	44
5.2.4. Monóxido de carbono.....	45
5.2.6. Chumbo.....	47

5.2.7. Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs) e Compostos Orgânicos Voláteis (VOCs).....	48
5.3 Análises <i>in silico</i>	49
6 CONCLUSÃO.....	54
REFERÊNCIAS.....	55

1 INTRODUÇÃO

No período paleolítico, o homem desenvolveu a habilidade de dominar o fogo e passou a usar esse elemento essencial na cocção dos alimentos e, com o surgimento da agricultura, passou a usar o fogo para desmatar as áreas que seriam usadas na agricultura (Cotrim, 2019). Seguindo para a segunda metade do século XVIII, a Inglaterra passou por uma grande revolução tecnológica, período em que foi conhecido como Revolução Industrial. Nessa época, deu-se a criação das máquinas a vapor, que precisavam de combustíveis de alto valor calorífico, sendo o carvão mineral o mais usado na época.

Em decorrência do uso em larga escala dessa matriz energética, a sociedade pela primeira vez se deparou com os problemas relacionados a poluição atmosférica, em virtude do lançamento desenfreado dos gases gerados no processo de combustão (Cotrim, 2019). Em meados do século XIX, iniciou-se com a indústria petrolífera, a exploração do gás natural e petróleo, e com o desenvolvimento do processo de refino destes materiais, novas variantes de combustíveis foram introduzidas, aumentando o consumo em larga escala, como o diesel, gasolina, querosene e GLP (Gás Liquefeito de Petróleo) (Weber, 2005).

A queima resultante desses componentes é responsável por lançar na atmosfera milhares de toneladas de gases poluentes. Por exemplo, o Brasil produziu 2,3 bilhões toneladas de gases de efeito estufa em 2022, segundo o Observatório do Clima (Tsai, D., *et al.*). O constante aumento do desmatamento, com objetivo de ampliar as áreas de pastagens e de agricultura, limpando a vegetação nativa e o solo, contribui grandemente para o lançamento de gases poluentes, a piora na qualidade do ar e a perda da biodiversidade (Garrido, 2023).

Todos esses fatores, promovidos pelos seres humanos, acentuaram nos últimos 274 anos a piora da qualidade do ar e induziram alterações significativas na atmosfera, muitas delas praticamente irreversíveis (Borrego *et al.*, 2010). Os inúmeros poluentes atmosféricos, dentre eles, dióxido de enxofre, monóxido e dióxido de carbono, aldeídos, material particulado e os poluentes climáticos de vida curta, tem contribuído de forma significativa no

aumento de casos de doenças respiratórias na sociedade (Santos *et al.*, 2019). Doenças como Asma, Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica (DPOC), Bronquite, Câncer de Pulmão e AVC estão entre as principais afecções causadas pela poluição atmosférica, impactando a vida das pessoas, produzindo efeitos agudos e crônicos nos sistemas dos indivíduos.

Diante do histórico impactante da atividade humana na qualidade do ar, torna-se essencial o desenvolvimento de projetos de pesquisa, como este, que reúnam informações precisas sobre o impacto dos poluentes atmosféricos na saúde. Esta análise pode servir como fonte de informações para a implementação de políticas públicas eficazes de controle da poluição do ar, bem como pode auxiliar na conscientização da população sobre os riscos à saúde associados à exposição a esses poluentes.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Analisar o perfil dos poluentes atmosféricos emitidos pela queima de combustíveis fósseis e queimadas, caracterizando-os e avaliando seus impactos na saúde humana por meio de levantamento bibliográfico e análise *in silico*.

2.2 Objetivos específicos

- Identificar e categorizar os principais poluentes atmosféricos: Mapear os poluentes gerados pela queima de combustíveis fósseis e queimadas, incluindo material particulado (MP), óxidos de nitrogênio (NO_x), compostos orgânicos voláteis (COVs), dióxido de enxofre (SO₂), e outros, detalhando suas fontes e distribuição.
- Caracterizar as propriedades físico-químicas dos poluentes atmosféricos: Analisar as características físico-químicas desses poluentes, como estabilidade, solubilidade e reatividade, que influenciam seu comportamento no ambiente e na exposição humana.
- Investigar os efeitos tóxicos no organismo humano: Examinar como a exposição a esses poluentes afeta a saúde humana, com foco nas principais doenças e condições associadas, como problemas respiratórios, cardiovasculares, e os potenciais efeitos neurotóxicos e carcinogênicos.
- Realizar análises *in silico* para caracterização e impacto toxicológico: Utilizar simulações computacionais para prever a interação dos poluentes com o organismo humano, avaliando a potencial toxicidade, mutagenicidade e outros riscos à saúde em nível molecular.

- Relacionar os poluentes atmosféricos com os riscos à saúde pública: Sintetizar os dados obtidos para identificar as classes de poluentes com maior impacto na saúde e fornece uma base científica para o desenvolvimento de políticas públicas de mitigação e controle da poluição.

3 REFERÊNCIAL TEÓRICO

3.1 Principais poluentes da atmosfera

A poluição do ar, ou poluição atmosférica, pode ser definida como uma alteração das propriedades naturais da atmosfera ocasionada pela emissão de gases, materiais particulados ou agentes biológicos. Pode ser causada por fatores antrópicos ou por fatores naturais (Ministério do Meio Ambiente – MMA, 2024).

Entende-se também que a poluição atmosférica pode incluir qualquer forma de matéria ou energia com intensidade, concentração, tempo ou características que possam tornar o ar impróprio, nocivo à saúde, inconveniente ao bem-estar público, danoso aos materiais (fachadas de prédios e esculturas), à fauna e à flora ou prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e à qualidade de vida da comunidade (Ministério do Meio Ambiente – MMA, 2024).

Sabe-se que muitos dos poluentes ambientais são emitidos através de atividades humanas em grande escala como, através do uso de maquinário industrial, motores a combustão, técnicas de cultivo de campo, postos de gasolina, aquecedores de tanques de combustível e procedimentos de limpeza, bem como várias atividades naturais (Manisalidis *et al.*, 2020).

O sistema atmosférico é extremamente dinâmico, sendo passivo a diversas interferências antrópicas, ou não, que causam perturbações atmosféricas em níveis locais e globais. Por exemplo, a erupção vulcânica do vulcão Krakatoa, na Indonésia, em 1883, lançou gases e rochas a mais de 100 km de altura, provocando uma grande perturbação atmosférica que foi sentida em todo o planeta. Com a enorme poeira de gases e partículas em suspensão na atmosfera, a população da época sentiu a queda nos níveis da temperatura global, a incidência de chuvas recordes, provocando enchentes e alagamentos e o aumento de gás sulfúrico nas nuvens, aumentando a acidez da água, tendo o planeta, segundo estimativas, voltado a normalidade cinco anos depois deste acontecimento.

No Brasil, temos o bioma do Cerrado, que por um processo natural e combinado por alguns fatores, dentre eles: o clima seco, as altas temperaturas,

biomassa seca, descargas elétricas e o atrito de animais com a mata seca, acabam criando condições perfeitas para o surgimento natural de queimada da vegetação, lançando gases poluentes na região central do país (Silva Junior *et al.*, 2019).

As ações antrópicas causadas pelo ser humano desde a descoberta do fogo, modificam a qualidade do ar de modo imperceptível. Há dois mil anos, em Roma, ocorreram as primeiras reclamações por causa das queimadas e piora da qualidade do ar (Cavalcanti, 2010). Todas essas ações antrópicas foram intensificadas durante o período da Revolução Industrial, com o uso em larga escala de combustíveis fósseis, a ausência de consciência ambiental e controle desses gases poluentes, que contribuíram de forma significativa para os primeiros problemas relacionados a poluição atmosférica nas cidades industrializadas.

Um dos berços das Revolução Industrial foi a cidade de Manchester, Inglaterra, onde o pesquisador Robert Angus Smith, no livro *Air and Rain: the Beginnings of a Chemical Climatology* descreveu pela primeira vez, em 1872, o termo: chuva ácida, em que a elevada concentração de dióxido de enxofre e nitrogênio na atmosfera, mais a presença de partículas de água, faz com que ocorram reações químicas, formando ácidos, que com a precipitação vão dar origem a chuva ácida.

No Brasil, a cidade de Cubatão, no estado de São Paulo, por abrigar um grande conglomerado da indústria petroquímica, que transformou a cidade, tornando-a rica e próspera, porém todo esse desenvolvimento trouxe também inúmeros problemas ambientais. Segundo a Organização das Nações Unidas (ONU), Cubatão foi classificada como a cidade mais poluída do mundo, isso porque por dia eram lançados na atmosfera mais de mil toneladas de componentes químicos, sem nenhum tratamento, como o benzeno, óxidos de enxofre e nitrogênio. Todo esse excesso de poluição fez com que a cidade ficasse conhecida na década de 80 como o Vale da Morte (Canal History, 2022).

3.1.1 Combustíveis fósseis

De acordo com o Serviço de Geologia Brasileiro (2024), as fontes de energia não renovável são aquelas que a natureza demora milhares de anos para repor, sendo consideradas finitas e esgotáveis. As três principais fontes de energia não renováveis são: carvão mineral, gás natural e o petróleo. Essas principais fontes de energia não renováveis são consideradas combustíveis fósseis, pois ambos os produtos tiveram como origem o depósito de matéria orgânica – animais mortos e plantas – nas regiões de bacias sedimentares que quando submetidos às condições ideais de temperatura e pressão dão origem a essas fontes de energias fósseis. Os combustíveis fósseis são constituídos principalmente de hidrocarbonetos – carbono e hidrogênio – além de outros compostos como o enxofre, nitrogênio, oxigênio e outros metais.

3.1.2 Poluentes oriundos das queimadas

Os biomas amazônicos e o cerrado brasileiro têm sido vítimas de inúmeros incêndios para dar lugar às áreas de plantação, principalmente da soja e criação de animais para o abate. O uso do fogo para a limpeza dessas áreas se dá por ser de baixo valor econômico, porém traz inúmeros riscos à saúde humana e ao meio ambiente. A queima desses biomas que são de extrema importância para o Brasil, acaba por lançar inúmeros poluentes na atmosfera, como o dióxido de carbono (CO_2), o gás que mais contribui com o efeito estufa, metano (CH_4), monóxido de carbono (CO), óxido nitroso (NO) e os materiais particulados, resultantes da queima da Amazônia e do cerrado (Fearnside, 2002).

3.2 Impactos ambientais dos gases e partículas poluentes

Em decorrência do uso em larga escala dos combustíveis fósseis, desde o período da revolução industrial, foram lançadas milhões de milhares de partículas e de gases poluentes, em que foram aceleradas as transformações atmosféricas, acentuando o efeito estufa, e conseqüentemente, afetou a saúde

da população com a piora dos índices de qualidade do ar. É importante lembrar que os combustíveis fósseis possuem em sua composição moléculas de carbono, hidrogênio, enxofre, nitrogênio e oxigênio.

Essas partículas, quando lançadas na atmosfera após o processo de combustão, induzem reações químicas, transformando esses gases em outras substâncias poluentes, com potencial de interferir no planeta e na saúde da população. As partículas de fuligem, decorrentes das queimadas, o dióxido e o trióxido de enxofre, o metano, os óxidos de nitrogênio, dentre outros, geram inúmeros impactos ambientais ao planeta (Fearnside, 2002).

3.3 Impactos sociais e econômicos da poluição atmosférica

A exposição a poluentes atmosféricos, como material particulado, dióxido de nitrogênio, e ozônio, está diretamente associada a uma série de problemas de saúde pública, incluindo doenças respiratórias, cardiovasculares e câncer. Essas condições de saúde reduzem a expectativa de vida e a qualidade de vida, especialmente em grupos vulneráveis, como crianças, idosos e pessoas com doenças crônicas. Além disso, a poluição do ar é agravada pelas desigualdades sociais, pois comunidades de baixa renda frequentemente vivem em áreas mais poluídas, com menos acesso a serviços de saúde (Nunes, 2023).

A longo prazo, a poluição atmosférica pode levar à deterioração da qualidade de vida nas cidades, afetando o turismo, o valor das propriedades e a atratividade de áreas urbanas para investimentos. Além disso, políticas para mitigar a poluição, embora necessárias, podem demandar investimentos elevados em tecnologias limpas e na transição para energias renováveis, o que pode gerar desafios econômicos, especialmente para países em desenvolvimento (Nunes, 2023).

Os custos econômicos da poluição atmosférica são vastos e incluem despesas médicas diretas, perda de produtividade devido a doenças e dias de trabalho perdidos, além de impactos no setor agrícola e nos recursos naturais. Por exemplo, a poluição pode danificar colheitas e florestas, resultando em perdas econômicas para agricultores e comunidades rurais. Governos também enfrentam custos crescentes com o tratamento de doenças relacionadas à

poluição, o que pressiona os sistemas de saúde pública e redireciona recursos que poderiam ser utilizados em outras áreas essenciais. Somente em São Paulo, a mortalidade e a morbidade geradas pela poluição do ar geram um custo econômico de até US\$208 milhões ao ano (Felin, 2018).

3.4 Ações globais para o gerenciamento da poluição atmosférica

O Brasil, por ser um país membro da Organização das Nações Unidas, é signatário de inúmeros acordos que tem por objetivo manter a cooperação internacional entre os países. Com o passar dos anos, as pesquisas científicas indicavam que o mundo precisava de uma maior integração, que tivesse como objetivo a redução da poluição atmosférica e que se buscasse alternativas que minimizassem os impactos, que foram causados pela emissão de gases poluentes. Com isso, em 1972, em Estocolmo, na Suécia, ocorreu a primeira conferência em que foram debatidas as transformações que o homem causou no meio ambiente.

A preocupação com o clima e o aquecimento global só aumentava e, em 1992, no Rio de Janeiro, foi realizada a Cúpula da Terra, um evento internacional que teve como ponto central as mudanças climáticas, ficou conhecido como a ECO-92 que teve como resultado a criação da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima. Ela ficou conhecida como o primeiro acordo que visava a redução de poluentes atmosféricos, onde foi levado em consideração a realidade socioeconômica de cada país signatário da ONU.

Com o avanço das pesquisas científicas sobre as mudanças climáticas, foi descoberto que a origem do buraco da Camada de Ozônio estava ligada ao lançamento de compostos como os clorofluorcarbonos (CFC) e os hidroclorofluorcarbono (HCFC). Tendo como base o efeito danoso desses compostos na camada de ozônio, em 1989, em Montreal, no Canadá, ocorreu a assinatura do Tratado de Montreal, que contou com o apoio de 197 países. Esse tratado tinha como objetivo proteger a camada de ozônio, através da eliminação das substâncias que são responsáveis pela destruição como o CFC e o HCFC.

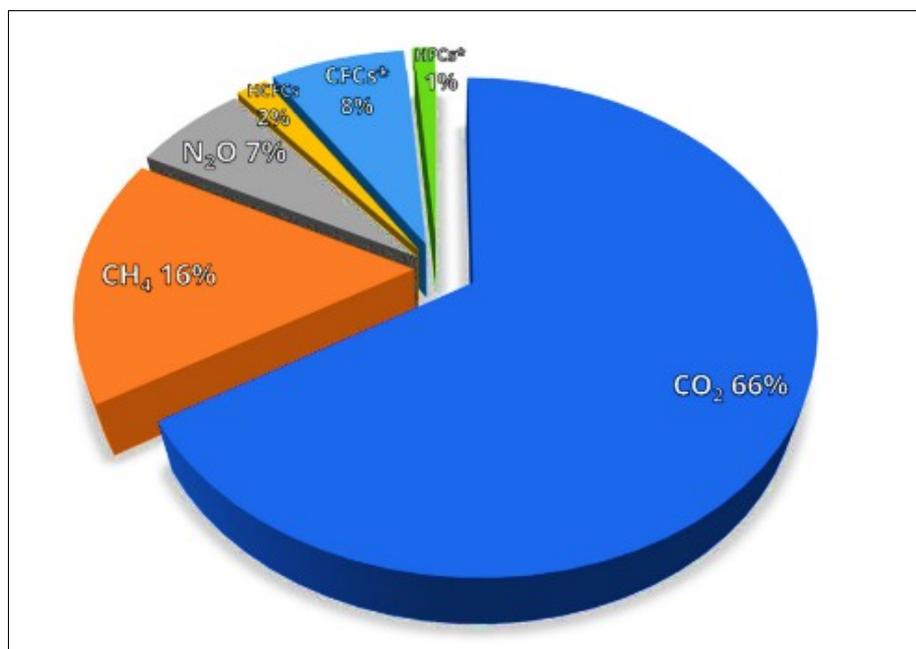
Em 1996, em Kyoto, ocorreu outra conferência sobre o clima, em que a Conferência das Partes (COP) promoveu um dos principais acordos climáticos

existentes. O Protocolo de Kyoto foi um tratado que impôs metas a todos os países desenvolvidos, emergentes e subdesenvolvidos, a redução da emissão de gases do efeito estufa, dentre eles o dióxido de carbono que é o principal gás que causa o efeito estufa. O mais recente acordo climático é o de Paris, assinado em 2015, que tem como objetivo manter o aumento da temperatura em até 2°C acima dos níveis pré-industriais e limitar o aumento da temperatura em 1,5°C acima dos níveis pré-industriais. De acordo com a ONU serão necessários investimentos de mais de 100 bilhões de dólares por ano. Esse investimento deverá ser realizado em medidas de combate as mudanças climáticas, bem como o desenvolvimento em novas tecnologias, produção de bioenergia, reflorestamento e energias renováveis. Tendo o Brasil se comprometido a reduzir os níveis de gases do efeito estufa em 37%, assim, essa redução ficaria abaixo dos níveis de lançamentos desses gases do ano de 2005. Será um enorme desafio, pois o Brasil apresenta índices de crescimento populacional e da economia, onde terá que equilibrar esse crescimento com a redução da emissão dos gases poluentes.

3.5 Evidências do acúmulo de partículas e gases poluentes na atmosfera

Segundo a autora Lygia Terra, a atmosfera terrestre, possui em sua composição química, inúmeros gases e vapor de água. A constituição da atmosfera compreende os seguintes gases: nitrogênio 78%, oxigênio 21% e outros gases. Dentre eles os gases que são responsáveis pelas mudanças climáticas, como o dióxido de carbono, o metano, ozônio, hélio, cfc's e os óxidos nítricos (Figura 1).

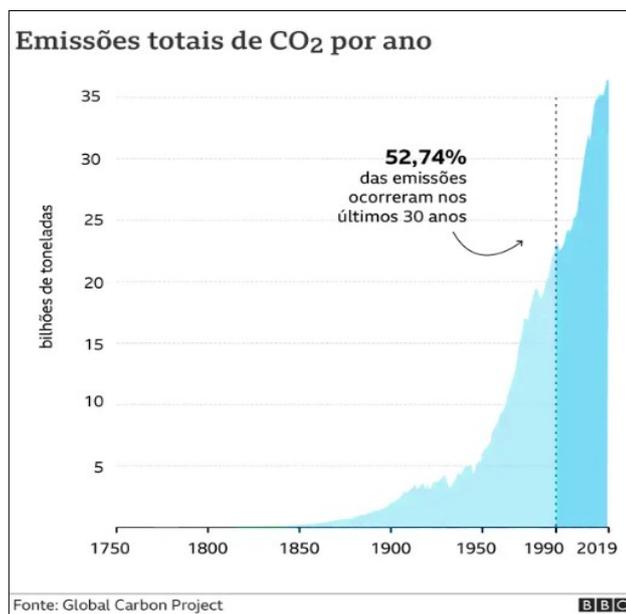
Figura 1: Contribuições dos gases estufa mais importantes desde a era pré-industrial até 2020



Fonte: WMO Greenhouse Gas Bulletin No. 17

É importante analisar que o dióxido de carbono é um gás proveniente do processo de respiração dos animais, porém com o início da revolução industrial as emissões de CO₂ aumentaram de forma significativa, onde nos últimos 30 anos houve um crescimento de 52,74%, conforme o gráfico da figura abaixo (Figura 2). Isso porque o CO₂ consegue absorver toda a radiação que o sol emite e depois libera essa radiação para a terra, promovendo o aquecimento do planeta.

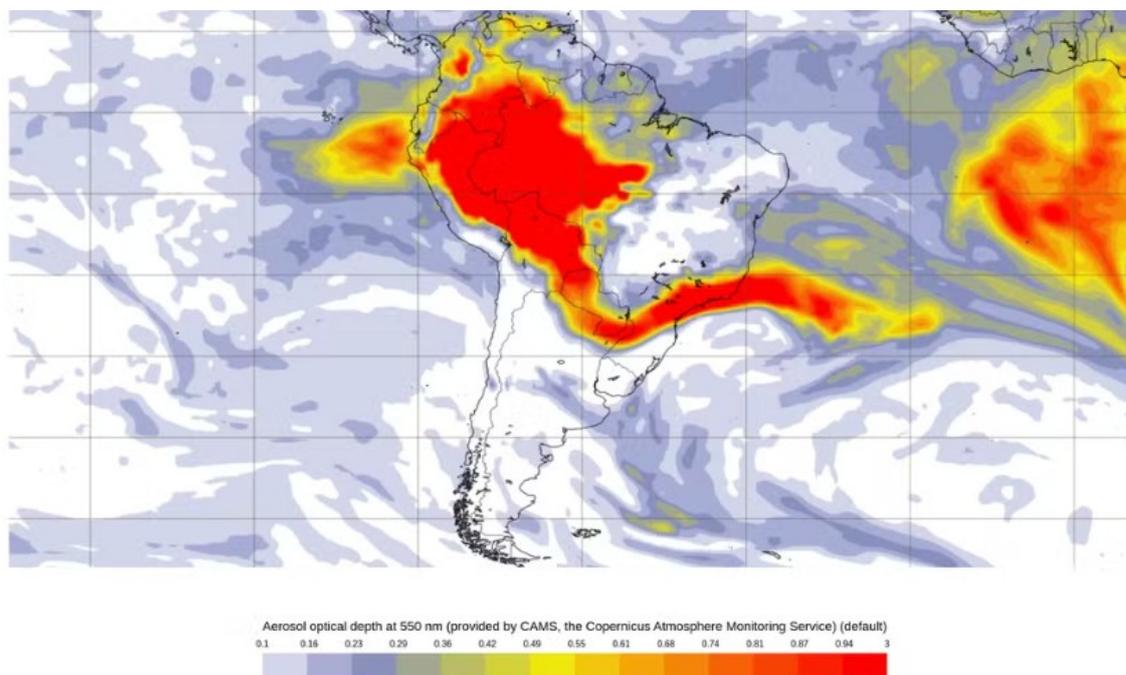
Figura 2 Emissões totais de CO₂ no mundo desde o início da revolução industrial



Fonte: Global Carbon Project - British Broadcasting Corporation

Segundo o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, o Brasil, em agosto 2024, registrou aproximadamente 69 mil focos de queimadas, um crescimento de 144% em relação ao mesmo período de 2023. Toda essa fumaça, que vem, principalmente da região amazônica e do cerrado, com o auxílio dos ventos se espalha pelo país, conforme projeção abaixo. Essa fumaça, resultado da queima da floresta amazônica e do bioma cerrado, espalha os materiais particulados e os gases resultantes do processo de combustão. Os incêndios de agosto de 2024 fizeram com que o ar atmosférico carregasse inúmeros materiais particulados. Segundo o Serviço de Monitoramento da Atmosfera do Copernicus (2024), esse valor chegou a 550µg/m³ de concentração de material particulado (MP em µg/m³) enquanto o recomendado pela OMS é de 2,5 MP (Figura 3).

Figura 3 Quantidade de partículas de poluição no ar medida a 550 nm nesta terça-feira (03/09/2024) às 0h (horário de Brasília),



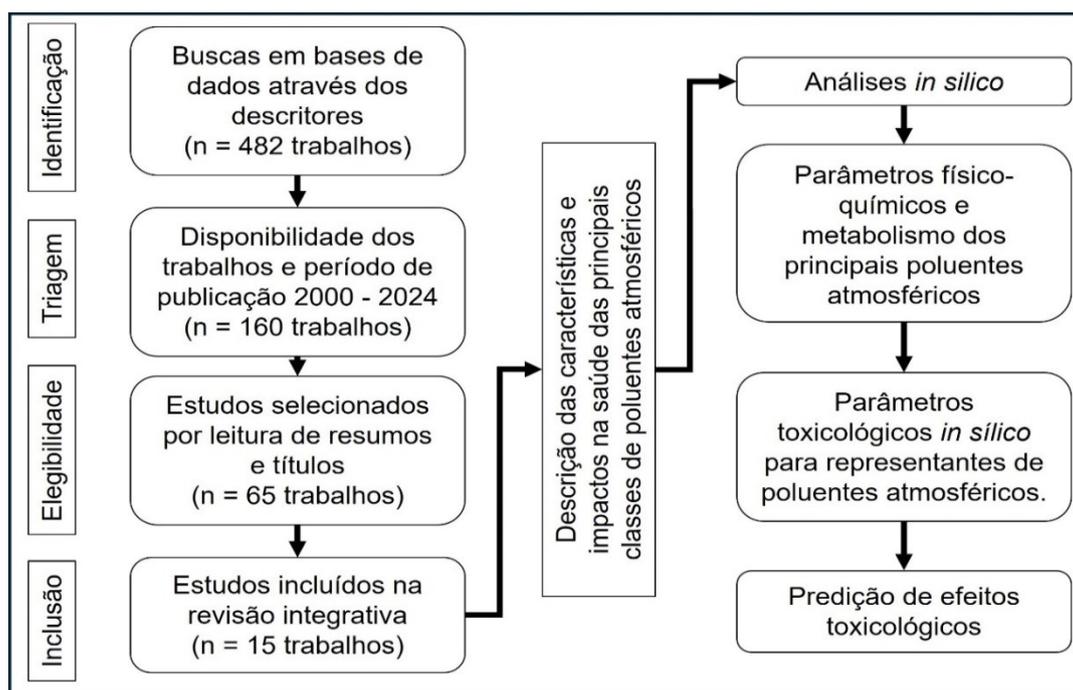
Fonte: Serviço de Monitoramento da Atmosfera do Copernicus

4 METODOLOGIA

4.1 Revisão integrativa

Todas as etapas seguidas no desenvolvimento desta pesquisa estão sumarizadas no fluxograma apresentado no fluxograma 01. Foram utilizadas como palavras-chave, para busca bibliográfica da revisão integrativa, os termos combinados “atmospheric pollution x impact on health x socioeconomic impact”. Para realização desta investigação foram utilizados como base produções textuais de história, geografia, biologia e outras referências relacionados ao tema previamente definido. Foram utilizadas três diferentes bases de buscas acadêmicas.

Fluxograma 01: Etapas seguidas na metodologia.



Fonte: Autoria própria, 2024.

A primeira base utilizada foi a *Scientific Electronic Library Online* - SciELO (<https://www.scielo.br>), a qual é uma biblioteca eletrônica que abrange uma coleção selecionada de periódicos científicos iberoamericanos. A SciELO

é o resultado de um projeto de pesquisa da FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, em parceria com a BIREME - Centro Latino-Americano e do Caribe de Informação em Ciências da Saúde. A partir de 2002, o Projeto conta com o apoio do CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. Com o avanço das atividades do projeto, novos títulos de periódicos são continuamente incorporados à coleção da biblioteca (informações cedidas pela própria base de dados).

A segunda base de dados utilizada foi a Science Direct® (<https://sciencedirect.com>), pertencente a Elsevier. É considerada uma das plataformas mais completas no que se diz respeito a publicações e periódicos com um acervo de mais de 1,4 milhões de artigos disponíveis ao público nas áreas acadêmico, médica e industrial (informações cedidas pela própria base de dados).

A terceira base de dados utilizada foi a Google Acadêmico (<https://scholar.google.com.br/schhp?hl=pt-PT>). O Google Acadêmico oferece uma maneira simples de pesquisar amplamente literatura acadêmica. Em um só lugar, é possível pesquisar sobre diversas disciplinas e fontes: artigos, teses, livros, resumos e pareceres judiciais, de editoras acadêmicas, sociedades profissionais, repositórios on-line, universidades e outros sites (informações cedidas pela própria base de dados).

Além das bases citadas, utilizou-se fontes da Organização Mundial da Saúde (OMS), Organização das Nações Unidas (ONU), Ministério da Saúde (MS), Instituto Nacional do Câncer (INCA), Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e o Conselho Nacional do Meio Ambiente que forneceram as informações estatísticas sobre os efeitos da poluição atmosférica e os impactos na saúde dos indivíduos, bem como os dados sobre a qualidade do ar no Brasil e a quantidade de gases poluentes lançados na atmosfera. Todos os resultados obtidos nas plataformas de busca foram verificados para realização de triagem de material relevante para a pesquisa

A janela de tempo de busca foi de 2000 a 2024, como critérios de exclusão foram adotados os seguintes: exclusão de artigos duplicados e artigos com fuga do tema. Para a extração dos dados foram considerados: ano de publicação, artigos em inglês e português, abordagem ao tema, os artigos que

faziam referência a mais de um poluente, se a pesquisa abordava os impactos a saúde e socioeconômicos.

4.2 Análises *in silico*

4.2.1. Estrutura dos compostos identificados para processamento *in silico*

As informações da estrutura de referência SMILES (Simplified Molecular-Input Line-Entry System) ou InChi (International Chemical Identifier) foram obtidas da base de dados pública PubChem (<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov>). O nome e o código de referência de cada composto químico identificado estão dispostos na tabela 1. O software ACD labs ChemsSketch (Toronto, On, Canada), versão 14.0 foi usado para desenhar todas as estruturas.

4.2.2 Parâmetros ADME/T

Os compostos selecionados foram avaliados, *in silico*, quanto aos parâmetros de Absorção, Distribuição, Metabolismo, Excreção e Toxicidade (ADME/T). As informações foram obtidas pela plataforma PubChem e por um conjunto de plataformas sugeridas pela metodologia abordada por Barbosa e colaboradores (2020), a saber: Swiss ADME, (SIB., Lausanne, Suíça) Servidor PROTOX-II (Charité University, Berlim, Alemanha), Molinspiration (Molinspiration Cheminformatics, Nova Ulica, Eslováquia), Osiris Property Explorer e Osiris Data Warrior (Actelion Pharmaceuticals Ltd., Allschwil, Suíça).

4.2.3 Predição de toxicidade *in silico*

O software online PASS (*Prediction of Activity Spectra for Substances*) foi empregado para estimar os prováveis perfis de atividade biológica para os compostos. A previsão do PASS foi baseada no princípio QSAR (*Quantitative*

structure–activity relationship) sobre as relações estrutura-atividade para mais de 313.000 compostos com atividades biológicas conhecidas. A precisão média da previsão estimada no procedimento de validação cruzada *leave-one-out* para todo o conjunto de treinamento PASS é de cerca de 95% (Alsaraf *et al.*, 2020; Nath *et al.*, 2014).

Então, foi realizada uma varredura de atividades biológicas e toxicológicas possíveis. Baseado nas estruturas dos compostos e na correlação estrutura-atividade, foi gerado um valor de p_a (Potencial de ser ativo) e p_i (potencial de ser inativo). Seguindo orientações da própria plataforma foram elencados, para cada atividade, resultados com $p_a - p_i > 0.5$ e, em casos em que ocorreram um número muito elevado de resultados que se enquadram dentro desse parâmetro, foram elencados os 10 resultados com maiores valores da relação $p_a - p_i$.

4.3 Análise de dados

As tabelas foram feitas utilizando o software Microsoft Excel 2010 e Microsoft Word 2010, que pertencem ao pacote Microsoft Office 2010.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os textos obtidos por meio da pesquisa avançada passaram por uma análise criteriosa, na qual cada registro foi examinado em relação à sua relevância e adequação ao tema. Após essa triagem inicial, foram selecionados os artigos que atendiam aos critérios de inclusão definidos (como descrito na metodologia), garantindo que apenas aqueles com maior pertinência e qualidade científica fossem considerados para a análise detalhada subsequente. Esse processo seletivo visou otimizar a qualidade das fontes e assegurar que os dados utilizados fossem confiáveis e diretamente relacionados ao foco da pesquisa., conforme ilustrado no quadro 01.

Quadro 01: Artigos selecionados após aplicação dos critérios de seleção

Título	Objetivo	Autor
Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review	Destacar o impacto da poluição do ar na saúde pública e no clima, apontando os principais poluentes e seus efeitos, e defendendo a conscientização pública e ações multidisciplinares para enfrentar o problema.	Manisalidis <i>et al.</i> , 2020
WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide	Demonstrar como a poluição do ar continua a impactar gravemente a saúde, causando milhões de mortes anualmente, e destacar a necessidade de uma resposta global ampliada para enfrentar esse risco à saúde, agora reconhecido em nível comparável a outros fatores como dietas inadequadas e o tabagismo.	WHO, 2021
Gaseous air pollutants: a review on current and future trends of emissions and impact on agriculture	Revisar as tendências atuais e futuras das emissões de poluentes gasosos na Índia e seu impacto no desempenho das culturas agrícolas, destacando os efeitos adversos dos poluentes atmosféricos sobre os processos bioquímicos e fisiológicos das plantas.	Rai <i>et al.</i> , 2011
Fresh air in the 21st century?	Analisar as tendências futuras do aumento do ozônio troposférico e seus impactos na qualidade do ar, destacando como o crescimento desse poluente pode comprometer as estratégias atuais de controle de poluição, especialmente na região do	Prather <i>et al.</i> , 2003

	hemisfério norte.	
Human health effects of polycyclic aromatic hydrocarbons as ambient air pollutants - Report of the Working Group on Polycyclic Aromatic Hydrocarbons of the Joint Task Force on the Health Aspects of Air Pollution	Analisar os impactos dos hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAHs) na saúde humana, destacando sua associação com o aumento da incidência de câncer e outras doenças, e explorar a necessidade de revisões nas diretrizes atuais de exposição para proteger contra efeitos além do câncer.	WHO, 2021b
WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants	Apresentar diretrizes da OMS para proteger a saúde pública dos riscos associados a substâncias químicas comuns no ar interno, fornecendo uma base científica para a criação de normas legais que visem reduzir a exposição a esses poluentes.	WHO, 2010
Australian chlorofluorocarbon (CFC) emissions: 1960–2017	Estimar as emissões de CFCs na Austrália e avaliar sua contribuição para a destruição da camada de ozônio e a redução das emissões de gases de efeito estufa.	Fraser <i>et al.</i> , 2020
Guideline for clinical management of exposure to lead	Guia para orientar os médicos no diagnóstico e tratamento da exposição ao chumbo, tanto em pacientes individuais quanto em casos de envenenamento em massa, com recomendações sobre interpretação de concentrações de chumbo no sangue, descontaminação gastrointestinal, uso de agentes quelantes e suplementos nutricionais.	WHO, 2021c
Oxidative Stress in Ozone-Induced Chronic Lung Inflammation and Emphysema: A Facet of Chronic Obstructive Pulmonary Disease	Revisar os mecanismos da doença pulmonar induzida pelo ozônio, com foco nas vias que causam lesões crônicas nas células epiteliais respiratórias, destruição alveolar e inflamação, além de explorar novos alvos terapêuticos para doenças crônicas das vias aéreas relacionadas ao estresse oxidativo.	Wiegman <i>et al.</i> , 2020
Ozone exposure and cardiovascular disease: A narrative review of epidemiology evidence and	Revisar as evidências epidemiológicas, a suscetibilidade e os mecanismos biológicos que ligam a exposição ao ozônio (O ₃) ao risco de doenças cardiovasculares, destacando a necessidade de mais pesquisas para	Hua <i>et al.</i> , 2024

underlying mechanisms	consolidar essa relação causal.	
Air pollutants, oxidative stress and human health	Revisar o conhecimento atual sobre os problemas de saúde associados a diversos poluentes atmosféricos e sua relação com a promoção de doenças crônicas, por meio de alterações no estresse oxidativo e modulação da expressão gênica, visando orientar estratégias de prevenção e tratamento na saúde pública.	Yang & Omaye, 2009
Effects of air pollution on the nervous system and its possible role in neurodevelopmental and neurodegenerative disorders	Revisar as evidências recentes que indicam que a poluição do ar, além de causar doenças respiratórias e cardiovasculares, também pode afetar negativamente o sistema nervoso central, contribuindo para doenças neurodegenerativas e neurodesenvolvimentais, como o autismo, Alzheimer e Parkinson.	Costa <i>et al.</i> , 2020
Air Pollution-Related Neurotoxicity Across the Life Span	Examinar como a poluição do ar, uma mistura complexa de gases e partículas contaminadas, está associada a diversos transtornos neurodesenvolvimentais e doenças neurodegenerativas, e destacar a importância de futuras pesquisas para identificar os contaminantes responsáveis e entender os mecanismos dessas condições para proteger a saúde pública.	Cory-Slechta <i>et al.</i> , 2023
Hematological Profiles of Benzene-Induced Rats Treated with Ethanolic Extract of Syzygium Polyanthum	Investigar o efeito do extrato etanólico de <i>Syzygium polyanthum</i> na prevenção da anemia aplásica induzida por benzeno em ratos, comparando com grupos tratados com vitamina C e analisando a eficácia do extrato em melhorar os níveis de células sanguíneas e cálcio.	Komaria <i>et al.</i> , 2021
Investigation of some effective factors on urinary metabolites in biological monitoring of benzene, toluene, and xylene compounds	Identificar os fatores que afetam o monitoramento biológico dos metabólitos de benzeno, tolueno e xileno (BTX) em trabalhadores expostos ocupacionalmente, comparando os biomarcadores de exposição entre os grupos expostos e não expostos.	Taheril <i>et al.</i> , 2022

FONTE: Aatoria Própria, 2024

5.1 Perfil de composição dos gases e partículas poluentes

A classificação dos poluentes do ar é baseada principalmente nas fontes que produzem a poluição. As fontes principais incluem a grande maioria das ações antrópicas, como a emissão de poluentes de usinas de energia, refinarias e petroquímicas, indústrias químicas e de fertilizantes, plantas metalúrgicas e outras plantas industriais e a queima de combustíveis fósseis. As fontes de área interna incluem atividades domésticas de limpeza, lavanderias a seco, gráficas e postos de gasolina. As fontes móveis incluem automóveis, carros, ferrovias, aeronaves e outros tipos de veículos. Por fim, as fontes naturais incluem incêndios florestais, erupções vulcânicas, tempestades de poeira e queima agrícola (Manisalidis *et al.*, 2020).

A Organização Mundial da Saúde (OMS; 2024) relata seis principais poluentes do ar que possuem fortes evidências de impactos sobre a saúde pública, a saber: poluição por material particulado (PM), ozônio (O_3) ao nível do solo, monóxido de carbono (CO), óxidos de enxofre (SO_2 , SO_3) e óxidos de nitrogênio (NO, NO_2). Além destes, vale citar os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, incluindo os compostos orgânicos voláteis, e o chumbo. A poluição do ar pode ter um efeito desastroso em todos os componentes do meio ambiente, incluindo água subterrânea, solo e ar. Utilizando de dados obtidos como descrito da seção 4.2 a estrutura e algumas das características físico-químicas de representantes das classes citadas podem ser encontradas na tabela 1.

Pode-se destacar que a maioria se apresenta na forma gasosa, sendo estes classificados como gases oxidantes, asfixiantes ou corrosivos. O peso molecular se mostrou relativamente baixo para todos os compostos, o que condiz com a capacidade de dispersão pelo ar. Praticamente todos apresentaram predição de capacidade de permeabilidade em contato com a pele, absorção pelo trato respiratório/digestório e são metabolizados através do complexo CYP.

Tabela 1: Parâmetros físico-químicos e metabolismo de alguns poluentes atmosféricos

Parâmetros	Ozônio	Monóxido de carbono	Dióxido de enxofre	Dióxido de nitrogênio	Benzeno	Benzopireno	Formaldeído	Chumbo
Estrutura								[Pb]
Classe química	Gás - oxidante	Gás - asfixiante	Gás - corrosivo	Gás	Solvente aromático	Hidrocarboneto aromático	Aldeído	Metal
Fórmula molecular	O ₃	CO	SO ₂	NO ₂	C ₆ H ₆	C ₂₀ H ₁₂	CH ₂ O	Pb
Peso molecular (g/Mol)	48,00	28,00	64,07	46,00	78,11	252,30	30,03	207,00
Densidade (g/L)	2,14	1,14	2,619	1,88	876	1240	0,815	11340
Área de superfície polar (Å²) topológica	51,21	0	66,23	52,49	0	0	17,07	0
Ponto de fusão (°C)	-192,7	-205,02	-75,5	-9,3	5,558	179	-92	327,4
Ponto de ebulição (°C)	-119,9	-191	-10	21,15	80,08	495	-19	1740
Solubilidade em água	1,1 g/L	1.03e+01 mg/mL	1.07X10+5 mg/L	sofre hidrólise	1.79X10+3 mg/L	0.2 to 6.2 µg/L	4.00X10+5 mg/L	insolúvel
lipofilicidade (Clog P_{o/w})	ND	-0,31	-0,31	-0,31	2,14	5,33	0,08	0,08
Permeabilidade na pele (Log Kp)	ND	-6	-6	-6	-5,26	-3,6	-5,6	-5,6
Absorção	Trato respiratório	Trato respiratório/ digestório	Trato respiratório/ digestório	Trato respiratório / digestório				
Metabolismo	CYP2C9	CYP2C9	CYP2C9	CYP2C9	CYP2C9	CYP1A2; CYP2C19; CYP2C9	CYP2C9	CYP2C9

Fonte: Autor, 2024

O chamado **Material Particulado** (MP) refere-se a partículas inaláveis compostas por sulfatos, nitratos, amônia, cloreto de sódio, carbono negro, partículas biológicas, poeira mineral ou água. O MP pode ter tamanhos diferentes, sendo PM_{2.5} e PM₁₀, os mais comuns nas regulamentações e relevantes para a saúde. As maiores partículas, chamadas partículas grossas (com diâmetro entre 2,5 µm e 10 µm), consistem principalmente em pólen, micro gotículas marinhas e poeira transportada pelo vento de erosão, áreas agrícolas, estradas e operações de mineração. As partículas mais finas (PM_{2.5}) podem ser derivadas de fontes primárias, como a combustão de combustíveis em usinas de energia, indústrias ou veículos, ou de fontes secundárias, como reações químicas entre gases. A maior fonte de material particulado em residências é geralmente a queima de combustíveis poluentes em lareiras abertas ou fogões e aquecedores ineficientes e mal ventilados. Além de atividades domésticas como cozinhar, aquecer ambientes e iluminar. No ambiente externo, as principais fontes variam conforme a localização, mas geralmente incluem tráfego e transporte, atividades industriais, usinas de energia, canteiros de obras, queima de resíduos, incêndios ou campos (Manisalidis *et al.*, 2020; WHO, 2021).

O **ozônio** é um gás formado a partir do oxigênio sob descarga elétrica de alta voltagem e é um forte oxidante. Ele se forma na estratosfera, mas também pode surgir na troposfera. O ozônio ao nível do solo é um dos principais componentes da poluição atmosférica e é gerado através de uma reação fotoquímica entre óxidos de nitrogênio (Nox) e compostos orgânicos voláteis (VOCs) emitidos de fontes naturais e/ou atividades antropogênicas, emitidos por veículos e indústrias. Devido à sua natureza fotoquímica, os níveis mais altos de ozônio são observados durante os períodos de clima ensolarado. Além disso, o ozônio pode ser gerado por equipamentos domésticos, como purificadores de ar portáteis (Rai *et al.*, 2011; WHO, 2021).

As crescentes emissões de hidrocarbonetos reativos e NO₂ nas áreas urbanas aumentaram significativamente as concentrações de ozônio ao nível do solo. Altos níveis de ozônio podem ser encontrados a centenas ou milhares de quilômetros de distância das fontes originais, frequentemente afetando áreas rurais remotas (Prather *et al.*, 2003). O problema do aumento do ozônio troposférico tem se ampliado como resultado do aumento da densidade

populacional e das atividades relacionadas ao transporte, especialmente nos países em desenvolvimento (Rai *et al.*, 2011; WHO, 2021).

O **monóxido de carbono** (CO) é um gás incolor e inodoro, produzido pela combustão incompleta de combustíveis carbonáceos, como madeira, gasolina, carvão, gás natural e querosene em fogões simples, fogueiras, lâmpadas de pavio, fornos e lareiras. A principal fonte de monóxido de carbono (CO) no ar ambiente é dos veículos automotores. Este gás também é liberado na queima de combustíveis fósseis, por equipamentos domésticos destinados ao aquecimento da água, bem como por processos industriais (Manisalidis *et al.*, 2020; WHO, 2021).

O monóxido de carbono se mistura livremente com o ar em qualquer proporção e se move com o ar através do transporte em massa. É um gás combustível, podendo servir como fonte de energia e formar misturas explosivas com o ar, onde reage vigorosamente com oxigênio, acetileno, cloro, flúor e óxido nitroso. O monóxido de carbono não é detectável pelos humanos por visão, paladar ou olfato. É apenas ligeiramente solúvel em água, soro sanguíneo e plasma (Manisalidis *et al.*, 2020; WHO, 2021).

Os **óxidos de enxofre** (SO₂ e SO₃) são derivados da queima de combustíveis fósseis, da decomposição da matéria orgânica, das erupções vulcânicas, da queima do carvão e de processos industriais, como a fabricação de fertilizantes. Podem dar origem a fenômenos como a chuva ácida. O dióxido de enxofre é um gás incolor que é prontamente solúvel em água. O ácido sulfúrico é um ácido forte formado a partir da reação do trióxido de enxofre (SO₃) com a água.

Como material puro, é um líquido incolor com ponto de ebulição de 330 °C. O dióxido de enxofre e as partículas derivadas da queima de combustíveis fósseis têm sido os principais componentes da poluição do ar em muitas partes do mundo. Os problemas mais graves têm sido experimentados em grandes áreas urbanas onde o carvão tem sido usado para aquecimento doméstico ou para a combustão mal controlada em instalações industriais (Manisalidis *et al.*, 2020; Rai *et al.*, 2011; WHO, 2021).

Os **óxidos de nitrogênio** (NO_x), em particular o dióxido de nitrogênio (NO₂), são gases altamente reativos formados no ar ambiente através da oxidação do monóxido de nitrogênio (NO). Os óxidos de nitrogênio ocorrem

naturalmente na atmosfera e como resultado de atividades humanas, sendo formados principalmente pela queima de combustíveis fósseis. Essa formação resulta de uma reação química entre o N_2 e o O_2 atmosféricos na presença de calor, formando NO, que depois reage novamente com O_2 para formar NO_2 .

A taxa de reação é determinada pela temperatura da combustão. Assim, ao contrário do SO_2 , o NO_2 não é um componente do combustível fóssil, mas resulta de uma reação catalítica do calor com o N_2 e o O_2 atmosféricos durante o processo de combustão. As emissões antropogênicas de NOx são responsáveis pela maioria dos aportes de nitrogênio no ambiente. As principais fontes dessas emissões são os automóveis e as usinas de energia, bem como a fumaça de usinas e cigarros (Manisalidis *et al.*, 2020; Rai *et al.*, 2011; WHO, 2021).

O dióxido de nitrogênio é um gás de coloração marrom-avermelhada com um odor pungente característico. O monóxido de nitrogênio produz espontaneamente o dióxido quando exposto ao ar. O gás dióxido de nitrogênio é um forte oxidante e reage com a água para produzir ácido nítrico e monóxido de nitrogênio, assim como desempenha um papel importante na determinação das concentrações de ozônio na troposfera, pois a fotólise do dióxido de nitrogênio é o único iniciador chave da formação fotoquímica do ozônio, tanto em atmosferas poluídas quanto não poluídas.

O dióxido de nitrogênio está sujeito a extensas transformações atmosféricas que levam à formação de fortes oxidantes que participam da conversão do dióxido de nitrogênio em ácido nítrico e do dióxido de enxofre em ácido sulfúrico e suas subseqüentes conversões para seus sais de neutralização de amônio. Assim, através da seqüência de reações fotoquímicas iniciadas pela ativação do dióxido de nitrogênio, induzida pela radiação solar, os poluentes recém-gerados são uma importante fonte de partículas orgânicas, nitrato e sulfato atualmente medidas como MP10 ou MP2.5. Por essas razões, o dióxido de nitrogênio é um precursor chave de uma gama de poluentes secundários (Manisalidis *et al.*, 2020; Rai *et al.*, 2011; WHO, 2021).

Os **hidrocarbonetos policíclicos aromáticos** (HPA) estão presentes na atmosfera em forma particulada. Eles são um grupo de compostos químicos formados principalmente pela combustão incompleta de matéria orgânica, e de

combustíveis fósseis, motores a diesel e fogões a lenha. Também são emitidos pela fumaça do tabaco, em incêndios florestais e atividade vulcânica. Os HPA são um grupo grande de compostos orgânicos que contêm dois ou mais anéis aromáticos fundidos (benzeno), como por exemplo o benzopireno. Os HPA são um conjunto importante de poluentes do ar tanto em ambientes internos quanto externos. Os HPA que contêm cinco ou mais anéis aromáticos são encontrados principalmente ligados a material particulado (MP), enquanto os HPA que contêm até quatro anéis aromáticos são encontrados predominantemente na fase gasosa. No entanto, devido aos níveis consideravelmente mais altos de HPA de baixo peso molecular no ar ambiente, os HPA de três e quatro anéis também tendem a se ligar ao MP. Os HPA presentes no ar ambiente na fase gasosa geralmente têm durações de menos de um dia, enquanto os HPA associados a partículas podem persistir por semanas e sofrer transporte atmosférico de longa distância (Manisalidis *et al.*, 2020; WHO, 2021).

Os **Compostos Orgânicos Voláteis** (VOCs), como tolueno, benzeno, etilbenzeno e xileno, têm suas concentrações aumentadas devido ao uso em uma diversidade de produtos e materiais. Dois dos mais representativos, principalmente em ambientes fechados são os benzenos e o formaldeído (Manisalidis *et al.*, 2020; WHO, 2021).

O benzeno é um composto aromático com um anel de seis membros insaturados. É um líquido claro, incolor, altamente inflamável e com odor característico. Na atmosfera, o benzeno existe predominantemente na fase de vapor, com tempos de residência variando de um dia a duas semanas. A degradação do benzeno é principalmente através da reação com radicais hidroxila. Pode originar-se de fontes externas, como o trânsito e estações de gasolina, e de fontes internas, como materiais de construção, móveis, garagens, sistemas de aquecimento, cozinha, solventes armazenados e diversas atividades humanas. As concentrações internas também são influenciadas pelas condições climáticas e pela taxa de troca de ar. Novos edifícios ou ambientes recentemente decorados frequentemente apresentam concentrações elevadas de benzeno, que tendem a decair ao longo do tempo (WHO, 2010).

O formaldeído é um gás incolor com cheiro pungente, inflamável e altamente reativo à temperatura ambiente. É um dos compostos orgânicos

voláteis mais comuns encontrados em ambientes internos, emitido por materiais de construção (como aglomerado, madeira compensada, colas e tintas) e produtos de cuidado pessoal e doméstico (como cortinas, carpetes e produtos de limpeza). Processos de combustão, como fumar, aquecer, cozinhar ou queimar velas e incensos, também são fontes de formaldeído interno. Ele também é liberado na atmosfera através da combustão de biomassa, como incêndios florestais e vulcões. A formação secundária de formaldeído no ar ocorre através da oxidação de VOCs e reações entre ozônio e alcenos, como os terpenos (WHO, 2010)

Os **clorofluorocarbonos** (CFCs) são halocarbonos amplamente utilizados em muitos campos, incluindo aparelhos de ar-condicionado, refrigeração e expansão de espumas, propelentes de aerossóis, entre outros. Estes compostos são capazes de liberar átomos de cloro livres na estratosfera, causando a degradação da camada de ozônio, e foram listados no Protocolo de Montreal como alvos para serem eliminados gradualmente. Reconhecidas como substâncias destruidoras de ozônio, os CFCs foram eliminados globalmente antes de 2010, exceto para alguns usos essenciais no setor de saúde. No entanto, pesquisas recentes sugeriram que os "bancos" de alguns CFCs foram subestimados em nível global. Como suas emissões persistem ao longo de toda a vida útil dos produtos relacionados, suas concentrações atmosféricas ainda serão abundantes por algum tempo (YI *et al.*, 2010). As emissões globais dos principais CFCs – CFC-12 (CCl₂F₂), CFC-113 (CCl₂FCClF₂) e CFC-11 (CCl₃F) – não diminuíram tão rapidamente quanto esperado sobre produção e consumo. Se as emissões globais de CFCs continuarem, isso poderá atrasar a recuperação da depleção de ozônio em latitudes médias e na Antártica em aproximadamente 7 e 20 anos, respectivamente (Fraser *et al.*, 2020).

O **chumbo** (Pb) e compostos particulados de chumbo podem ser encontrados na atmosfera na forma de poeira contaminada proveniente de produtos como tintas, cerâmicas, tubulações, materiais de encanamento, soldas, gasolina, baterias, munições e cosméticos. A exaustão de veículos que utilizam combustível com chumbo (agora proibido em todos os países) também contribui para sua presença no ar ambiente. Existem múltiplas fontes e caminhos de exposição ao chumbo, sendo as principais rotas a ingestão e a

inalação. A maioria dos casos de envenenamento oral resulta da ingestão regular de pequenas quantidades de material contendo chumbo, como poeira ou solo contaminado, lascas de tinta, alimentos e especiarias contaminados, e medicamentos tradicionais contendo chumbo. Crianças pequenas são particularmente propensas a ingerir solo e poeira contaminados. A inalação de chumbo na forma de fumaça ou partículas é um importante via de exposição ocupacional (WHO, 2021c).

5.2 Principais Efeitos no Organismo Causados pelos Poluentes atmosféricos

5.2.1 Material particulado

Devido à heterogeneidade das partículas, as pesquisas sobre o material particulado (MP) e a interpretação de suas descobertas são complexas, bem como à possibilidade de que seu potencial de causar danos varia conforme o tamanho, características físicas, composição química e fontes. O material particulado contém minúsculas gotículas líquidas ou sólidas que podem ser inaladas, causando sérios efeitos à saúde. Partículas com diâmetro inferior a 10 micrômetros (MP10), após a inalação, podem invadir os pulmões e até alcançar a corrente sanguínea. Partículas ainda menores, com diâmetro inferior a 2,5 micrômetros (MP2.5), representam um risco maior para a saúde. Diversos estudos epidemiológicos têm sido realizados sobre os efeitos do MP na saúde (WHO, 2021^a; Manisalidis *et al.*, 2020).

Existe uma relação positiva entre as exposições de curto e longo prazo ao MP2.5 e a ocorrência de nasofaringite aguda. Além disso, a exposição prolongada ao MP por anos está associada a doenças cardiovasculares e à mortalidade infantil. As doenças respiratórias e a afetação do sistema imunológico também já foram registradas como efeitos crônicos de longo prazo. Pessoas com asma, pneumonia, diabetes, doenças respiratórias e cardiovasculares são especialmente suscetíveis e vulneráveis aos efeitos do MP. (Manisalidis *et al.*, 2020; WHO, 2021).

O trabalho de Aryal e colaboradores (2021) aponta que as partículas (MP) afetam vários aspectos celulares e fisiológicos da aterogênese, incluindo

estresse oxidativo, inflamação, disfunção metabólica e metabolismo lipídico. Cada um desses aspectos está relacionado com diferentes mecanismos de ação de indução de doenças cardiovasculares:

1. **Estresse Oxidativo:** A inalação de material particulado (MP) aumenta a produção de superóxidos, causando disfunção vascular e aterosclerose em animais, com inflamação e estresse oxidativo. A ativação de receptores por hidrocarbonetos e regulação epigenética contribuem para o estresse oxidativo e doenças cardiovasculares.
2. **Inflamação sistêmica:** A inflamação e o estresse oxidativo estão conectados. O estresse oxidativo causa lesão tecidual e inflamação. Lipídios e proteínas oxidados ativam receptores que desencadeiam inflamação, gerando espécies reativas de oxigênio (ERO). Esses ciclos repetidos contribuem para processos de inflamação sistêmica e com o desenvolvimento de diversas doenças, incluindo cardiovasculares (DCV) e pulmonares.
3. **Disfunção metabólica:** A disfunção autonômica e mecanismos neuro-humorais são fundamentais na resposta cardiovascular à poluição do ar. A exposição prolongada a poluentes pode aumentar catecolaminas e desequilibrar o sistema nervoso, afetando a função cardíaca e a variabilidade da frequência cardíaca (VFC), com risco de arritmias. A ativação do eixo hipotálamo-hipófise-adrenal (HPA) também eleva cortisol, aumentando a pressão arterial. Além disso, a ativação do HPA pode contribuir para a disfunção cardiovascular, aumentando a liberação de cortisol, o que eleva a pressão arterial.
4. **Metabolismo lipídico:** está associada ao aumento dos níveis de lipídios no sangue, um fator de risco para doenças cardiovasculares (DCV). Estudos mostram que o PM_{2,5} eleva o colesterol total e LDL, enquanto reduz o HDL. Além disso, a exposição prolongada ao PM em diferentes regiões tem sido ligada a dislipidemias, com efeitos variáveis sobre triglicerídeos e colesterol. Em roedores, a inalação de PM induz inflamação e estresse oxidativo no fígado, alterando o metabolismo de ácidos graxos e resultando em níveis elevados de triglicerídeos. A presença de poluentes como bifenilos policlorados (PCBs) adsorvidos ao

PM também contribui para dislipidemias e inflamação sistêmica, afetando o metabolismo lipídico no fígado e intestino.

5.2.2 Ozônio

Considerado poluente, quando presente a nível do solo, o ozônio está amplamente presente em áreas urbanas, e é conhecido por aumentar os danos ao DNA em queratinócitos epidérmicos e comprometer a função celular. Devido à sua baixa solubilidade em água, o ozônio inalado pode penetrar profundamente nos pulmões, causando uma série de desordens bioquímicas, morfológicas, funcionais e imunológicas. Estudos epidemiológicos mostram que a exposição ao ozônio está associada a um aumento no número diário de mortes (0,33%), bem como a um aumento nas mortes por causas respiratórias (1,13%) e cardiovasculares (0,45%) (Manisalidis *et al.*, 2020).

O ozônio pode efetivamente desencadear efeitos adversos em humanos, levando a hiperventilação em jovens e adultos nas concentrações de 80 e 120 ppb, reatividade das vias aéreas, e aumento da sensibilidade das vias respiratórias a outros poluentes atmosféricos. No mesmo estudo foi relatado ainda lesões em células epiteliais e ciliadas ao longo do trato respiratório em animais, alterações na permeabilidade da barreira sangue/ar do pulmão e hiperplasia das células alveolares. Quanto ao possível mecanismo de ação para os efeitos encontrados os autores indicam que o O₃ tem a capacidade de oxidar componentes celulares, como lipídios insaturados e poliinsaturados e os grupos tiol de proteínas, ocorrendo de forma direta ou indireta através de reações mediadas por radicais livres (Yang; Omaye, 2009).

O O₃ oxida lipídios diretamente para os ozonídeos, que se decompõem em aldeídos. Os fluidos de revestimento pulmonar podem reagir com o ozônio, produzindo vários subprodutos, como peróxidos orgânicos e de hidrogênio, aldeídos e radicais orgânicos, que podem promover danos oxidativos. Além disso, as espécies reativas de oxigênio iniciadas pelo O₃ ativam fatores de transcrição sensíveis ao redox, como o fator nuclear- κ B (NF- κ B) e a proteína ativadora-1 fos e c-jun. Vários antioxidantes, como o ácido ascórbico, atuam como potentes sequestradores de O₃ e NO₂ em fluidos corporais, protegendo provavelmente os fluidos de revestimento pulmonar contra poluentes oxidantes inalados.

A exposição aguda ao ozônio provoca hiper-reatividade das vias aéreas e inflamação neutrofílica, enquanto a exposição crônica leva à ativação de vias oxidativas que resultam em morte celular, inflamação brônquica crônica e enfisema, similar à Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica (DPOC), induzida pelo fumo. Os mecanismos incluem lesão crônica das células epiteliais respiratórias, destruição alveolar e remodelação tecidual, todos associados à inflamação crônica e hiper responsividade das vias aéreas (Wiegman *et al.*, 2020).

A relação entre a exposição ao O₃ e o risco de doenças cardiovasculares (DCV), bem como os mecanismos biológicos subjacentes, ainda não são completamente compreendidos. Os mecanismos biológicos propostos sugerem que a exposição ao O₃ provoca inflamação respiratória e sistêmica, estresse oxidativo, disfunção dos sistemas nervoso autônomo e neuroendócrino, além de prejudicar a coagulação, metabolismo da glicose e lipídios. Esses processos contribuem para a disfunção vascular e o desenvolvimento de DCV (Hua *et al.*, 2024).

5.2.3 Óxidos de nitrogênio

O dióxido de nitrogênio é um composto irritante ao sistema respiratório, penetrando profundamente nos pulmões e induzindo doenças respiratórias, tosse, sibilância, dispneia, broncoespasmo e até edema pulmonar quando inalado em altas concentrações. Concentrações superiores a 0,2 ppm são suficientes para produzir esses efeitos adversos em humanos, enquanto níveis acima de 2,0 ppm afetam linfócitos T, particularmente as células CD8+ e as células NK (*Natural Killer*), que são cruciais para a resposta imunológica. Relatos indicam que a exposição prolongada a altos níveis de NO₂ pode ser responsável por doenças pulmonares crônicas e pode prejudicar o olfato (Manisalidis *et al.*, 2020).

Além dos efeitos respiratórios, outros sistemas também podem ser afetados pela exposição ao NO₂, como irritação nos olhos, garganta e nariz. Uma vez depositado nos pulmões, o NO₂ pode se dissolver nos fluidos pulmonares, produzindo ácidos nítrico e nitroso. A reação primária do NO₂ é

com componentes teciduais oxidáveis, como lipídios e proteínas, resultando na formação de íon nitrito (Yang; Omaye, 2009).

Os mecanismos oxidativos do dano pulmonar induzido pelo NO₂ incluem a capacidade do radical nitrato, produto do O₃ e NO₂, de iniciar a peroxidação lipídica, abstraindo átomos de hidrogênio de ácidos graxos poli-insaturados (PUFAs). A peroxidação lipídica aumentada tem sido bem documentada nos pulmões de animais de laboratório expostos ao NO₂. O NO e espécies redox relacionadas visam tióis de cisteína e quelantes de metais de transição dentro de sítios proteicos chave. A S-nitrosilação, a ligação covalente de um grupo de monóxido de nitrogênio ao tiol do aminoácido cisteína, é um importante mecanismo para a regulação pós-traducional de muitas classes de proteínas. Além disso, os S-nitrosotiols, especialmente a S-nitrosoglutathiona (GSNO), são atualmente considerados importantes no armazenamento e transporte de NO in vivo (Yang; Omaye, 2009).

5.2.4. Monóxido de carbono

O monóxido de carbono (CO) é um gás altamente tóxico que, quando inalado, pode causar uma série de sintomas de envenenamento, incluindo dor de cabeça, tontura, fraqueza, náusea, vômito e, em casos graves, perda de consciência e morte. A afinidade do CO pela hemoglobina é muito maior do que a do oxigênio, o que leva à formação de carboxi-hemoglobina, uma forma mais estável que impede a hemoglobina de transportar oxigênio. Isso resulta em hipóxia e isquemia, podendo levar a doenças cardiovasculares.

A exposição a altos níveis de CO por períodos prolongados pode causar envenenamento grave, levando a inconsciência e podendo ser fatal em poucos minutos. A toxicidade do CO interfere na respiração celular ao impedir a entrega de oxigênio, causando hipóxia tecidual. A absorção intracelular de CO interage com outras hemoproteínas, como mioglobina, citocromo oxidase e citocromo P-450, prejudicando o transporte de elétrons e a produção de energia, podendo alterar células nervosas e produzir efeitos neurológicos e comportamentais (Manisalidis *et al.*, 2020; Yang; Omaye, 2009).

A toxicidade aguda do CO pode causar lesões neurológicas e miocárdicas. Cerca de 10% das pessoas que se recuperam de envenenamento

por CO apresentam lesões neurológicas retardadas, enquanto outras podem sofrer necrose do tecido muscular e/ou infarto agudo do miocárdio. Mecanismos oxidativos do dano pulmonar induzido por CO incluem o aumento do óxido nítrico tecidual, sendo que o CO tem uma afinidade mais forte do que o NO pelos sítios de ligação das proteínas heme. O aumento do NO vascular promove maior estresse oxidativo. À exposição ambiental de curto prazo ao monóxido de carbono está associada a incidência de asma, bronquiectasia e pneumonia e uma exposição ambiental, de mais de quatro anos, à uma concentração média diária de 0,88 mg/m³ pode levar a um risco aumentado de consultas ambulatoriais por doenças respiratórias, com maior efeito sobre mulheres e pacientes idosos (Zhao et al 2019).

5.2.5 Óxidos de sulfato

O dióxido de enxofre (SO₂) é um gás pesado, penetrante e incolor, conhecido pelo seu odor sufocante. Ao se unir com a água, forma ácido sulfúrico, que pode se adsorver a partículas de óxido metálico durante a fundição de metais e a combustão de combustíveis fósseis. Este ácido é especialmente prevalente em alguns carvões, onde mais de 9% do enxofre presente pode estar na forma de ácido sulfúrico. O SO₂ é predominantemente um irritante das vias aéreas superiores, causando broncoconstrição e aumento da produção de muco, refletindo-se em um aumento mensurável da resistência ao fluxo de ar. Devido à sua alta solubilidade em água, os vapores ácidos são depositados principalmente no trato respiratório superior, com pouca penetração nos pulmões, a menos que haja atividade física vigorosa. Pessoas com asma e outras condições de hiper-reatividade das vias aéreas são mais sensíveis às exposições agudas ao SO₂, em concentrações muito menores do que aquelas que afetam pessoas saudáveis (Manisalidis *et al.*, 2020; Yang; Omaye, 2009).

Os mecanismos oxidativos do dano pulmonar induzido por SO₂ envolvem a sua redução na presença de superóxido, formando o radical SO₂. Este gás dissolvido em fluido aquoso forma sulfitos e bissulfitos, que se oxidam gerando superóxido e peróxido de hidrogênio. Além dos principais problemas de saúde no trato respiratório associados às emissões de SO₂ em áreas

industrializadas também foram constatadas vermelhidão da pele, danos aos olhos (lacrimajamento e opacidade da córnea) e às membranas mucosas, além de agravamento de doenças cardiovasculares preexistentes. Efeitos ambientais adversos, como a acidificação do solo e a chuva ácida, também estão associados às emissões de SO₂ (Manisalidis *et al.*, 2020; Yang; Omaye, 2009).

5.2.6. Chumbo

O envenenamento por chumbo é uma ameaça à saúde pública devido aos seus efeitos nocivos sobre humanos, animais e o meio ambiente, especialmente em países em desenvolvimento. A exposição ao chumbo pode ocorrer por inalação, ingestão e absorção dérmica, além do transporte transplacentário, já que o chumbo passa pela placenta sem dificuldade (WHO, 2021c).

Quando inalado, o chumbo se acumula no sangue, tecidos moles, fígado, pulmões, ossos e sistemas cardiovascular, nervoso e reprodutivo. Em adultos, foram observadas perda de concentração e memória, bem como dores musculares e articulares. Crianças e recém-nascidos são extremamente suscetíveis mesmo a doses mínimas de chumbo, devido à sua natureza neurotóxica, causando dificuldades de aprendizado, prejuízo na memória, hiperatividade e até retardo mental. Crianças podem ter uma exposição maior que adultos, pois respiram proporcionalmente mais ar por unidade de peso corporal (WHO, 2021c).

Partículas pequenas de chumbo (< 1 µm) são depositadas no trato respiratório inferior, onde o chumbo é quase totalmente absorvido, enquanto partículas maiores (1–10 µm) tendem a ser depositadas nas vias aéreas superiores, transferidas pelo transporte mucociliar para o esôfago e engolidas. Uma vez absorvido, o chumbo é inicialmente ligado aos eritrócitos no sangue e distribuído para tecidos moles e ossos. As maiores concentrações em tecidos moles de adultos são encontradas no fígado e no córtex renal, e o chumbo também é distribuído para dentes e cabelos (WHO, 2021c).

Este metal não possui função fisiológica aparente e possui afinidade por grupos sulfidril e outros ligantes orgânicos em proteínas, podendo imitar

outros metais biologicamente essenciais, como zinco, ferro e, em particular, cálcio. Devido a essas propriedades, o chumbo possui vários modos de ação tóxica, que dependem da dose e do órgão-alvo. Esses modos de ação incluem alterações no status de íons e sinalização celular, mudanças na ligação de proteínas, estresse oxidativo, inflamação, disrupção endócrina, morte celular e genotoxicidade (WHO, 2021c).

Os efeitos de maior relevância para a saúde pública, como os efeitos neurodesenvolvimentais adversos em crianças e doenças cardiovasculares em adultos, são inespecíficos e, em grande parte, subclínicos. Os efeitos tóxicos podem incluir problemas gastrointestinais, hematológicos, neurológicos e renais, bem como impactos nos sistemas reprodutivo, imunológico, endócrino e cardiovascular. Em casos de envenenamento severo, pode ocorrer encefalopatia com risco de vida (WHO, 2021c).

5.2.7. Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs) e Compostos Orgânicos Voláteis (VOCs)

Compostos de HPA, como benzopireno, acenaftileno, antraceno e fluoranteno, são reconhecidos como substâncias tóxicas, mutagênicas e cancerígenas, representando um importante fator de risco para o câncer de pulmão (Manisalidis *et al.*, 2020).

Os compostos orgânicos voláteis (VOCs), como tolueno, benzeno, etilbenzeno e xileno, estão associados ao câncer em humanos. A exposição de curto prazo causa irritação nos olhos, nariz, garganta e membranas mucosas, enquanto a exposição prolongada pode incluir reações tóxicas (Manisalidis *et al.*, 2020).

Durante décadas, foram investigados os efeitos das PM ambientais, COVs, metais e PAHs na mortalidade da população e vários dados epidemiológicos relataram uma correlação robusta entre poluentes PM, VOCs, metais e PAHs e doenças cardiovasculares e respiratórias por diversos mecanismos propostos na fisiologia respiratória humana (Manisalidis *et al.*, 2020).

5.3 Análises *in silico*

Para os compostos que foram submetidos ao processamento *in silico*, como descrito na seção 4.2, aquele que apresentou menor DL₅₀, e por tanto, maior toxicidade, foi o monóxido de carbono com 25 mg/kg e classe de toxicidade 2, quase a maior classificação da análise que leva em consideração uma escala de 1 a 6 onde a classe 1 é o mais tóxico e a classe 6 é a menos tóxica (Tabela 02). Por outro lado, o formaldeído apresentou a maior DL₅₀, por tanto menor toxicidade, com 1190 mg/kg e classe de toxicidade de grau 4.

Quando verificamos os tipos de toxicidade que podem ser exibidas pelos compostos analisados, vemos que o benzopireno é o que parece apresentar a maior gama de riscos associados, sendo neurotóxico, carcinogênico, mutagênico, agir sobre enzimas do sistema de hormônios sexuais, entre outros. É interessante notar que todos os compostos apresentaram potencial de penetrar na camada hematoencefálica (Tabela 02).

Tabela 2: Parâmetros toxicológicos *in silico* para representantes de poluentes atmosféricos.

Parâmetro	Ozônio	Monóxido de carbono	Dióxido de enxofre	Dióxido de nitrogênio	Benzeno	Benzopireno	Formaldeído	Chumbo
Classe de toxicidade	ND	2	2	3	4	4	4	3
DL₅₀ (mg/Kg)	ND	25	448	158	930	316	1190	100
Tipo de toxicidade	Capaz de penetrar a barreira hematoencefálica	Neurotóxico, carcinogênico, ecotóxico, capaz de penetrar a barreira hematoencefálica	Capaz de penetrar a barreira hematoencefálica e ecotóxico	Carcinogênico, mutagênico, ecotóxico e capaz de penetrar a barreira hematoencefálica	Neurotóxico, carcinogênico, ecotóxico, capaz de penetrar a barreira hematoencefálica	Neurotóxico, carcinogênico, mutagênico, ecotóxico, capaz de penetrar a barreira hematoencefálica, age sobre enzimas dos hormônios sexuais, sobre enzimas de choque térmico e sobre enzimas supressoras de tumores	Hepatotóxico, neurotóxico, imunotóxico, tóxico para o sistema respiratório, ecotóxico, age sobre as enzimas dos hormônios sexuais e sobre a acetilcolinesterase	Neurotóxico, mutagênico, ecotóxico, capaz de penetrar a barreira hematoencefálica

Fonte: Autor, 2024

Essa predição está em consonância com a capacidade neurotóxica *in vivo* descrita por Costa et al. (2020) e Cory-Slechta et al. (2023), que afirmam que, entre os efeitos causados pela poluição do ar, estão o estresse oxidativo, a neuroinflamação, o efeito de neurotoxicidade na estrutura ou função do sistema nervoso central e/ou periférico, e o aumento da expressão de marcadores de patologias de doenças neurodegenerativas, como alfa-sinucleína e beta-amilóide. Esses fatores podem contribuir para a etiopatogenia de doenças neurodegenerativas, particularmente a doença de Alzheimer e a doença de Parkinson. Outro ponto importante, é que com exceção do ozônio, todos os compostos apresentaram predição como compostos ecotóxicos, o que concorda com as informações abordadas até o momento neste trabalho.

Para análise, de possíveis efeitos tóxicos em humanos, utilizando o software online PASS como descrito no item 4.2.3, é necessário que o composto alvo possua mais de um átomo e mais de três carbonos. Desta forma apenas o benzeno e o benzopireno puderam ser analisados nessa plataforma. Considerando as similaridades entre a classe dos dois compostos era esperado que os possíveis efeitos toxicológicos fossem semelhantes. E, de fato, entre os dez efeitos com maior grau de certeza oito são comuns aos dois compostos (Tabela 03).

Tabela 03: Predição de efeitos toxicológicos para o benzeno e benzopireno.

Benzeno		Benzopireno	
Pa-Pi	Possíveis efeitos toxicológicos	Pa-Pi	Possíveis efeitos toxicológicos
0,927	Tremedeira	0,875	Tremedeira
0,918	Dermatose neutrofilica	0,866	Dermatose neutrofilica
0,915	Câimbras	0,865	Câimbras
0,913	Aplasia dos glóbulos vermelhos	0,852	Enfraquecimento das unhas
0,902	Enfraquecimento das unhas	0,849	Falência múltipla dos órgãos aplasia dos glóbulos vermelhos
0,9	Falência múltipla dos órgãos	0,844	vermelhos
0,897	Hematêmese	0,812	Hemorragia oculta
0,883	Inibidor da trombocitopoiese	0,794	Hematêmese
0,879	Hipoplasia do córtex adrenal	0,788	Hipoplasia do córtex adrenal
0,877	Hemorragia oculta	0,773	Ganho de peso

Fonte: Autor, 2024

Dentre os possíveis efeitos observados alguns já foram relatados anteriormente. A capacidade do benzeno em induzir aplasia das células vermelhas é inclusive utilizada como metodologia em ensaios pré-clínicos de anemia em roedores (Komaria *et al.*, 2021). A exposição a solventes contendo benzeno, tolueno e xileno mostraram relação com leucemia, e câimbras (Taheril *et al.*, 2022). A confirmação acadêmica de possíveis efeitos tóxicos determinados pela análise *in silico* valida as análises que foram realizadas e indica o potencial dessas análises para o desenvolvimento da estratégia experimental de pesquisas futuras.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho abordou de forma abrangente a questão da poluição atmosférica, com ênfase nas classes de poluentes e seus impactos na saúde respiratória da população. Ao longo desta pesquisa, foram identificados e analisados representantes significativos de cada classe de poluentes, como o material particulado (MP), os óxidos de nitrogênio (NO_x), compostos orgânicos voláteis (COVs), dióxido de enxofre (SO₂), entre outros. A análise *in silico*, se mostrou uma ferramenta eficiente e permitiu uma melhor compreensão das características físico-químicas dos poluentes e no rastreamento de seus possíveis efeitos toxicológicos. Os dados confirmam que os poluentes atmosféricos têm impactos significativos no sistema respiratório humano, exacerbando condições como asma, bronquite crônica, e contribuindo para o desenvolvimento de doenças mais graves, como câncer de pulmão e doenças cardiovasculares. Portanto, este estudo não só reforça a necessidade de monitoramento rigoroso e controle das emissões de poluentes atmosféricos, como também ressalta a importância de políticas públicas voltadas para a mitigação dos riscos à saúde pública.

REFERÊNCIAS

Alsaraf, S., Hadi, Z., Al-Lawati, W. M., Al Lawati, A. A., & Khan, S. A. Chemical composition, in vitro antibacterial and antioxidant potential of Omani Thyme essential oil along with in silico studies of its major constituent. **Journal of King Saud University - Science**, 32(1), 1021–1028, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.jksus.2019.09.006>

Aryal, A., Harmon, A.C., Dugas, T.R., Particulate matter air pollutants and cardiovascular disease: Strategies for intervention. **Pharmacology & Therapeutics** 223, 107890, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.pharmthera.2021.107890>

Barbosa, D.C., Holanda, V.N., De Assis, C.R.D., De Oliveira Farias De Aguiar, J.C.R., do Nascimento, P.H., Da Silva, W.V., Do Amaral Ferraz Navarro, D.M., Silva, M.V.D., De Menezes Lima, V.L., Dos Santos Correia, M.T.,. Chemical composition and acetylcholinesterase inhibitory potential, in silico, of *Myrciaria floribunda* (H. West ex Willd.) O. Berg fruit peel essential oil. **Industrial Crops and Products** 151, 112372, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112372>

Borrego, C., Lopes, M., Ribeiro, I., Carvalho, A., Miranda, A.I.,. As alterações climáticas: uma realidade transformada em desafio. **Revista Captar: Ciência e Ambiente para Todos** 1-16 Páginas, 2010.
<https://doi.org/10.34624/CAPTAR.V2I2.14533>

BORREGO, Carlos et al. As alterações climáticas: uma realidade transformada em desafio. **Debater a Europa**, v. 1, p. 15-40, 2009.

CAVALCANTI, P. M. P. S. Modelo de Gestão da Qualidade do Ar – Abordagem Preventiva e Corretiva, 2010. Tese (Doutorado em Planejamento Energético) - Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2010.

CGTI, A. ([s.d.]). Qualidade do Ar. Recuperado 1º de junho de 2024, de <http://antigo.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/qualidade-do-ar.html>

Cory-Slechta, D.A., Merrill, A., Sobolewski, M.,. Air Pollution–Related Neurotoxicity Across the Life Span. Annu. **Rev. Pharmacol. Toxicol.** 63, 143–163, 2023. <https://doi.org/10.1146/annurev-pharmtox-051921-020812>.

Costa, L.G., Cole, T.B., Dao, K., Chang, Y.-C., Coburn, J., Garrick, J.M.,. Effects of air pollution on the nervous system and its possible role in neurodevelopmental and neurodegenerative disorders. **Pharmacology & Therapeutics** 210, 2020. 107523.
<https://doi.org/10.1016/j.pharmthera.2020.107523>

Felin, B.,. Qual o impacto da poluição do ar na saúde? [WWW Document], 2018. URL <https://www.wribrasil.org.br/noticias/qual-o-impacto-da-poluicao-do-ar-na-saude> (accessed 8.8.24).

Fraser, P. J., Dunse, B. L., Krummel, P. B., Steele, L. P., Derek, N., Mitrevski, B., Allison, C. E., Loh, Z., Manning, A. J., Redington, A., & Rigby, M. Australian chlorofluorocarbon (Cfc) emissions: 1960–2017. **Environmental Chemistry**, 17(8), 525 2020. <https://doi.org/10.1071/EN19322>

Garrido, B., Amazônia queima mais de “duas Bélgica” por ano desde 1985 [WWW Document]. IPAM Amazônia, 2023. URL <https://ipam.org.br/amazonia-queima-mais-de-duas-belgicas-por-ano-desde-1985/> (accessed 8.8.24).

Garrido, Bibiana. “Amazônia queima mais de ‘duas Bélgica’ por ano desde 1985”. IPAM Amazônia, 26 de abril de 2023, <https://ipam.org.br/amazonia-queima-mais-de-duas-belgicas-por-ano-desde-1985/>.

GUARIEIRO, Lilian LN; VASCONCELLOS, Pérola C.; SOLCI, Maria Cristina. Poluentes atmosféricos provenientes da queima de combustíveis fósseis e biocombustíveis: uma breve revisão. 2011.

History Channel Brasil. “Vale da Morte”: Como Cubatão se tornou a cidade mais poluída do mundo nos anos 1980. ([s.d.]). Recuperado 3 de junho de 2024, de <https://www.canalhistory.com.br/ciencia-e-tecnologia/vale-da-morte-como-cubatao-se-tornou-cidade-mais-poluida-do-mundo-nos-anos>

Hua, Q., Meng, X., Gong, J., Qiu, X., Shang, J., Xue, T., Zhu, T.. Ozone exposure and cardiovascular disease: A narrative review of epidemiology evidence and underlying mechanisms. **Fundamental Research** S2667325824001213, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.fmre.2024.02.016>

JUNIOR, Celso Henrique Leite Silva et al. Dinâmica das queimadas no Cerrado do Estado do Maranhão, Nordeste do Brasil. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 35, p. 1-14, 2018.

Komaria, R., Nyoman Ehrich Lister, I., Lie, S.,. Hematological Profiles of Benzene-Induced Rats Treated with Ethanollic Extract of *Syzygium Polyanthum*, in: 2021 IEEE International Conference on Health, Instrumentation & Measurement, and Natural Sciences (InHeNce). pp. 1–6, 2021. <https://doi.org/10.1109/InHeNce52833.2021.9537237>

Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A., & Bezirtzoglou, E. Environmental and health impacts of air pollution: A review. **Frontiers in Public Health**, 8, 14, 2020. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014>

Matriz energética. ([s.d.]). Recuperado 3 de junho de 2024, de <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>

Nath, LS, Khan, SA e Ahmad, A. Artigo de Pesquisa Triagem de produtos naturais auxiliada por computador em busca de moléculas líderes para projeto e desenvolvimento de potentes agentes antiinflamatórios. **Sch Acad J Pharm** , 3 (6), 496-503, 2014.

Nunes, C.C.M.N.,. Exposição da poluição domiciliar (indoor) pela queima de biomassa para cocção de alimentos e riscos à saúde no Brasil: revisão sistemática de indicadores de monitoramento. Exhibition of Indoor Household Pollution from Biomass Burning for Cooking and Health Risks in Brazil: systematic Review of Monitoring Indicators, 2023.

Poluição do ar ou atmosférica: Causas, tipos. ([s.d.]). Brasil Escola. Recuperado 1º de junho de 2024, de <https://brasilecola.uol.com.br/biologia/poluicao-atmosferica.htm>

Prather, M., Gauss, M., Berntsen, T., Isaksen, I., Sundet, J., Bey, I., Brasseur, G., Dentener, F., Derwent, R., Stevenson, D., Grenfell, L., Hauglustaine, D., Horowitz, L., Jacob, D., Mickley, L., Lawrence, M., Von Kuhlmann, R., Muller, J., Pitari, G., ... Wild, O. Fresh air in the 21st century? **Geophysical Research Letters**, 30(2), 2002GL016285, 2003. <https://doi.org/10.1029/2002GL016285>

Rai, Richa & Rajput, Madhu & Agrawal, Madhoolika & Agrawal, Shashi. Gaseous air pollutants: a review on current and future trends of emissions and impact on agriculture. **J. Sci. Res.** 55, 2011.

SANTOS, H. L., FIALHO, M. L., REIS, K. P., FRANCO, M. V., & OLIVEIRA, R. B. D. Relação entre poluentes atmosféricos e suas consequências para a saúde, 2019. **Revista Científica Intr@ ciência**, 17, 01-24.

SANTOS, Haroldo Lima et al. Relação entre poluentes atmosféricos e suas consequências para a saúde. **Revista Científica Intr@ ciência**, v. 17, p. 01-24, 2019.

Serviço Geológico do Brasil—SGB. ([s.d.]-a). Recuperado 3 de junho de 2024, de <https://www.sgb.gov.br/publique/SGB-Divulga/Canal-Escola/Carvao-Mineral-2558.html>

Serviço Geológico do Brasil—SGB. ([s.d.]-b). Recuperado 3 de junho de 2024, de <https://www.sgb.gov.br/publique/SGB-Divulga/Canal-Escola/Petroleo-1256.html>

Serviço Geológico do Brasil—SGB. ([s.d.]-c). Recuperado 3 de junho de 2024, de <https://www.sgb.gov.br/publique/SGB-Divulga/Canal-Escola/O-que-sao-e-como-se-formam-os-fosseis%3F-1048.html>

Silva Junior, C.H.L., Anderson, L.O., Aragão, L.E.O.E.C.D., Rodrigues, B.D.,. Dinâmica das Queimadas no Cerrado do Estado do Maranhão, Nordeste do Brasil. **Rev. Dep. Geogr.** 35, 1–14, 2018. <https://doi.org/10.11606/rdg.v35i0.142407>

Taheri, E., Yousefinejad, S., Dehghani, F.,. Investigation of some effective factors on urinary metabolites in biological monitoring of benzene, toluene, and xylene compounds. **International Journal of Environmental Analytical Chemistry** 1–16, 2022. <https://doi.org/10.1080/03067319.2022.2097871>

Vectorpouch, Infographics do vetor dos desenhos animados da formação do petróleo com fases do processo | Vetor Grátis [WWW Document], n.d. . Freepik. URL https://br.freepik.com/vetores-gratis/infographics-do-vetor-dos-desenhos-animados-da-formacao-do-petroleo-com-fases-do-processo_4015261.htm (accessed 8.8.2024).

WEBER, A. C.. Evolução Petrolífera: Reflexos no modelo Regulatório Atual. In: 3º Congresso de Petróleo e Gás, 2005, Salvador. **Rio Oil and Gas**, 2005.

WEBER, Ana Carolina. Evolução Petrolífera: Impactos no Atual Modelo Brasileiro. Artigo apresentado, n. 3º, 2004.

WHO 2021b Human health effects of polycyclic aromatic hydrocarbons as ambient air pollutants: report of the Working Group on Polycyclic Aromatic Hydrocarbons of the Joint Task Force on the Health Aspects of Air Pollution. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe; 2021. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.

WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva: World Health Organization; 2021^a. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.

WHO guideline for clinical management of exposure to lead: executive summary. Geneva: World Health Organization; 2021c. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.

Wiegman, C.H., Li, F., Ryffel, B., Togbe, D., Chung, K.F.,. Oxidative Stress in Ozone-Induced Chronic Lung Inflammation and Emphysema: A Facet of Chronic Obstructive Pulmonary Disease. **Front. Immunol.** 11, 1957, 2020. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2020.01957>

WORLD HEALTH ORGANIZATION et al. WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants. World Health Organization. Regional Office for Europe, 2010.

World Health Organization. ([s.d.]). Types of pollutants. Recuperado 1º de junho de 2024, de <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/air-quality-and-health/health-impacts/types-of-pollutants>

Yang, W., & Omaye, S. T. Air pollutants, oxidative stress and human health. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 674(1–2), 45–54, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2008.10.005>

Yi, L., Wu, J., An, M., Xu, W., Fang, X., Yao, B., Li, Y., Gao, D., Zhao, X., & Hu, J. (2021). The atmospheric concentrations and emissions of major halocarbons in China during 2009–2019. **Environmental Pollution**, 284, 117190. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117190>

Zhao, Y., Hu, J., Tan, Z., Liu, T., Zeng, W., Li, X., Huang, C., Wang, S., Huang, Z., Ma, W.,. Ambient carbon monoxide and increased risk of daily hospital

outpatient visits for respiratory diseases in Dongguan, China. **Science of The Total Environment** 668, 254–260, 2019.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.333>

SILVA, M. F. **Acordo de Paris**. Disponível em:

<<https://antigo.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris.html>>.

Marcos ambientais: Linha do tempo dos 75 anos da ONU. Disponível em:

<https://www.unep.org/pt-br/news-and-stories/story/environmental-moments-un75-timeline?_ga=2.37073696.125292985.1603219350-1592602719.1539581869>. Acesso em: 8 set. 2024.

TERRA, L.; ARAUJO, R.; RAUL BORGES GUIMARÃES. **Geografia conexões estudos de Geografia geral e do Brasil [7]Suplemento de revisão**. [s.l.] São Paulo Ed. Moderna Plus, 2014.

SOUZA, B. **Brasil registrou quase 70 mil focos de queimadas em agosto**.

Disponível em: <<https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/brasil-registrou-quase-70-mil-focos-de-queimadas-em-agosto/>>. Acesso em: 4 set. 2024.

DAS, F. **Fumaça das queimadas da Amazônia chega ao Sul do Brasil nesta terça-feira (3)**. Disponível em:

<<https://g1.globo.com/meio-ambiente/noticia/2024/09/03/fumaca-queimadas-da-amazonia-sul-do-brasil.ghtml>>. Acesso em: 4 set. 2024.

Fearnside, P.M., 2002. Fogo e emissão de gases de efeito estufa dos ecossistemas florestais da Amazônia brasileira. *Estud. av.* 16, 99–123.

<https://doi.org/10.1590/S0103-40142002000100007>

Tsai, D., et al. "Análise das Emissões de Gases de Efeito Estufa e Suas Implicações Para as Metas Climáticas do Brasil 1970–2022." *SEEG: Brasília, Brazil* (2022).

Cotrim, Gilberto. *História global: Brasil e geral: ensino médio*. Editora Saraiva, 2019.

CGTI, A., n.d. Qualidade do Ar [WWW Document]. URL <http://antigo.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/qualidade-do-ar.html> (accessed 11.6.24).

“Vale da Morte”: como Cubatão se tornou a cidade mais poluída do mundo nos anos 1980 [WWW Document], n.d. . History Channel Brasil. URL <https://www.canalhistory.com.br/ciencia-e-tecnologia/vale-da-morte-como-cubatao-se-tornou-cidade-mais-poluida-do-mundo-nos-anos> (accessed 11.6.24).

dos SANTOS, Paola Ribas Gonçalves, et al. "Fontes Renováveis e não renováveis geradoras de energia elétrica no Brasil." *Conference paper-Mostra Nacional de Iniciação Científica e Tecnológica Interdisciplinar*. <https://www>.

researchgate.

net/publication/342716427_

Fontes_Renovaveis_e_Nao_Renovaveis_

Geradoras_de_Energia_Eletrica_no_Brasi I. 2015.

Instituto Nacional de Meteorologia - INMET [WWW Document], n.d. URL

[https://portal.inmet.gov.br/noticias/omm-registra-mais-um-recorde-na-emiss](https://portal.inmet.gov.br/noticias/omm-registra-mais-um-recorde-na-emiss%C3%83%C2%A3o-de-gases-estufa)

[%C3%83%C2%A3o-de-gases-estufa](https://portal.inmet.gov.br/noticias/omm-registra-mais-um-recorde-na-emiss%C3%83%C2%A3o-de-gases-estufa) (accessed 11.6.24).

Copernicus Services | Copernicus [WWW Document], n.d. URL

<https://www.copernicus.eu/en/copernicus-services> (accessed 11.6.24).