UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS

INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEREOLOGIA

Rayane Mery dos Santos Reis Ferreira

IMPACTOS DAS CONCENTRAÇÕES DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS NA QUALIDADE DO AR DOS MUNICÍPIOS DE ALAGOAS

MACEIÓ, AL

SETEMBRO, 2024

Rayane Mery dos Santos Reis Ferreira

IMPACTOS DAS CONCENTRAÇÕES DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS E QUALIDADE DO AR NOS MUNICÍPIOS DE ALAGOAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Alagoas – UFAL, para obtenção do título de Mestre em Meteorologia.

Orientador: **Prof. Dr. José Francisco de Oliveira Júnior**

Coorientadora: **Drª. Micejane da Silva Costa**

Maceió, AL

Catalogação na Fonte Universidade Federal de Alagoas Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

F383i Ferreira, Rayane Mery dos Santos Reis.
Impactos das concentrações de poluentes atmosféricos e qualidade do ar nos municípios de Alagoas / Rayane Mery dos Santos Reis Ferreira. – 2024.
106 f. : il.

Orientador: José Francisco de Oliveira Júnior. Co-orientadora: Micejane da Silva Costa.
Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas.
Instituto de Ciências Atmosféricas. Maceió, 2024.

Bibliografia: f. 92-106.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS

INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

CERTIFICADO DE APRESENTAÇÃO

N.º de ordem: MET-UFAL-MS-206.

"IMPACTOS DAS CONCENTRAÇÕES DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS E QUALIDADE DO AR NOS MUNICÍPIOS DE ALAGOAS."

RAYANE MERY DOS SANTOS REIS FERREIRA

Dissertação submetida ao colegiado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Alagoas - UFAL, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Meteorologia.

Aprovado pela Banca Examinadora composta por:

gov.br Documento assinado digitalmente
JOSE FRANCISCO DE OLIVEIRA JUNIOR
Data: 11/12/2024 10:45:23-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. José Francisco de Oliveira Júnior
(Orientador)

gov.br Documento assinado digitalmente
MICEJANE DA SILVA COSTA
Data: 11/12/2024 09:44:46-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Profa. Dra. Micejane da Silva Costa
(Coorientadora)

gov.br Documento assinado digitalmente
HELIOFABIO BARROS GOMES
Data: 04/10/2024 12:48:23-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Heliofábio Barros Gomes
(Membro Interno)

Documento assinado digitalmente
THOMAS ROCHA FERREIRA
Data: 04/10/2024 10:16:56-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr.Thomás Rocha Ferreira
(Membro Interno)

Documento assinado digitalmente
FRANCINE SANTOS DE PAULA
Data: 01/10/2024 14:47:14-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Profa. Dra. Francine Santos de Paula
(Membro Externo)

SETEMBRO/2024

À minha querida família, que é o alicerce da minha vida: mãe, pai, filhas e esposo, dedico com todo o meu amor e gratidão.

AGRADECIMENTOS

Nada do que construí nesta viagem, chamada vida, teria sido possível sem o apoio incondicional dos meus pais, a Sra. Rosineide Maria dos Santos Reis e o Sr. Manoel Reis Santos. Não encontro palavras para expressar minha gratidão por serem os meus pilares, o meu espelho, os exemplos vivos de amor, honestidade, força e compaixão. Amo vocês!

Thiago Rocha Ferreira, há mais de 18 anos enfrentamos juntos cada desafio que a vida nos impôs. Você sangrou comigo por Mariana e Morgana, e, por isso, um simples "obrigado" nunca será suficiente. Enfrentámos dificuldades e medos, mas nossas mãos jamais se soltaram, nossos sonhos sempre se entrelaçaram, e a nossa alegria multiplicou-se com a chegada de Liliana. Tudo se tornou mais fácil e, ao mesmo tempo, mais desafiador. Hoje, somos três e, como sempre dissemos: *Forever one*! Amo-te profundamente.

Ah, Liliana, minha Liliana Reis Ferreira, tu renovaste-me, curaste o meu coração despedaçado, sem sequer teres noção disso. A tua existência é a minha, e o teu sorriso é a minha força. Amo-te mais do que tudo! "Mamãiiiinnn", como gostas de me chamar, estará sempre a lutar por ti. És a razão pela qual encontro forças para continuar, todos os dias. Amo-te, ao infinito e além!

Dr. Thomas Rocha Ferreira e Ma. Jéssica Delgado Ferreira, muito obrigada por, desde o início, terem me apoiado, tirado dúvidas e discutido questões ligadas à Meteorologia. Eu caí de paraquedas nesse mundo, e em vocês encontrei o suporte necessário para prosseguir. Nunca ouvi uma palavra desmotivadora. Muito obrigada!

Professor Dr. José Francisco de Oliveira Júnior, sou extremamente grata por me ter recebido de braços abertos, mesmo vindo de outro curso e sem experiência na área da Meteorologia. Desde o nosso primeiro e-mail, quando o procurei como orientador, o senhor sempre se mostrou disposto a ajudar, guiando-me com entusiasmo e inspiração. As suas ideias foram fundamentais para que eu continuasse a aprender. Muito obrigada!

À minha coorientadora, Drª. Micejane da Silva Costa, agradeço profundamente pelo acompanhamento nesta reta final, pelas sugestões, dicas e paciência na melhoria dos projetos. O seu apoio foi essencial. Obrigada!

Não posso deixar de expressar minha gratidão também aos professores Dr. Heliofábio Barros Gomes , Dr. Ricardo Ferreira Carlos Amorim, Dr. Roberto Fernando da Fonseca Lyra, Drª. Natalia Fedorova, Drª. Djane Fonseca da Silva, Drª. Rafaela Lisboa e Dr. Fabrício Daniel dos Santos Silva, pelos ensinamentos e pelo acolhimento ao longo das aulas. A Meteorologia foi um curso que me abriu a mente, e vocês contribuíram significativamente para este grande passo na minha vida. Obrigada!

Aos amigos que fiz ao longo desses dois anos, Adriana Maria dos Santos, começámos juntas e, como "intrusas" nesse novo universo, chegámos até aqui. Helder Dutra Porto, a meteorologia ambiental cruzou nossos caminhos e, mesmo à distância, sinto que te conheço há séculos. Sou imensamente grata pela tua amizade. Aos amigos da Escola Francisco Leão, agradeço o carinho e o apoio entre as aulas vagas. Professores: Márcio Caique Santos Correia, Anderson Eduardo Santos, Shênia Santos Silva, Marcionilo José de Vasconcelos Neto, Jeane dos Santos Melo, Cícero Bezerra da Silva, José Renato Florentino de Lima e Francisco José de Araújo Filho, muito obrigada pela amizade e por tornarem essa jornada mais leve.

Ao refletir sobre este percurso, recordo as noites sem dormir, o período de amamentação, as aulas para preparar e as idas e vindas entre Maceió e Rio Largo. Tudo isso mostrou-me que a perseverança faz parte do processo evolutivo da aprendizagem. Todos temos 24h no dia, mas nem todos têm as mesmas 24 horas, hoje eu consegui porque, em algum momento, vocês me deram forças e esperança para continuar.

Do fundo do meu coração, muito obrigada a todos!

LISTA DE FIGURAS

pág.

Figura 1 – Formação do metabólito mais importante do BaP que se liga a guanina do DNA.....44

Figura 2: Configuração espacial das mesorregiões do Estado de Alagoas e de seus municípios.....45

Figura 3 - Concentração de material particulado ($PM_{2.5}$) em µg/m³ no 2002 no estado de Alagoas.....53

Figura 4 - Concentração de material particulado ($PM_{2.5}$) em µg/m³ no 2018 no estado de Alagoas.....53

Figura 5 - Concentração de $PM_{2.5}$ nos anos 2000, 2001 e 2002 para o estado de Alagoas 54

Figura 6 - Distribuição de veículos no estado de Alagoas para o ano de 2022. 55

Figura 7 - Concentração do Ozônio (O_3) em ppm para os anos de 2002 e 2018 no Estado de Alagoas.....56

Figura 8 - Concentração de Dióxido de Nitrogênio (NO_2) em ppm para os anos de 2002 e 2018 no Estado de Alagoas 57

Figura 9 - Concentração de Dióxido de Enxofre (SO_2) em µg/m³ para os anos de 2002 e 2018 no Estado de Alagoas 57

Figura 10 - Concentração de Monóxido de Carbono (CO) em ppm para os anos de 2002 e 2018 no Estado de Alagoas 58

Figura 11 - Índice de Precipitação do estado de Alagoas para os anos 2002 e 2018..... 59

Figura 12 - Média diária das concentrações dos poluentes CO, NO_2, O_3, $PM_{2.5}$ e SO_2 para as mesorregiões do sertão, agreste e leste alagoano do ano de 2000 a 2019. 61

Figura 13 - Médias anuais das concentrações dos poluentes CO, NO_2, O_3, $PM_{2.5}$ e SO_2 para as mesorregiões do sertão, agreste e leste alagoano do ano de 2000 a 2019. 62

Figura 14 - Análise anual temporal da concentração de $PM_{2.5}$, CO, NO_2 e SO_2 comparativamente com os limites do CONAMA (2018) e OMS (2021) para o sertão. Alagoano. 64

Figura 15 - Análise anual temporal da concentração de $PM_{2.5}$ e SO_2 comparativamente com os limites do CONAMA (2018) e OMS (2021) para o agreste Alagoano. 66
Figura 16: Médias diárias de $PM_{2.5}$ para o sertão e agreste do ano de 2000 a 2019...67
Figura 17: Médias diárias de NO_2 para o sertão do ano de 2000 a 2019. 68
Figura 18: Médias diárias de CO para o Sertão e Agreste do ano de 2000 a 2019. 69
Figura 19: Médias diárias de O_3 para o sertão, agreste e leste alagoano do ano de 2000 a 2019.....70
Figura 20: Médias diárias de SO_2 para o sertão, agreste e leste alagoano do ano de 2000 a 2019.....71
Figura 21: Alagoas: histórico produtivo da cana-de-açúcar (2000-2019). 73
Figura 22: Alagoas: concentração de empresas industriais por município (2020)..... 73
Figura 23: Rosa de poluição representando a concentração de partículas finas ($PM_{2.5}$) em diferentes direções de vento para o estado de Alagoas 84
Figura 24: Municípios alagoanos e quantidade de óbitos por residência de acordo com o Grupo CID-10: Doenças cardíaca pulmonar e da circulação pulmonar, outras doenças das vias aéreas superiores, doenças crônicas das vias aéreas inferiores, doenças pulmonares devidas a agentes externos, no período: 2000-2019. 85
Figura 25: Médias anuais de óbitos confirmados para o Sertão, Agreste e Leste Alagoano. 87

LISTA DE TABELAS

pág.

Tabela 1: Concentrações dos poluentes segundo a resolução CONAMA Nº 003, de 28 de junho de 1990 24

Tabela 2: Concentração dos poluentes segundo a resolução CONAMA Nº 491, de 19 de novembro de 2018..... 26

Tabela 3: Situação atual e a desejada da Resolução CONAMA nº 005/1989. 29

Tabela 4: Situação atual e a desejada da Resolução CONAMA nº 491, de 2018. 30

Tabela 5: Composição relativa de alguns gases minoritários presentes na atmosfera limpa 33

Tabela 6: Resumo dos impactos do material particulado observados em diferentes estudos 42

Tabela 7: Tendência via teste de Mann-Kendall aplicado aos valores médios diários dos poluentes atmosféricos para o estado de Alagoas, à um nível de significância de 95%. 63

Tabela 8: Principais poluentes atmosféricos, suas fontes, áreas de ação no sistema respiratório e efeitos sobre a saúde humana 72

Tabela 9: Correlação de Pearson para médias anuais das variáveis meteorológicas temperatura, precipitação e velocidade do vento, para a mesorregiões Sertão, nos anos de 2000 a 2019. 75

Tabela 10: Correlação de Pearson para as médias anuais das variáveis meteorológicas temperatura, precipitação e velocidade do vento, para a mesorregiões Agreste, nos anos de 2000 a 2019. 76

Tabela 11: Correlação de Pearson para as médias anuais das variáveis meteorológicas temperatura, precipitação e velocidade do vento, para a mesorregiões Leste, nos anos de 2000 a 2019. 76

Tabela 12: Correlação de Pearson para as médias mensais das variáveis meteorológicas temperatura, precipitação e velocidade do vento, para a mesorregiões Sertão, nos anos de 2000 a 2019. 79

Tabela 13: Correlação de Pearson para as médias mensais das variáveis meteorológicas temperatura, precipitação e velocidade do vento, para a mesorregiões Agreste, nos anos de 2000 a 2019. 81
Tabela 14: Correlação de Pearson para as médias mensais das variáveis meteorológicas temperatura, precipitação e velocidade do vento, para a mesorregiões Leste, nos anos de 2000 a 2019 82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AOD - Atmospheric Optical Depth

AVHRR – Advanced Very High-Resolution Radiometer

BaP – Benzopiren

CAMS - Copernicus Atmosphere Monitoring Service

CGA - circulação geral da atmosfera

CID-10 - Classificação Internacional de Doenças

CIDACS - Centro de Integração de Dados e Conhecimentos para Saúde

CM - Camada de Mistura

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

COVs - Compostos Orgânicos Voláteis

CPQP - Cadeia Produtiva da Química e do Plástico

CV - Coeficiente de Variação

DGI - Divisão de Geração de Imagens

DILIC - Diretoria de Licenciamento

DOLs - Distúrbios Ondulatórios de Leste

DP - Desvio-Padrão

ECMWF - European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

EUA – Estados Unidos da América

FIOCRUZ - Fundação Oswaldo Cruz

GOES - Geostationary Operational Environmental Satellite

HPA's - Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos

IARC - Agência Internacional de Pesquisa sobre o Câncer

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IDW - Inverse Distance Weighted

IMA - Instituto do Meio Ambiente

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IV - Infravermelho Visível

IPP - Índice de Precipitação Padronizado

MERRA- Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications version

METOP - Meteorological Operational Satellite Programme

MMA – Ministério do Meio Ambiente

MODIS - Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

MS - Ministério da Saúde

MSG - Meteosat de Segunda Geração

NASA - National Aeronautics and Space Administration

NEB - Nordeste do Brasil

NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration

NPP-Suomi - Suomi National Polar-orbiting Partnership

OECD -Organization For Economic Co-Operation and Development

OMS - Organização Mundial da Saúde

ONU - Organização das Nações Unidas

Opas - Organização Pan-Americana de Saúde

PAN - Nitrato de Peróxiacila

PCA - Polo Cloroalcoolquímico de Alagoas

PF – Padrão Final

PM - Material Particulados

PNLA - Procedimentos de Licenciamento Ambiental do Brasil PNLA

POAS - complementa com Perturbações Ondulatórias no campo dos ventos Alísios

PPCDQ-MA Plano de Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia

PRONAR - Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar

PVC - Polímero de Adição Policloreto de Vinila

RPPNs - Reservas Particulares do Patrimônio Natural

SEMARH - Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos

SF - Sistemas Frontais

SISAM - Sistema de Informações Ambiental Integrado à Saúde Ambiental

SNIF - Sistema Nacional de Informações Florestais

SPI - Standardized Precipitation Index

UC - Unidades de Conservação

UMD - Universidade de Maryland

UV - Ultravioleta

VCAN - Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis

VIIRS - Visible Infrared Imaging Radiometer Suite

WHO - World Health Organization

WRPLOT - Wind Rose Plots for Meteorological Data

ZCAS - Zona de Convergência do Atlântico Sul

ZCIT - Zona de Convergência Intertropical

RESUMO

Este estudo avaliou a distribuição espaço-temporal dos impactos das concentrações de poluentes atmosféricos nos municípios de Alagoas. No estudo foram utilizados dados estimados de $PM_{2.5}$, O_3, SO_2, NO_2 e CO, com resolução de 6 horas, oriundos do Sistema de Informações Ambientais Integrado à Saúde Ambiental (SISAM), em um período de vinte anos (2000-2019), sendo os dados submetidos a estatística aplicada (descritiva, exploratória e não-paramétrica) e espacializados via SIG com base no método IDW (*Inverse Distance Weighted*). Os resultados revelaram uma tendência significativa de diminuição na mesorregião do Sertão Alagoano para $PM_{2.5}$, SO_2, NO_2 e CO via teste de Mann-Kendall (MK). As concentrações de $PM_{2.5}$ atingiram os seguintes valores: 1.191,00 µg/m³ em Delmiro Gouveia em 2000, seguido de 686 µg/m³ em Mata Grande em 2001e 999 µg/m³ em Feliz Deserto em 2002. Tais valores violaram o limite de padrão de qualidade do ar (PQAr) do CONAMA e OMS. As concentrações anuais de $PM_{2.5}$ violaram PQAr, com 20,00 µg/m³ entre os anos 2000 a 2002, segundo as recomendações do CONAMA (10 µg/m³) de 2018 e OMS (5 µg/m³) de 2021, porém dentro dos limites se comparado ao ano de 1990 para o CONAMA (50 µg/m). O CO, com 0,008 ppm, e o NO_2, com 0,0008 ppm, foram baixos e estáveis, enquanto o SO_2 obteve valores médios anuais abaixo da mediana. O poluente O_3 obteve um aumento significativo de 176,9% a partir de 2003, no entanto, dentro dos limites de PQAr. A análise mensal das correlações mostra que as variáveis meteorológicas têm um impacto significativo na concentração de poluentes em comparação a escala anual, onde a sazonalidade desempenha um papel crucial. A precipitação é eficaz na redução das concentrações de CO e O_3, enquanto a temperatura interfere na concentração de poluentes, que depende da região e do poluente. Medidas de controle e políticas públicas são essenciais para melhorar a qualidade do ar e proteger a saúde pública, especialmente no Leste e o Agreste de Alagoas que registram altas taxas de mortalidade por doenças respiratórias e cardiovasculares, as quais podem ter sido agravadas por poluentes atmosféricos. Os resultados apresentados indicam a necessidade urgente de implantação de estações de monitoramento e qualidade do ar, uma vez que não há medidas ou relatórios de qualidade do ar disponíveis em Alagoas.

Palavras-chaves: Qualidade do ar, poluição atmosférica, saúde pública, SISAM.

ABSTRACT

This study evaluated the spatiotemporal distribution of the impacts of atmospheric pollutant concentrations in the municipalities of Alagoas. The study used data on $PM_{2.5}$, O_3, SO_2, NO_2, and CO, with a resolution of 6 hours, from the Integrated Environmental Information System for Environmental Health (SISAM), over a twenty-year period (2000-2019). The data were subjected to applied statistics (descriptive, exploratory, and non-parametric) and spatialized via GIS based on the IDW (Inverse Distance Weighted) method. The results revealed a significant decreasing trend in the Sertão Alagoano mesoregion for $PM_{2.5}$, SO_2, NO_2, and CO via the Mann-Kendall (MK) test. $PM_{2.5}$ concentrations reached the following values: 1,191.00 µg/m³ in Delmiro Gouveia in 2000, followed by 686 µg/m³ in Mata Grande in 2001, and 999 µg/m³ in Feliz Deserto in 2002. These values violated the air quality standard (AQS) limits set by CONAMA and WHO. Annual $PM_{2.5}$ concentrations violated AQS, with 20.00 µg/m³ between 2000 and 2002, according to CONAMA (10 µg/m³) recommendations from 2018 and WHO (5 µg/m³) from 2021, but were within limits compared to 1990 for CONAMA (50 µg/m³). CO, at 0.008 ppm, and NO_2, at 0.0008 ppm, were low and stable, while SO_2 had annual average values below the median. O_3 showed a significant increase of 176.9% from 2003, but remained within AQS limits. Monthly correlation analysis shows that meteorological variables have a significant impact on pollutant concentrations compared to the annual scale, where seasonality plays a crucial role. Precipitation is effective in reducing CO and O_3 concentrations, while temperature affects pollutant concentrations, depending on the region and pollutant. Control measures and public policies are essential to improve air quality and protect public health, especially in the East and Agreste of Alagoas, which record high mortality rates from respiratory and cardiovascular diseases, which may have been aggravated by atmospheric pollutants. The results presented indicate the urgent need to implement air quality monitoring stations, as there are no air quality measures or reports available in Alagoas.

Keywords: Air quality, atmospheric pollution, public health, SISAM.

SUMÁRIO

pág.

1. INTRODUÇÃO 09

2. OBJETIVOS 12

2.1 Objetivo Geral 12

2.2 Objetivo Específico 12

3. JUSTIFICATIVA 13

4. REVISÃO DA LITERATURA 14

4.1. SISAM 14

4.2. CIDACS 15

4.3. Queimadas dos biomas no Nordeste NEB 16

4.4. Poluentes atmosféricos e Qualidade do Ar 18

4.5. Relação das variáveis meteorológicas com a poluição atmosférica 20

4.6. LEGISLAÇÃO AMBIENTAL 21

4.6.1. Organização Mundial de Saúde – OMS 21

4.6.2. Legislação da CONAMA 22

4.6.3. PRONAR 27

4.6.4. Legislação de Alagoas 30

5. POLUENTES ATMOSFÉRICOS 31

5.1. Monóxido de Carbono (CO) 34

5.2. Ozônio (O_3) 36

5.3. Dióxido de Enxofre (SO_2) 37

5.4. Dióxido de Nitrogênio (NO_2) 39

5.5. Material Particulado ($PM_{2.5}$) 40

6. MATERIAL E MÉTODOS 44

6.1. Localização e Caracterização da Área de Estudo. 44

6.2. Estatística Aplicada 46

6.3. Teste não paramétrico de Mann-Kendall 47

6.4. Teste não paramétrico de Pettitt 48

6.5. Coeficiente de Correlação de Pearson (r) 49

6.6. Modelo de Interpolação Espacial 50

6.7. ERA5 50

6.8. WRPLOT 50

6.9.SPI.....51
7. RESULTADOS E DISCUSSÃO 51
7.1. Análise Estatística dos Poluentes 51
7.2. Análise das médias diárias e anuais 60
7.3. Teste de Mann-Kendall e Pettit.....63
7.4. Padrões Relacionais Entre Variáveis Meteorológicas e os Poluentes Atmosféricos 74
7.5. Rosa de poluição. 82
7.6. Dados da saúde – Datasus.....85
8. CONCLUSÃO 89
9. RECOMENDAÇÕES 91
10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 92

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, conforme o Art. 6º, a União, por intermédio do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) estabelece os Padrões de Qualidade do Ar (PQAr), onde o CONAMA desempenha um papel consultivo e deliberativo no âmbito do Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA) que faz parte do Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar (PRONAR). Este programa foi criado pela Lei nº 6.938/81, que dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, sendo posteriormente regulamentada pelo Decreto nº 99.274/90 (CONAMA, 1990).

Para os PQArs, estabeleceu-se que quando as concentrações dos poluentes atmosféricos ultrapassarem certos limites, poderão afetar a saúde, a segurança e o bem-estar da população, bem como ocasionar danos à flora e à fauna, aos materiais e ao meio ambiente em geral. Nesse contexto, foi criada a Rede Nacional de Monitoramento da Qualidade do Ar, baseada nas diretrizes da Organização Mundial da Saúde (OMS), e assim instituiu o PRONAR(CONAMA 1990).

A qualidade do ar refere-se ao nível de poluentes atmosféricos aos quais a população está exposta, com destaque as emissões, a topografia e as condições meteorológicas da região, que podem ser favoráveis ou não à dispersão dos poluentes (França et al., 2012). A poluição atmosférica não prejudica apenas a saúde e a qualidade de vida das pessoas, mas também resulta em custos para o Estado, esses custos decorrem do aumento no número de atendimentos e internações hospitalares, bem como do aumento no consumo de medicamentos (MMA, 2023).

Os impactos dos poluentes atmosféricos na saúde humana juntamente com os PQAr's são fundamentais na formulação de políticas públicas e no monitoramento da poluição (Sant'anna et al., 2021). De acordo com a Organização Mundial de Saúde - OMS (2016), mais de 90% da população global respira ar de qualidade insatisfatória e enfrenta riscos diários, que resulta em aproximadamente 11,6% de todas as mortes no mundo, o que corresponde a 7 milhões de óbitos anuais, incluindo 600 mil crianças (Landrigan et al., 2018; WHO, 2018).

Os poluentes emitidos diretamente de uma fonte são denominados de primários, ao contrário, dos secundários que são formados a partir de reações com outros poluentes ou variáveis ambientais (Brait, 2008). Quanto a sua origem, os poluentes podem ser orgânicos, ligados ao carbono (C) e ao hidrogênio (H) ou inorgânicos como o gás sulfídrico (H_2S) e amônia (NH_3). Dentre esses poluentes, pode-se destacar os materiais particulados (MP) partículas finas 2.5 ($MP_{2.5}$) e grossas (MP_{10}), o dióxido de carbono

(CO_2), óxidos de nitrogênio (NOx), monóxido de carbono (CO), ozônio (O_3), aldeídos (RCOH), hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA's) entre outros (Brait, 2008).

Quando tratamos de fontes poluidoras oriundas das queimadas, incêndios florestais e urbanos, as consequências são graves tanto para o meio ambiente, quanto para a saúde no Brasil (Coelho et al., 2023). Queimada é uma prática comum, que já faz parte do contexto histórico, ela é implementada desde o período da colonização, sendo um modelo de produção registrada ao longo de séculos (Coelho et al., 2023). A OMS destaca os principais poluentes oriundos da queima da biomassa, sendo eles: Material Particulado ($MP_{2.5}$/MP_{10}), Monóxido de carbono (CO), Dióxido de nitrogênio (NO_2), fumaça (FMC), O_3, HPAs - (benzopireno – BaP) e dióxido de enxofre (SO_2) (Coelho et al., 2023).

No Nordeste do Brasil (NEB) encontra-se quatro (Caatinga, Mata Atlântica, Cerrado e Amazônico) dos seis biomas continentais encontrados no país (Correia Filho et al., 2019), e o estado de Alagoas possui dois biomas (Caatinga e Mata Atlântica) (Sousa Filho et al., 2022). Estudos realizado por Coelho e Serralha (2023) constataram o aumento da área queimada na Caatinga, entre 2000 e 2019. Vale destacar que apenas 3% da Caatinga possui área de preservação, de acordo com o Sistema Nacional de Informações Florestais - SNIF, sendo mais de um terço destas, de proteção integral.

No estado de Alagoas existem 97 Unidades de Conservação (UC), sendo 86 na Mata Atlântica e 11 na Caatinga. Do total, 80 foram criadas em âmbito estadual, e vale destacar a inclusão de 77 Reservas Particulares do Patrimônio Natural (RPPNs). Isso significa que 11,66% (324.593,58 ha) do território alagoano está protegido por UC, sendo 14% (208.352,51 ha) na Mata Atlântica e 9% (116.241,06 ha) na Caatinga (IMA, 2022). Mesmo assim, segundo os dados do Instituto do Meio Ambiente (IMA), entre janeiro e abril em 2021 foram registrados 110 focos de queimada, apenas na Caatinga, somando nos últimos dois anos no mesmo período 33 focos em 2020 e 63 focos em 2019. Em Alagoas o uso do fogo só é permitido em áreas rurais e apenas em alguns tipos de atividades como práticas agrícolas, pastoris ou florestais, mediante a autorização de queima controlada, segundo a Lei Estadual nº 7.454/2013 (IMA, 2020).

Todas essas ações de queimadas, juntamente com atividades industriais, processos de geração de energia, veículos automotores, entre outras ações antrópicas estão associados ao aumento da poluição atmosférica, podendo ser definida como qualquer forma de matéria ou energia com intensidade, concentração, tempo ou características que possam tornar o ar impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde (MMA 2023).

Em Maceió, o aumento da poluição está diretamente relacionado ao crescimento da frota de veículos. Estudos realizados por Silva e Silva Júnior (2008) na cidade revelaram que a área do centro, que concentra o maior número de veículos, apresentou os níveis mais elevados de dióxido de nitrogênio (NO_2) e ozônio (O_3). Esses dados sugerem que regiões com maior densidade de automóveis podem ultrapassar os limites estabelecidos pelas regulamentações ambientais (Silva e Silva Júnior, 2008).

Outro estudo buscou projetar cenários futuros para a cidade, realizando uma análise das tendências de aumento das emissões de poluentes atmosféricos, principalmente o monóxido de carbono (CO), um produto da combustão incompleta, emitido por veículos leves Esse estudo foi realizado em três cenários diferentes e em todos ocorre o aumento da concentração de CO ou de material particulado (PM) e hidrocarbonetos não metano (NMHC). O aumento das concentrações desses poluentes em todos os cenários projetados sugere um risco crescente à saúde pública (Silva et al., 2024).

2. OBJETIVOS

2.1 Geral

- **AVALIAR** os impactos das concentrações de poluentes atmosféricos na qualidade do ar nos municípios do estado de Alagoas.

2.2 Específicos

- **IDENTIFICAR** a variabilidade das concentrações de poluentes nos municípios de Alagoas e comparar com os limites estabelecidos nas resoluções CONAMA 1990, 2018 e OMS 2021 em relação aos PQAr.

- **ANALISAR** comparativamente os dados de poluição e óbitos por doenças cardíacas pulmonares causadas por agentes externos.

- **CARACTERIZAR** o padrão de concentração de cada poluente via rosa de poluição e identificar aqueles que se distingue em grau de poluição.

3. JUSTIFICATIVA

Em Alagoas, a qualidade do ar não é monitorada, e nenhum dos órgãos ambientais estaduais ou municipais conduz esse tipo de análise, principalmente via estações de monitoramento e qualidade do ar (EMQAr). Isso coloca a população em risco de exposição dos poluentes atmosféricos que podem atingir concentrações superiores aos limites recomendados pelo CONAMA, incluindo situações críticas. Portanto, a investigação, quantificação e monitoramento dessas concentrações tornam-se uma questão crucial de saúde pública e ambiental.

O aumento das emissões de poluentes oriundos de veículos automotores e das atividades antrópicas, junto ao avanço industrial e a expansão das áreas urbanas, representam um risco ambiental para a saúde pública. Em 2021, a OMS estimou que anualmente, 7 milhões de mortes prematuras em todo o mundo estão associadas a essa causa (OMS, 2021). Reduzir os níveis de poluentes atmosféricos pode diminuir significativamente a incidência de doenças cardíacas, respiratórias e de câncer (Lisboa e Rodrigues, 2013).

4. REVISÃO DA LITERATURA

4.1 SISAM

O Sistema de Informações Ambientais Integradas à Saúde Ambiental (SISAM), iniciado originalmente em 2008, é resultado de uma colaboração entre a Fundação Oswaldo Cruz (Fiocruz), o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), o Ministério da Saúde (MS) e a Organização Pan-Americana de Saúde (OPAS/OMS). Essa plataforma on-line (https://agencia.fiocruz.br/print/11969) viabiliza a avaliação de níveis de poluição atmosférica e seus impactos na saúde humana, fornecendo não apenas dados recentes sobre estimativas de concentrações de poluição atmosférica, poluição urbana e industrial, mas também o monitoramento de focos de queimadas e dados meteorológicos retroativos entre os anos de 2000 e 2019 para todos os municípios do Brasil (FIOCRUZ, 2019).

No SISAM são empregados dez satélites equipados com sensores orbitais na faixa termal-média de 4µm para obtenção dos focos de calor. Esses dados são processados operacionalmente, na Divisão de Geração de Imagens (DGI) e na Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais, com base nas imagens dos satélites de órbitas polares, onde inclui-se as AVHRR/3 dos NOAA-18, 19 e 20, METOP-B e C, MODIS da TERRA e AQUA, e VIIRS do NPP-Suomi. Utiliza-se também as imagens de satélites geoestacionários, tais como, GOES-16 e MSG-3 (INPE, 2023).

Esses dados conhecidos como de focos de referência são divulgados pelo INPE e, eles coincidem com o conjunto de focos da NASA e da Universidade de Maryland (UMD) dos EUA denominada "Collection 6", que os produzem desde 2016 em substituição à "Collection 5" para todo o planeta. Baseado nisso o INPE fez o mesmo com sua base de dados de focos oriundos do MODIS (plataformas orbitais - AQUA e TERRA) no mês de março/2017. Ocorreu então uma substituição de toda a base de focos, exigindo o reprocessamento de todas as milhares de imagens pretéritas, seguido da evolução dos algoritmos de extração de focos das imagens e assim produtos mais confiáveis (INPE, 2023).

Para os satélites ambientais em órbita polar (NOAA a 800 km acima da superfície, e TERRA e AQUA a 710 km), trabalhos de validação de campo indicam que uma frente de fogo com cerca de 30 m de extensão por 1 m de largura, ou maior, será detectada. Para os geoestacionários, a 36 mil km de distância, a frente de fogo precisa ter o dobro de tamanho

para ser localizada. Já os recentes satélites, NPP-SUOMI e NOAA-20, com seu sensor VIIRS de resolução espacial 375 m, conseguem detectar áreas de alguns m^2 queimando no período noturno. Cada satélite de órbita polar produz pelo menos dois conjuntos de imagens por dia, enquanto os geoestacionários geram seis imagens por hora, sendo que no total o INPE processa automaticamente mais de 200 imagens por dia especificamente para detectar focos de queima da vegetação (INPE, 2023).

O uso de todos os focos de calor dos vários satélites é recomendado quando é relevante toda e qualquer detecção de fogo, como no monitoramento de uma área de proteção ou de interesse específico (produção de madeira ou linhas de transmissão) e no acompanhamento do avanço de frentes de fogo, contribuindo para a construção de séries temporárias ao longo dos anos. Facilitando a análise de tendências em números de focos de calor, entre diferentes regiões, durante períodos de interesse (INPE, 2023).

O cálculo das concentrações e das dispersões das emissões das queimadas são extraídas no período de 2000 a 2002, segundo o Modelo MERRA-2, no período de 2003 a 2017, do Modelo CAMS-Reanalysis e no período de 2018 e 2019 o modelo CAMS-Nrealtime. O MERRA-2 (Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications version 2) é o produto da NASA (National Aeronautics and Space Administration). Os dados do MERRA-2 possuem resolução espacial de 0,25 graus (aproximadamente 25 km) e interpolados na resolução espacial de 12,5 km, para os anos de 2000 até 2002. A resolução temporal é de 6 horas (INPE, 2023).

Os modelos CAMS (Copernicus Atmosphere Monitoring Service), CAMS-Reanalysis (2019) e CAMS-Nrealtime (2019) são produtos do centro europeu ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). Os dados possuem resolução espacial de 0,125 graus (aproximadamente 12,5 km) para os anos de 2003 até o presente. Os dados são de "AOD" (Atmospheric Optical Density) 469 µm e a resolução temporal de 6 horas (ECMWF, 2019; INPE, 2023).

4.2 CIDACS

O Centro de Integração de Dados e Conhecimentos para Saúde (CIDACS), localizado na Bahia e vinculado à Fundação Oswaldo Cruz (Fiocruz), desenvolve estudos e pesquisas interdisciplinares com base na vinculação de grandes volumes de dados.

Utilizando tecnologias avançadas, como alta capacidade computacional e soluções em segurança da informação, o CIDACS emprega principalmente a integração de bancos de dados governamentais. O cruzamento dessas diversas bases de dados é realizado através de algoritmos de vinculação desenvolvidos pela equipe do centro, juntamente com outras técnicas, como mineração de dados e aprendizado de máquina, com o potencial de produzir informações inéditas no campo da saúde (CIDACS, 2023).

O CIDACS mantém parcerias intelectuais internacionais e capta recursos por meio de projetos de pesquisa com instituições dos Estados Unidos e do Reino Unido. Essas colaborações favorecem e estimulam a produção científica e tecnológica em aspectos relevantes para a saúde da população e para o Sistema Único de Saúde (SUS). Os dados disponíveis no CIDACS são oriundos do Sistema de Informações sobre Mortalidade (SIM), gerido pelo Departamento de Análise de Situação de Saúde da Secretaria de Vigilância em Saúde (SVS), em conjunto com as Secretarias Estaduais e Municipais de Saúde. O Sistema de Informações sobre Mortalidade coleta aproximadamente 40 variáveis das declarações de óbito, muitas delas específicas para óbitos fetais e de menores de 1 ano (CIDACS, 2017).

Desde 1996, as declarações de óbito são codificadas utilizando a 10ª Revisão da Classificação Internacional de Doenças (CID-10). O DATASUS e a SVS disponibilizam as principais informações para tabulação sobre as bases de dados do SIM através da Internet, facilitando o acesso e a análise desses dados para fins de pesquisa e políticas públicas (CIDACS, 2017).

O Cidacs possui um projeto em andamento para criação da plataforma climática e ambiental onde reunirá dados climáticos, ambientais e de saúde, possibilitando análises que consideram múltiplos fatores e suas interações complexas. Isso é essencial para compreender como mudanças climáticas e fatores ambientais afetam a saúde das populações (CIDACS, 2022).

4.3 Queimadas dos biomas no NEB

Os incêndios florestais têm uma vasta incidência ao longo dos biomas, das UC, das áreas de reflorestamento, das fazendas, ou até mesmo margens de estradas e proximidades

de aglomerados urbanos, ocasionando, em muitos casos, diversos prejuízos ecológicos, paisagísticos e econômicos (Costa et al., 2009).

Vale destacar que as ações das queimadas culminam na alteração das características do solo, do ar e água, bem como na perda da diversidade biológica de sua fauna e flora (Santos et al., 2017). Essas práticas ainda, intensificam o processo de desertificação, erosão do solo e o assoreamento dos rios dessa região (Siqueira Filho, 2012).

A Caatinga sofre sistemático crescimento da degradação. Com o avanço do desmatamento e a mudança do uso e cobertura do solo, potencializou-se a fragilidade do ambiente. Estudos mostram que os estados com maiores áreas atingidas por fogo foram a Bahia e o Piauí, entre o ano 2000 e 2019 (Vieira, 2021). O estado de Alagoas é abrangido por dois Biomas principais: A Mata Atlântica e a Caatinga. O domínio da Mata Atlântica chega a cobrir aproximadamente 56,21% do Estado (IMA, 2019).

A Mata Atlântica Alagoana realizou, ao longo de 500 anos de colonização e ocupação, um processo gradual de exploração desordenada. Esse ciclo teve início com a retirada indiscriminada do Pau-Brasil (*Caesalpina echinata*) e outras madeiras nobres. A exploração foi contínua com a chegada do ciclo da cana-de-açúcar, marcado pela implantação de engenhos açucareiros. Com o avanço da modernização, esses engenhos se transformaram em agroindústrias açucareiras, impulsionando uma rápida expansão das fronteiras agrícolas em paralelo ao crescimento dos centros urbanos. Esse processo resultou em uma redução contínua na cobertura vegetal da área original (RBMA, 2004).

O IMA mostrou um estudo de monitoramento do foco de queimadas do Bioma Caatinga no estado de Alagoas entre os anos de 2006 e 2016, onde baseado em dados de imagens de satélites, mostram que houve um aumento de 30,5% nos focos de queimadas no intervalo de tempo analisado, passando de 400 para 522 eventos registrados tanto em áreas agrícolas quanto em áreas de vegetação nativa. Em relação a essas ocorrências, nos fragmentos de vegetação nativas, o aumento de focos de queimadas é considerado alto, uma vez que correspondem a mais de 210%, o que tem mostrado que as atividades antrópicas não têm poupado os poucos remanescentes vegetacionais da caatinga alagoana (IMA, 2017). O resumo das ocorrências dos focos de queimadas do dia 08 a 14 de outubro de 2023 disponibilizado pelo IMA, mostraram que foram monitorados 151 focos de queimada, sendo que 11 focos foram no Bioma Caatinga, Correspondendo a 34% que afetam essa vegetação.

Estudos feitos pela Fundação SOS Mata Atlântica em parceria com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), reunindo dados de 2018 e 2019, onde Alagoas está entre os nove estados com queda no nível de supressão da vegetação, conquistando um destaque inédito, zerou o desmatamento do bioma Mata Atlântica. O relatório aponta, no entanto, perda de 27,2% da Mata Atlântica em território nacional. Os maiores desmatamentos continuam acontecendo nas regiões mais críticas: nas áreas interioranas, limite com o Cerrado em Minas Gerais e Bahia e nas região centro-sul no Estado do Paraná (IMA, 2020).

O trabalho realizado por Vieira (2021), constatou o aumento da área queimada nos domínios do bioma Caatinga, entre 2000 e 2019. No primeiro ano do estudo (2000), a área atingida por fogo correspondia à aproximadamente 0,05% da área total da Caatinga, cerca de 407, 84 km². No último ano deste estudo (2019), as áreas avançaram para 0,73% da área total do bioma, um total de 6.201,90 km2. Em Alagoas a caatinga pode ser encontrada em toda região do sertão e parte do agreste de Alagoas De acordo com os dados do IMA em 2019, os maiores focos de queimadas de biomassa estão localizados na região do Agreste e Leste.

A instrução normativa IMA/AL Nº 02, de 16 de agosto de 2017, autoriza o uso do fogo controlado, considerando que, de acordo com os preceitos contidos no inciso I do artigo 38 da Lei Federal 12.651 de 25 de maio de 2012, a aprovação da utilização do uso de fogo em práticas agropastoris e florestais é de competência do Instituto do Meio Ambiente de Alagoas- IMA, como Órgão Ambiental Estadual.

4.4 Poluentes atmosféricos e Qualidade do Ar

A composição química da atmosfera varia verticalmente de acordo com as suas camadas (Troposfera, Estratosfera, Mesosfera e Termosfera), bem como a densidade, pressão e temperatura. No geral, os principais constituintes da atmosfera são N_2, O_2, vapor d'água (H_2O), argônio (Ar) e CO_2 (Lenzi; Favero, 2014).

Os principais poluentes primários monitorados no Brasil e pelas principais agências ambientais em todo o mundo são óxidos de nitrogênio (NO_2 ou NOx), compostos orgânicos voláteis (COVs), monóxido de carbono (CO) e dióxido de enxofre (SO_2). Um exemplo de poluente secundário é o ozônio (O_3), formado a partir da reação química

induzida pela oxidação fotoquímica dos COVs e do NO_2 na presença de raios ultravioleta provenientes da luz solar (Santos et al., 2019).

O material particulado (MP) varia em número, tamanho, formato, área de superfície e composição química, dependendo do local de sua produção e da fonte emissora. Os efeitos deletérios sobre a saúde humana produzidos pelo MP dependem de sua composição química e de seu tamanho. O MP é formado por múltiplos constituintes químicos, incluindo um núcleo de carbono elementar ou orgânico, compostos inorgânicos, como sulfatos e nitratos, metais de transição sob a forma de óxidos, sais solúveis, compostos orgânicos, como hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, e material biológico, como pólen, bactérias, esporos e restos animais. O MP é classificado de acordo com o seu tamanho em partículas totais em suspensão: partículas com até 30 μm de diâmetro; partículas com diâmetro inferior a 10 μm (MP10 ou fração inalável); partículas com diâmetro inferior a 2,5 μm (MP 2,5 ou fina); e partículas com diâmetro menor que 10 nm (MP 0,1 ou ultrafina) (Santos et al., 2019).

De acordo com os dados da Organização Mundial da Saúde (OMS), a poluição do ar foi responsável por sete milhões de mortes em 2016 (WHO, 2019). A interação entre as fontes de poluição e a atmosfera vai definir o nível de qualidade do ar, e os efeitos adversos sobre quem o inalam (Lisboa, 2014). Nogarotto (2020), demostra que no ano de 2015 a exposição ao $MP_{2,5}$ levou a mortalidade de 260.274 a cada 1.000.000 de habitantes no Brasil. Nos EUA e Europa esse índice sobe para 275.183, 505.464 respectivamente, a cada 1.000.000 de habitantes (OECD, 2018).

Como medida de segurança, diversos países têm estabelecido padrões de qualidade do ar para os poluentes atmosféricos, baseados nas diretrizes publicadas pela OMS (WHO, 2005) e que podem ser entendidos como valores de concentração do poluente na atmosfera associado a um intervalo de tempo de exposição em que se preserve a qualidade de vida e do meio ambiente em relação aos riscos de danos causados pela poluição atmosférica (Brasil, 2018).

De acordo com Menezes (2006), os poluentes, quando lançados na atmosfera, são submetidos aos efeitos de dispersão, transporte e turbulência atmosférica e aos processos de reatividade química, seja por meio da reação com outros poluentes ou com a umidade ambiente, sedimentação ou deposição. As condições climáticas são as principais responsáveis pela dispersão dos poluentes (GOMES, 2011).

Alguns problemas atuais ligados à qualidade do ar foram expostos pela Organização das Nações Unidas (ONU) no relatório denominado *Ambient Air Pollution: A Global Assesment of Exposure and Burden of Disease,* publicado em 2016. Em 2022 a Organizações das Nações Unidas, publicou uma nota sobre condições impróprias de ar, que a maior parte da população mundial estria respirando e ressalta que segundo o relatório divulgado pela OMS, aponta que exposição ao ar impuro aumenta danos à saúde humana, mesmo em baixos níveis. Cerca de 92% da população global vive atualmente em áreas onde os níveis de qualidade do ar ultrapassam os limites mínimos estabelecidos pela OMS (Castelhano, 2021).

No caso dos riscos ligados à qualidade do ar, Branco e Murgel (2004) classificam em três grupos ligados aos seus efeitos: i) estéticos, ii) tóxicos e iii) irritantes. Efeitos estéticos são as consequências que os poluentes em suspensão na atmosfera causam nas estruturas físicas construídas, provocando desgaste de materiais, perda de cor ou, apenas, sujando as estruturas (Reyes et al., 2011; Venkat Rao et al., 2014). Os efeitos irritantes são menos danosos, causando ardência e incómodo principalmente nas mucosas e olhos (Murgel & Branco, 2004). Os efeitos tóxicos são aqueles que trazem consequências extremas à saúde em virtude de envenenamento por gases tóxicos, atingindo os sistemas respiratórios, cardiovascular e nervoso, dependente do poluente e do seu nível de concentração (Castelhano, 2021).

4.5 Relação das variáveis meteorológicas com a poluição atmosférica

O processo de poluição atmosférica começa com a emissão de emissões de fontes, as quais são transportadas pelas parcelas de ar (ou massa de ar, a depender da escala) até alcançarem um receptor. Cada poluente possui características específicas de dispersão na atmosfera. À medida que a distância entre a fonte emissora e o receptor aumenta, a concentração de ambientes nas proximidades do receptor tende a diminuir. Condições adversas, mesmo com emissões de poluentes semelhantes, podem resultar em concentrações atmosféricas muito diferentes, devido à influência das condições atmosféricas na dispersão dos poluentes (Damilano, 2006).

As condições atmosféricas são fatores cruciais na determinação do nível de poluição atmosférica, pois influenciam o tempo de permanência das substâncias poluentes no local onde foram lançadas. Quando os contaminantes são emitidos para a atmosfera terrestre,

são afetados por variáveis como velocidade e direção do vento, taxas de variação, temperatura e instabilidade do ar, entre outras. A interação das interferências com essas variáveis, ou seja, com o perfil climático de um local, determinará se permanecerão no ar na forma emitida, se alterarão sua composição ou se serão dispersos para outro local (Guerra e Miranda, 2011).

A circulação geral da atmosfera (CGA) também interfere na dispersão, uma vez que a movimentação das grandes massas de ar afeta a circulação local. O regime dos ventos, a umidade do ar, a radiação solar, a temperatura ambiente, a estabilidade atmosférica e a ocorrência de chuvas são alguns fatores climáticos locais, que podem interferir no tempo de permanência dos poluentes na atmosfera (National Research Council, 2010).

Guerra e Miranda (2011) explicam que, características específicas da microescala, como topografia, presença de edifícios, tipo de solo e quantidade e tipo de vegetação, também influenciam a trajetória das regiões poluentes na atmosfera. Essas características locais têm a capacidade de modificar o microclima de uma determinada área, resultando na formação de características como as ilhas de calor. Esse microclima alterado em relação às áreas adjacentes pode tornar a dispersão das impurezas mais fácil ou mais difícil, impactando a qualidade do ar na região específica.

4.6 Legislação Ambiental

4.6.1 Organização Mundial de Saúde - OMS

Desde 1987, a OMS vem publicando periodicamente diretrizes de qualidade do ar baseadas na saúde para assessorar os governos e a sociedade civil a reduzirem a exposição humana à poluição atmosférica e seus efeitos adversos. A última publicação havia sido em 2006: a diretriz Air quality guidelines – global update 2005. Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide (Escritório Regional da OMS para a Europa, 2006) apresentava valores-guia baseados na saúde para os principais poluentes atmosféricos prejudiciais à saúde, incluindo partículas inaláveis ou material particulado (MP), ozônio (O_3), dióxido de nitrogênio (NO_2) e dióxido de enxofre (SO_2). Essa versão das diretrizes teve um impacto significativo (OMS, 2021).

Em 2019, mais de 90% da população mundial vivia em áreas onde as concentrações excediam os níveis das diretrizes da OMS de 2005 para exposição a longo prazo a $PM_{2,5}$.

O objetivo das diretrizes é que todos os países atinjam os níveis recomendados de qualidade do ar. Quase 80% das mortes relacionadas com $PM_{2,5}$ poderiam ser evitadas a nível mundial se os atuais níveis de poluição atmosférica fossem reduzidos aos propostos em diretrizes atualizadas. A OMS revisou no ano passado suas Diretrizes de Qualidade do Ar, tornando-as mais rigorosas em um esforço para ajudar os países a avaliar melhor a qualidade de seu próprio ar (OMS, 2022).

A elevada concentração de poluentes é resultado do trânsito de veículos, das indústrias e de outros setores que, por estarem localizados em uma área específica, acabam contribuindo para os altos níveis de poluição (Tibulo et al., 2020). Segundo Monte, Albuquerque e Reisen (2015), a industrialização, juntamente com o crescimento populacional, especialmente nas áreas urbanas, tem aumentado as preocupações ambientais.

A poluição atmosférica é uma das maiores ameaças ambientais à saúde humana, juntamente com as alterações climáticas. A melhoria da qualidade do ar pode reforçar os esforços de mitigação das alterações climáticas, enquanto a redução das emissões, por sua vez, melhorará a qualidade do ar. Ao esforçarem-se para atingir estes níveis de referência, os países estarão a proteger a saúde e a mitigar as alterações climáticas globais (OMS, 2021).

4.6.2 Legislação da CONAMA

Os parâmetros nacionais de qualidade do ar foram estabelecidos pelo CONAMA, em 1990 (Brasil, 1990), tendo por base a legislação norte americana em vigor datada da década de 1980, embora padrões estaduais de qualidade do ar já pudessem ser estabelecidos desde antes, como no caso de São Paulo que teve início em 1976 (Sant'Anna et al., 2021). Ainda que esses padrões de qualidade sejam o suporte de qualquer programa de controle de poluição de ar, são igualmente importantes as políticas e ferramentas que o transformarão em realidade. Portanto, é necessário um olhar tanto para a ambição dos padrões de qualidade do ar existentes quanto para a qualidade e implementação de políticas de melhorias desses padrões.

De acordo com o Art. 1º resolução CONAMA Nº 003, de 28 de junho de 1990, são padrões de qualidade do ar as concentrações de poluentes atmosféricos que,

ultrapassadas, poderão afetar a saúde, a segurança e o bem-estar da população, bem como ocasionar danos à flora e à fauna, aos materiais e ao meio ambiente em geral (CONAMA, 10190).

Entende-se como poluente atmosférico qualquer forma de matéria com intensidade e em quantidade, concentração, tempo ou características em desacordo com os níveis estabelecidos, e que tornem ou possam tornar o ar:

I. - Impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde;
II. - Inconveniente ao bem-estar público;
III. - Danoso aos materiais, à fauna e flora.
IV. - Prejudicial à segurança. ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade.

Sendo assim, os padrões de qualidade do ar serão o objetivo a ser atingido mediante à estratégia de controle fixada pelos padrões de emissão e deverão orientar a elaboração de Planos Regionais de Controle de Poluição do Ar (CONAMA, 1990).

Na tabela 1 abaixo, está representado os níveis de poluentes de acordo com o Art. 3º da resolução de 1990, para os seguintes padrões de qualidade do ar como: as partículas inaláveis, dióxido de enxofre (SO_2), monóxido de carbono (CO), ozônio (O_3), dióxido de nitrogênio (NO_2).

Em 19 de novembro de 2018 foi publicada a Resolução CONAMA nº 491 que dispõe sobre os padrões de qualidade do ar no Brasil. (Revogou a Resolução CONAMA nº 03/1990) (CONAMA, 2018).

Segundo a nova Resolução, padrão de qualidade do ar é um dos instrumentos de gestão da qualidade do ar, determinado como valor de concentração de um poluente específico na atmosfera, associado a um intervalo de tempo de exposição, para que o meio ambiente e a saúde da população sejam preservados em relação aos riscos de danos causados pela poluição atmosférica (CONAMA, 2018).

Em 19 de novembro de 2018 foi publicada a Resolução CONAMA nº 491 que dispõe sobre os padrões de qualidade do ar no Brasil. (Revogou a Resolução CONAMA nº 03/1990) (CONAMA, 2018).

Tabela 1: Concentrações dos poluentes segundo a resolução CONAMA Nº 003, de 28 de junho de 1990.

Poluentes Atmosféricos	Padrão	Período de Referência	Concentração	
			$\mu g/m^3$	ppm
Partículas Inaláveis ($PM_{2.5}$)	Primário e Secundário	Anual [1]	50	
		24h	150	
Dióxido de Enxofre (SO_2)	Primário	Anual [1]	80	0,0305
		24h	365	0,1391
	Secundário	Anual [1]	40	0,0152
		24h	100	0,0381
Monóxido de Carbono (CO)	Primário e Secundário	8h	10.000	9
		24h	40.000	35
Dióxido de Nitrogênio (NO_2)	Primário	Anual [1]	100	0,0531
		1h[2]	320	0,1700
	Secundário	Anual [1]	100	0,0531
		1h	190	0,1009
Ozônio (O_3)	Primário e Secundário	1h[2]	160 em 1h	0,0815

Fonte: CONAMA 1990. Adaptado pela autora.

1 - Média aritmética anual, 2 - Média horária, 3 - Máxima média móvel obtida no dia, 4 - Média geométrica anual e 5 - Medido nas partículas totais em suspensão.

Segundo a nova Resolução, padrão de qualidade do ar é um dos instrumentos de gestão da qualidade do ar, determinado como valor de concentração de um poluente específico na atmosfera, associado a um intervalo de tempo de exposição, para que o meio ambiente e a saúde da população sejam preservados em relação aos riscos de danos causados pela poluição atmosférica (CONAMA, 2018).

Essa resolução é dividida em duas categorias: I - padrões de qualidade do ar intermediários - PI: padrões estabelecidos como valores temporários a serem cumpridos em etapas; e II - padrão de qualidade do ar final - PF: valores guia definidos pela OMS em 2005.

Os parâmetros regulamentados pela legislação ambiental vigente são os seguintes:

- Partículas Totais em Suspensão (PTS);
- Partículas Inaláveis (MP_{10});
- Partículas Respiráveis ($MP_{2,5}$);
- Fumaça;
- Dióxido de Enxofre (SO_2);
- Monóxido de Carbono (CO);
- Ozônio (O_3);
- Dióxido de nitrogênio (NO_2);
- Chumbo (PB).

Segundo o CONAMA nº 491 /2018 os órgãos ambientais estaduais e distrital deverão elaborar, em até 3 anos a partir da entrada em vigor desta Resolução e garantir sua publicidade, um Plano de Controle de Emissões Atmosféricas que deverá ser definido em regulamentação própria. O Plano de Controle de Emissões Atmosféricas deverá conter:

- Abrangência geográfica e regiões a serem priorizadas;
- Identificação das principais fontes de emissão e respectivos poluentes atmosféricos;
- Diretrizes e ações com respectivos objetivos, metas e prazos de implementação.

O relatório deve conter os dados de monitoramento e a evolução da qualidade do ar, conforme conteúdo mínimo estabelecido, e resumo executivo, de forma objetiva e didática, com informações redigidas em linguagem acessível.

1. Descrição das características da região do estado e do Distrito Federal:
    - Condições Meteorológicas
    - Uso e ocupação do solo
2. Descrição da rede de monitoramento
3. Poluentes Atmosféricos monitorados
4. Redes de Monitoramento
5. Tipos de Rede e Parâmetros Monitorados
6. Metodologia de Monitoramento
7. Metodologia de Tratamento dos Dados
8. Representatividade de Dados
    - Rede Automática

- Rede Manual

9. Representatividade espacial das estações
10. Descrição das fontes de poluição do ar
11. Considerações gerais sobre estimativas de emissão de fontes móveis e fontes estacionárias
12. Apresentação dos resultados quanto aos poluentes
13. Medidas de gestão implementadas
14. Referências legais e bibliográficas

Na tabela 2 estão representados os níveis de poluentes de acordo resolução CONAMA Nº 491, de 19 de novembro de 2018, para os seguintes padrões de qualidade do ar como: dióxido de enxofre (SO_2), monóxido de carbono (CO), ozônio (O_3), dióxido de nitrogênio (NO_2), material particulado 10 (MP10) e material particulado 2.5 ($PM_{2.5}$).

Tabela 2: Concentração dos poluentes segundo a resolução CONAMA Nº 491, de 19 de novembro de 2018.

Poluentes Atmosféricos	Período de Referência	PI1	PI2	PI3	PF
		µg/m³ /ppm	µg/m³ /ppm	µg/m³ /ppm	µg/m³ /ppm
Partículas Inaláveis (PM)	Anual [1]	40	35	30	20
	24h	120	100	75	50
Partículas Inaláveis ($PM_{2.5}$)	Anual [1]	20	17	15	10
	24h	60	50	37	25
Dióxido de Enxofre (SO_2)	Anual [1]	40 / 0,015	30 / 0,011	20 / 0,008	
	24h	60 / 0,023	40 / 0,015	30 / 0,011	20 / 0,008
Monóxido de Carbono (CO)	8h[3]				9
Dióxido de Nitrogênio (NO_2)	1h[2]	260 / 0,138	240 / 0,128	220 / 0,117	200 / 0,106
	Anual [1]	60 / 0,032	50 / 0,027	45 / 0,024	40 / 0,021
Ozônio (O_3)	8h[3]	140 / 0,071	130 / 0,066	120 / 0,061	100 / 0,051

Fonte: CONAMA 2018. Adaptado pela autora.

1 - Média aritmética anual, 2 - Média horária, 3 - Máxima média móvel obtida no dia, 4 - Média geométrica anual e 5- Medido nas partículas totais em suspensão.

Os padrões de qualidade do ar segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), variam de acordo com a abordagem adotada para balancear riscos à saúde, viabilidade técnica, considerações econômicas e vários outros fatores políticos e sociais, que por sua vez dependem, entre outras coisas, do nível de desenvolvimento e da capacidade nacional de gerenciar a qualidade do ar (MMA,2018). As diretrizes recomendadas pela OMS levam em conta está heterogeneidade e, em particular, reconhecem que, ao formularem políticas de qualidade do ar, os governos devem considerar cuidadosamente suas circunstâncias locais antes de adotarem os valores propostos como padrões nacionais. (MMA,2018).

Em maio de 2022, o Plenário do Supremo Tribunal Federal (STF) determinou que o CONAMA edite, em 24 meses, uma nova resolução sobre padrões de qualidade do ar. A nova diretriz deve levar em consideração as diretrizes estabelecidas pela OMS em 2021 (Brasil, 2024).

4.6.3. PRONAR

No Brasil, o Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar (PRONAR) foi criado mais tarde, em 1989, pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente, como um dos instrumentos básicos da gestão ambiental para "proteção da saúde e bem-estar das populações com o objetivo de permitir o desenvolvimento econômico e social do país de forma ambientalmente segura" (PRONAR, 1989).

A estratégia básica do PRONAR é limitar, a nível nacional, as emissões por tipologia de fontes e poluentes prioritários, reservando o uso dos padrões de qualidade do ar como ação complementar de controle. Estabeleceu-se dois tipos de padrões de qualidade do ar: os primários e os secundários:

a) São padrões primários de qualidade do ar as concentrações de poluentes que, ultrapassadas, poderão afetar a saúde da população, podendo ser entendidos como níveis máximos toleráveis de concentração de poluentes atmosféricos, constituindo-se em metas de curto e médio prazo.
b) São padrões secundários de qualidade do ar, as concentrações de poluentes atmosféricos abaixo das quais se prevê o mínimo efeito adverso sobre o bem-estar da população, assim como o mínimo dano à fauna e flora aos materiais e meio

ambiente em geral, podendo ser entendidos como níveis desejados de concentração de poluentes, constituindo-se em meta de longo prazo.

Para o gerenciamento do licenciamento de fontes de poluição do ar, considerando que o crescimento industrial e urbano, não devidamente planejado, agrava as questões de poluição do ar, é estratégico estabelecer um sistema de disciplinamento da ocupação do solo baseado no licenciamento prévio das fontes de poluição. Por este mecanismo o impacto de atividades poluidoras poderá ser analisado previamente, prevenindo uma deterioração descontrolada da qualidade do ar (PRONAR e CONAMA, 1989).

Já no âmbito político, tendo em vista a existência de interfaces com os diferentes setores da sociedade, que se criam durante o estabelecimento e a aplicação de medidas de controle da poluição do ar é estratégia do PRONAR que o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) coordene gestões junto aos órgãos da Administração Pública Direta ou Indireta. Federais, Estaduais ou Municipais e Entidades Privadas, no intuito de se manter um permanente canal de comunicação visando viabilizar a solução de questões pertinentes (PRONAR, 1989).

Desde a instituição do PRONAR, por meio da Resolução Conama nº 005, de 1989, como “um dos instrumentos básicos da gestão ambiental para proteção da saúde e bem-estar das populações e melhoria da qualidade de vida” e o estabelecimento de seus instrumentos de apoio e operacionalização, foram desenvolvidas inúmeras ações que buscaram promover a melhoria da qualidade do ar no país. No entanto, apesar dos avanços decorrentes principalmente das atualizações das resoluções do Conama, nem todos esses instrumentos, ações e programas foram implementados de forma integral (PRONAR, 1989).

Nas Tabelas 3 e 4 estão representadas as situações atuais e a situação desejadas pelo PRONAR, de acordo com a resolução no CONAMA de 1989 e 2018.

Tabela 3: Situação atual e a desejada da Resolução Conama nº 005/1989.

SITUAÇÃO ATUAL RESOLUÇÃO CONAMA Nº 005, DE 1989 (PRONAR)	SITUAÇÃO DESEJADA RESOLUÇÃO CONAMA Nº 005, DE 1989 (PRONAR)
(i) Limites de emissão foram definidos pelas resoluções conama nº 382, de 2006 e 436, de 2011;	(i) Implementação das Redes Estaduais e Nacional de Monitoramento da Qualidade do Ar;
(ii) A cobertura de monitoramento no brasil é baixa - apenas 12 estados possuem algum tipo de monitoramento do ar;	(ii) Elaboração dos Inventários Estaduais e Nacionais de Emissões (fontes fixas e móveis);
(iii) Poucos estados fizeram seus inventários de emissões (fontes fixas e móveis), que se encontram desatualizados;	(iii) Enquadramento das áreas na classificação de usos pretendidos;
(iv) Alguns estados elaboraram legislação para enquadramento das áreas na classificação de usos pretendidos e mecanismos de gerenciamento de emissões de poluentes atmosféricos em áreas saturadas ou em vias de saturação;	(iv) Apoio à formulação de programas nos estados;
(v) Falta de suporte aos estados para desenvolverem suas redes de monitoramento e inventários de emissões;	(v) Capacitação das equipes técnicas dos OEMAs.

Fonte: MMA, 2022.

Tabela 4: Situação atual e a desejada da Resolução Conama nº 491, de 2018.

Situação Atual Resolução do Conama nº 491/2018	Situação Desejada Resolução do Conama nº 491/2018
(i) Padrão de Qualidade do Ar intermediário (pi1) estabelecido a partir da entrada em vigor da resolução Conama nº 491, de 2018;	(i) Implementação das Redes Estaduais de Monitoramento da Qualidade do Ar;
(ii) Guia técnico para monitoramento da qualidade do ar publicado;	(ii) Elaboração dos Inventários Estaduais de Fontes de Emissão.
(iii) Planos Estaduais de Controle de Emissão Atmosférica deve ser elaborado até novembro de 2021 e Relatórios devem ser desenvolvidos anualmente;	(iii) Enquadramento das áreas de classificação usos pretendidos.
(iv) Os órgãos ambientais estaduais e distritais deverão divulgar índice de Qualidade do Ar - IQAR;	(iv) Apoio à formulação de programas nos estados;
(v) Relatórios anual de acompanhamento das ações deve ser realizado pelo MMA ao final de cada ano;	(v) Divulgação dos índices de Qualidade do Ar (IQAR), aumentar a quantidade de estações;
(vi) Divulgação do Índice de Qualidade do Ar (IQAR).	(vi) Capacitação da equipe técnica.

Fonte: MMA, 2022.

Depois de citados na Resolução Conama nº 05, de 1989, os valores para padrões de qualidade do ar foram inicialmente definidos em 1990 (Resolução Conama nº 003, de 1990) e atualizados em 2018, por meio da Resolução Conama nº 491, de 2018 (PRONAR, 1989).

4.6.4. Legislação de Alagoas

O estado de Alagoas possui a Lei Nº 7.653, de 24 de julho de 2014, que dispõe sobre as atividades pertinentes ao controle da poluição atmosférica, padrões e gestão da qualidade do ar, conforme especifica e adota outras providências (PLA, 2014).

Foi determinado no Art. 1º que as atividades pertinentes ao controle da poluição atmosférica, padrões e gestão da qualidade do ar, são regidas pela presente Lei, atendidas

as disposições da legislação federal. Proibindo o lançamento ou a liberação para a atmosfera de qualquer tipo e forma de matéria ou energia que possa ocasionar a poluição atmosférica, conforme definida nos termos desta Lei, como mostra o Art. 3 º (Alagoas, 2014).

Os PQAr's a serem observados no estado de Alagoas serão estabelecidos pelo órgão estadual de meio ambiente, na ausência de regulamentação estadual de padrão de qualidade de ar, será observada a Legislação Federal e Resoluções do CONAMA, no que couber (Alagoas, 2014).

O Instituto do Meio Ambiente do estado de Alagoas (IMA/AL) é o órgão ambiental vinculado à Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos de Alagoas (SEMARH/AL), responsável pela execução da política ambiental estadual. Compete ao IMA/AL, por meio da Diretoria de Licenciamento (Dilic), o controle da instalação, operação e expansão de atividades poluidoras ou degradantes do meio ambiente dentro do estado (PNLA, 2018).

Entretanto não há registro de relatórios periódicos ou disponíveis com dados sobre o padrão de qualidade do ar observados no estado vinda dos órgãos responsáveis, eles apenas promovem o desenvolvimento de atividades de planejamento, diagnóstico, elaboração de termos de referência para estudos ambientais e de normatizações técnicas direcionadas ao licenciamento ambiental.

5. Poluentes atmosféricos

A atmosfera terrestre é o compartimento de deposição e acumulação de gases (e de particulados) como o CO_2 e o O_2, produtos dos processos respiratório e fotossintético de plantas terrestres e aquáticas, macro e micrófitas, e de compostos nitrogenados essenciais à vida na Terra, fabricados por organismos (bactérias e plantas) a partir de N_2 atmosférico. Ela também se constitui em um componente fundamental do Ciclo Hidrológico, pois age como um gigantesco condensador que transporta água dos oceanos aos continentes (Mozeto, 2001).

A atmosfera tem também uma função vital de proteção da Terra, pois absorve a maior parte da radiação cósmica e eletromagnética do Sol: apenas a radiação na região de 3002.500 nm (ultravioleta, a UV, visível e infravermelha, a IV) e 0,01-40 m (ondas de rádio) é transmitida pela atmosfera e atinge nossas cabeças (Mozeto, 2001), (Toletino e Rocha-Filho, 1998).

Até aproximadamente 80 km de altura, a composição da atmosfera é praticamente constante, com exceção do vapor d'água e do dióxido de carbono cujas concentrações são bastante variáveis, nas proximidades da superfície terrestre. A parte gasosa é composta de nitrogênio (N_2), que contribui com 78,08% e o oxigênio (O_2) com 20,95% (Cardoso, 2009).

A oxigênio desempenha uma função crucial na atmosfera, sendo fundamental para sustentar a vida aeróbica, ou seja, aquela que depende da respiração do oxigênio. Dois processos naturais responsáveis pela geração de oxigênio na atmosfera (Riguetto, 1999, pg.40):

- A dissociação da água através da radiação ultravioleta (Lisboa, 2007):

$$2H_2O + (\text{rad. U.V}) \rightarrow 2H_2 + O_2 \qquad \textbf{(1)}$$

- E a reação fotossintética através da radiação infravermelha. O CH_2O é uma molécula fundamental para a produção de carboidratos, formadores das células. Essa reação está ligada, portanto, aos processos biológicos: principal processo formador de O_2 (Lisboa, 2007).

$$H_2O + CO_2\ (\text{rad. I.V}) \rightarrow H - C - \underset{\underset{O}{\|}}{H} + O_2 \qquad \textbf{(2)}$$

Os gases minoritários também são importantes para manter a vida. Gases como o dióxido de carbono, o metano e o óxido de nitrogênio são responsáveis por manter a temperatura do planeta em uma faixa conveniente para abrigar a vida como conhecemos (Cardoso, 2009).

Tabela 5: Composição relativa de alguns gases minoritários presentes na atmosfera limpa.

COMPOSTO	NÚMERO DE MOLÉCULAS DO GÁS PRESENTE EM AMOSTRA DE DEZ BILHÕES DE MOLÉCULAS DE AR
Dióxido de Carbono, CO_2	3 600 000
Metano, CH_4	16 000
Óxido de Dinitrogênio, N_2O	3100
Oxido Nítrico, NO	1
Amônia, NH_3	10
Dióxido de Enxofre, SO2	1
Formaldeído, HCOH	10
Argônio, Ar	9 340 000
Neônio, Ne	181 800
Helio, He	52 400
Hidrogênio, H_2	5 000

Fonte: CARDOSO, 2009.

A poluição atmosférica é resultado do aumento da concentração dos gases minoritários e de partículas na atmosfera. A principal atividade antropogênica que afeta a atmosfera é a queima de combustível e florestas, esse processo de queima é chamado de combustão (Garcia e Passos).

As reações de combustão podem ser classificadas como completas ou incompletas, onde reação de combustão completa define o que é chamado de proporção estequiométrica. Para um dado processo de combustão completa, existe apenas uma proporção possível entre o número de moléculas do combustível e o número de moléculas do oxidante para que as únicas espécies produzidas sejam H_2O e CO_2. No caso da combustão do metano, resulta (Ridenti et al., 2018):

$$CH_4(g) + 2O_2(g) \rightarrow CO_2(g) + 2H_2O(l) \qquad \Delta H = -891 \text{ kJ.} \qquad \textbf{(3)}$$

As reações de combustão podem ser categorizadas como completas ou incompletas, sendo a combustão completa definida pelo que é conhecida como proporção estequiométrica. Em um processo de combustão completa específico, existe uma única proporção possível entre o número de moléculas do combustível e do oxidante, garantindo que apenas as espécies de H_2O e CO_2 sejam produzidas. Tomando como exemplo a combustão do metano, o resultado é (RIDENTI, et al., 2018):

$$CH_{4(g)} + 3/2O_{2(g)} \rightarrow CO_{(g)} + 2H_2O_{(l)} \quad \Delta H = -520 \text{ kJ.} \tag{4}$$

$$CH_{4(g)} + O_{2(g)} \rightarrow C_{(g)} + 2H_2O_{(l)} \quad \Delta H = -408{,}5 \text{ kJ.} \tag{5}$$

Os materiais mais abundantes para serem usados como combustível são aqueles ricos em átomos de carbono ligados ao hidrogênio (C-H), presentes nos compostos de origem no petróleo e gás natural ou ligado a outro átomo de carbono (C-C), como o presente na estrutura do carvão, aumentando a quantidade de dióxido de carbono na atmosfera (Cardoso, 2009).

Em áreas urbanas, grandes quantidades de compostos químicos são emitidas para a atmosfera pelas indústrias, veículos e decorrentes de outras atividades humanas. Perto de 3000 diferentes compostos provenientes da ação humana já foram identificados na atmosfera, sendo a maior parte deles orgânicos. De uma forma geral, a escolha recai sempre sobre um grupo de poluentes que servem como indicadores de qualidade do ar1, que são regulamentados e de uso universal: dióxido de enxofre (SO_2), material particulado (MP), monóxido de carbono (CO), ozônio (O_3) e óxidos de nitrogênio (NOx) (Guarieiro, et al., 2011).

5.1. Monóxido de carbono (CO)

A presença predominante de monóxido de carbono (CO) na atmosfera origina-se principalmente da queima incompleta de combustíveis fósseis ou da queima de biomassa. Na combustão, a quantidade de CO produzida é diretamente vinculada ao volume de oxigênio fornecido para o processo (Guimarães, 2016).

A principal preocupação das concentrações de monóxido de carbono na atmosfera urbana vem de sua alta toxicidade. Diferente do material particulado que geralmente apresenta efeito em médio e longo prazo na saúde das pessoas, o CO ocasiona efeitos imediatos associados a doenças agudas. O monóxido de carbono é imediatamente inaliável e difunde-se rapidamente nos alvéolos, corrente sanguínea e membranas da placenta (Weaver, 2009). Os sintomas da intoxicação subaguda de CO incluem dor de cabeça, tonturas, fadiga, mal-estar e alguns sintomas semelhantes aos da gripe (Nascimento, 2016).

É um gás do efeito estufa indireto, contribui para o smog fotoquímico, cujo principal poluente secundário é o ozônio (O_3), a oxidação do CO ocorre na presença da luz solar e do radical hidroxila (OH) formado na atmosfera (Guimarães, 2016).

$$CO_{(g)} + OH^{\bullet}_{(g)} \rightarrow CO_{2(g)} + H^{+} \quad \textbf{(6)}$$

$$H^{+}_{(g)} + O_{2(g)} + M \rightarrow HO_2^{\bullet}{}_{(g)} + M \quad \textbf{(7)}$$

Seguindo-se as reações: $$HO_2^{\bullet}{}_{(g)} + NO_{(g)} \rightarrow OH^{\bullet}_{(g)} + NO_{2(g)} \quad \textbf{(8)}$$

$$NO_{2(g)} + h\nu\ (\lambda < 430\ nm) \rightarrow O^{\bullet}_{(g)} + NO_{(g)} \quad \textbf{(9)}$$

$$O^{\bullet}_{(g)} + O_{2(g)} \rightarrow O_{3(g)} \quad \textbf{(10)}$$

Resultando em: $$CO_{2(g)} + 2O_{2(g)} \rightarrow CO_{2(g)} + O_{3(g)} \quad \textbf{(11)}$$

*M= Gás inerte na atmosfera.

Frente ao risco das altas concentrações de monóxido de carbono, o monitoramento deste poluente pelos órgãos ambientais torna-se necessário.

5.2. Ozônio (O3)

É um gás instável, altamente reativo e oxidante. O ozônio presente na troposfera é um perigoso poluente que além de provocar problemas respiratórios e o smog fotoquímico também degrada tecidos e danifica plantas. O que contrasta com o papel protetor que geralmente é atribuído ao ozônio estratosférico vital para a manutenção da qualidade de vida na biosfera, pois, absorve a radiação infravermelha refletida pela superfície terrestre, embora seu papel principal esteja relacionado com sua presença na ozonosfera, bloqueando parte da radiação ultravioleta do sol. Sua absorção numa faixa em torno de 9 µm diminui a transparência da 'janela' atmosférica à radiação infravermelha existente entre 7µm e 13 µm (Mozeto, 2001), (Toletino e Rocha-Filho, 1998).

Moléculas de O_3 são formadas e destruídas em reações não catalíticas na estratosfera. Estas reações são exotérmicas, conferindo, portanto, o perfil típico de temperatura desta camada da atmosfera. Acima da estratosfera o ar é muito rarefeito e as moléculas de O_2 são decompostas pela radiação UV do Sol, parte dos átomos de oxigênio recombinam-se e formam moléculas diatômicas, que podem novamente sofrer o processo de fotodecomposição. Por estas razões, a intensidade da radiação UV na estratosfera é muito menor. Sendo o ar mais denso, essa região contém um maior número de moléculas de O_2. Assim, essas moléculas em colisão com átomos de oxigênio resultam na produção de ozônio segundo a equação (Mozeto, 2001):

$$O^{\bullet}_{(g)} + O_{2(g)} \rightarrow O_{3(g)} + \text{calor} \qquad \textbf{(12)}$$

Esta reação é a principal fonte de geração do O_3 da estratosfera. A destruição das moléculas de O_3 na estratosfera é predominantemente um resultado da fotodecomposição pela absorção de fótons UV com $\lambda < 320$ nm que, segundo a equação abaixo, produz moléculas e átomos de oxigênio no estado excitado (Mozeto, 2001):

$$O_{3\,(g)} + \text{UV}\ (\lambda < 320\ \text{nm}) \rightarrow O_2^{*}{}_{(g)} + O^{\bullet}_{(g)} \qquad \textbf{(13)}$$

Várias são as espécies atômicas ou moleculares que fazem esta destruição através da remoção de um átomo de oxigênio da molécula de O_3. Essas espécies são denominadas 'catalisadores da depleção da camada de ozônio. Esses catalisadores são radicais livres, átomos ou moléculas com pelo menos um elétron não emparelhado, o que os torna

espécies altamente reativas. Dentre eles podem ser citados: $OH^{\bullet}$, $CH_3{}^{\bullet}$, $CF_2Cl^{\bullet}$, $H_3COO\bullet$, $H_3CO^{\bullet}$, $ClOO^{\bullet}$, $ClO^{\bullet}$, $HCO^{\bullet}$, e $NO^{\bullet}$ (Mozeto, 2001).

O processo de formação do O_3 depende das concentrações de seus precursores e de condições meteorológicas. Sua formação pode ocorrer em até duas horas após a emissão de seus precursores, que mesmo no processo de formação do O_3 continuam sendo transportados a favor dos ventos, fazendo com que sejam encontradas altas concentrações de O_3 em regiões distantes do local de emissão (Valdambrini e Ribeiro, 2019). Em áreas metropolitanas, as emissões veiculares são as principais responsáveis pela emissão de Nox (óxidos de nitrogênio) e COVs (Compostos Orgânicos Voláteis), dependendo, principalmente, do tipo de combustível utilizado. O uso do etanol como combustível emite menos quantidades de NOx, COVs, hidrocarbonetos e material particulado, comparado à combustão da gasolina e do diesel. Em contrapartida, a combustão incompleta do etanol gera mais aldeído, mais especificamente, o formaldeído e acetaldeído, que possuem um papel importante na formação do O_3 por serem bastante reativo (Valdambrini e Ribeiro, 2019; Alvim et al., 2018).

5.3. Dióxido de enxofre (SO_2)

Dióxido de enxofre, um dos mais comuns poluentes atmosféricos, é introduzido no ambiente em grandes quantidades, proveniente tanto de fontes antropogênicas quanto de fontes naturais. Uma vez emitido, SO_2 (g) pode reagir com vários oxidantes presentes na atmosfera e formar sulfato particulado, na forma de gotas de H_2SO_4 ou na forma de partículas neutralizadas tais como sulfato de amônio. O processo de oxidação do SO_2 e outras espécies de S(IV) ocorre tanto em fase gasosa em dias claros, como também em fase aquosa, na presença de nuvens e nevoeiros (Martins e Andrade 2002). Tal processo, além de resultar na formação de sulfato particulado, contribui significativamente para a produção de acidez, comprometendo sobremaneira a qualidade das condições ambientais. A gasolina e o diesel vendidos no Brasil possuem grande quantidade de enxofre quando comparados aos mesmos combustíveis vendidos em outros países (Cardoso, 2009).

Os compostos de enxofre mais importantes, presentes na atmosfera, compreendem espécies tais como: COS, CS_2, $(CH_3)_2S$, H_2S, SO_2 e SO_4^{2-}. A transformação destes compostos na troposfera exibe uma clara tendência em direção aos estados de oxidação mais altos (Martins e Andrade 2002).

Pode-se representada pela seguinte equação geral:

$$S_{(s)} + O_{2\,(g)} \rightarrow SO_{2\,(g)}$$

(14)

Como o gás dióxido de enxofre é solúvel em água, ele pode ser incorporado às gotículas de água que formam as nuvens, formando o ácido sulfuroso (Cardoso e Franco, 2002).

$$SO_{2(g)} + H_2O_{(l)} \rightarrow H_2SO_{3(aq)}$$

(15)

Outras substâncias (R) presentes na atmosfera podem também ser incorporadas às gotículas de água das nuvens e oxidar ou servir como catalisador para a reação de oxidação do ácido sulfuroso a ácido sulfúrico (Cardoso e Franco, 2002):

$$H_2SO_{3(aq)} + R(\text{oxidante}) \rightarrow H_2SO_{4(aq)}$$

(16)

$$H_2O_{2\,(l)} + 2H^+_{(aq)} + 2e^- \rightarrow 2H_2O_{(l)}\ (\text{redução})$$

(17)

$$H_2O_{2(l)} + H_2SO_{3(g)} \rightarrow H_2SO_{4\,(aq)} + H_2O_{(l)}\ (\text{reação total})$$

(18)

Este é um dos caminhos conhecidos para a formação da “chuva ácida”, resultado do processo que ocorre quando as gotículas das nuvens se juntam e formam gotas pesadas o suficiente para cair como chuva. O dióxido de enxofre, além de ser um formador da chuva ácida, pode afetar a saúde dos seres vivos. Quando no ar existe dióxido de enxofre e material particulado, forma-se uma mistura que tem a propriedade de potencializar o efeito da poluição. Esse fenômeno é conhecido como efeito sinérgico. O ar que contém dióxido de enxofre e material particulado possui um efeito adverso à saúde que é, muitas vezes, maior que o efeito do ar que contém só dióxido de enxofre ou só material particulado. Isto é, seus efeitos não se somam, mas sim se multiplicam (Cardoso e Franco, 2002).

5.4. Dióxido de Nitrogênio (NO_2)

A quantidade das espécies nitrogenadas que compõem o ciclo do nitrogênio é incerta, devido principalmente à intervenção do homem. Dentre os óxidos de nitrogênio, o principal composto emitido é o NO, o qual é rapidamente oxidado a NO_2. Processos diversos de combustão são as principais fontes de NOx para a atmosfera. O NO_2 é um dos principais contribuintes para a formação de chuvas ácidas, devido à produção de HNO_3 (ácido nítrico), o que pode ocasionar danos ao ambiente e aos materiais, é um agente oxidante que pode causar problemas respiratórios como bronquite, asma e redução da capacidade pulmonar em crianças (Ugucione et al., 2009).

Os óxidos de nitrogênio também participam na formação do "smog" fotoquímico que é um aerossol branco, irritante aos olhos e mucosas, constituído por produtos resultantes da interação de compostos orgânicos e óxidos de nitrogênio, entre eles aldeídos, nitratos de alquila, ozônio e nitrato de peróxiacila (PAN). Os radicais •OH reagem com aldeídos formando radicais acila e peróxiacila, que reagem posteriormente com NO_2, dando lugar ao PAN (Cónsul, 2004):

$$RO_2^{\bullet}{}_{(g)} + NO_{(g)} \rightarrow NO_{2(g)} + RO_{(g)} \quad \textbf{(19)}$$

$$RO_{2(g)}^{\bullet} + NO_{(g)} \rightarrow RONO_{2(g)} \quad \textbf{(20)}$$

$$RO^{\bullet}{}_{(g)} + O_{2(g)} \rightarrow HO_2^{\bullet}{}_{(g)} + RCHO_{(g)} \quad \textbf{(21)}$$

$$RCHO_{(g)} + OH^{\bullet} \rightarrow RCO^{\bullet}{}_{(g)} + H_2O_{(g)} \quad \textbf{(22)}$$

$$RCO^{\bullet}{}_{(g)} + O_{2(g)} \rightarrow RC(O)O_{2(g)}{}^{\bullet} \quad \textbf{(23)}$$

$$RC(O)O_{2(g)}{}^{\bullet} + NO_{2(g)} \rightarrow CH_3CH_2O_2NO_{2(g)}$$

(PAN)

(24)

O nitrato de peróxiacila (PAN) é um dos produtos mais tóxicos formados, atuando como reservatório de óxidos de nitrogênio devido à elevada estabilidade na temperatura da baixa troposfera. O NO puro é praticamente inofensivo, mas pode oxidar-se facilmente formando dióxido de nitrogênio, através de reação com oxigênio, com ozônio e até com radicais peróxidos presentes na atmosfera. Na troposfera, a presença de ozônio em concentrações elevadas leva à formação de radicais nitrato e estes, por sua vez, reagem rapidamente com a luz solar (Cónsul, 2004):

$$NO_{(g)} + O_{3(g)} \rightarrow NO_{2(g)} + O_{2(g)} \quad \textbf{(25)}$$

$$NO_{2(g)} + O_{3(g)} \rightarrow NO_3^{\bullet}{}_{(g)} + O_{2(g)} \quad \textbf{(26)}$$

$$NO_3^{\bullet}{}_{(g)} + h\nu \rightarrow NO_{(g)} + O_{2(g)} \quad \textbf{(27)}$$

$$NO_3^{\bullet}{}_{(g)} + h\nu \rightarrow NO_{2(g)} + O^{\bullet}{}_{(g)} \quad \textbf{(28)}$$

5.5. Material Particulado ($MP_{2.5}$)

As partículas estão naturalmente presentes na atmosfera em ambientes naturais e urbano em diversas formas e tamanhos. No entanto, o aumento expressivo de micropartículas por fontes antropogênicas tem sido fonte de preocupação para as ciências atmosférica. Desse modo, tem-se conceituado o material particulado (MP) como um grupo heterogênico de poluente constituído de diversas partículas de materiais sólidos e líquidos suspensos na atmosfera devido ao seu tamanho coloidal (Manahan, 2013).

As partículas atmosféricas são discriminadas entre si, principalmente, pelo seu diâmetro aerodinâmico. Assim, diferenciam-se as em quatros classes, a saber: partículas grossas (< 2,5 -10μm), partículas finas (0,1-2,5μm), partículas ultrafinas (0,01 - 0,1μm) e nanopartículas (<0,01μm) (Brito et al., 2018). Dependendo do tamanho, as partículas podem ficar suspensas na atmosfera por dias ou semanas, podendo até mesmo viajar para locais distantes do ponto de emissão, onde se depositarão. Quanto menor o tamanho das

partículas, maior será o tempo de suspensão, o que permitirá seu transporte por longas distâncias (Justo et al., 2020).

O material particulado em suspensão apresenta em sua composição inúmeros compostos ou espécies químicas diferentes, tais como íons SO_4^{2-}, HSO_4^{2-}, NO^{3-}, NH^{4+} e H^+, fuligem, compostos orgânicos, cinzas, partículas do solo, pólen e uma variedade de metais sob a forma de metais traço como, por exemplo, Pb, Hg, V, Cd, Cr, etc, e elementos da crosta tais como Fe, Ca, Si e Al (Brook et al., 2010; CETESB, 2011; Santos et al., 2021).

Na composição do material particulado inalável fino observa-se a predominância de: íons de sulfato, nitrato, amônio e hidrogênio; carbono elementar; grande variedade de compostos orgânicos; metais, compostos de Pb, Cd, V, Ni, Cu, Zn, Mn, Fe (Brito et al., 2018).

Diversos estudos apontam o material particulado como um dos principais compostos causadores de doenças respiratórias, como asma, pneumonia, câncer de pulmão, derrames e doenças cardíacas (Brook et al., 2010).

A fração fina ($MP_{2,5}$) pode atingir profundamente os pulmões e se alojar em tecidos, danificando-os. Uma característica do $MP_{2,5}$, que pode agravar estes impactos, se refere às grandes distâncias que estas partículas podem percorrer e seu tempo de permanência na atmosfera, podendo ficar suspensas durante dias e até semanas (Nishida, 2017).

Na tabela 6, adaptado de Polezer (2015), é apresentado um resumo de diversas pesquisas, que mostra sucintamente os avanços no assunto material particulado e impactos na saúde (Nishida, 2017).

Tabela 6: Resumo dos impactos do material particulado observados em diferentes estudos.

AUTOR	POLUENTE	EFEITO ADVERSON
KARR et al. (2007)	$PM_{2.5}$	Aumento de admissão hospitalares em crianças com bronquite.
OSTRO et al. (2009)	$PM_{2.5}$	Reportou um aumento de 4% nas admissões pediátricas por problemas respiratórios a cada 14 µg/m³ de aumento do $MP_{2.5}$.
BROOK et al. (2010)	$PM_{2.5}$	Aumento da morbidade e mortalidade tanto para exposição de curto quanto de longo prazo.
CANOVA et al. (2012)	PM_{10}	35% de chance de internações por agravamento em pessoas asmáticas e com doenças pulmonares obstrutivas crônicas.
WU et al. (2012)	Metais no $PM_{2.5}$	Aumento da taxa cardíaca e taca cardiovascular por Cd, Sr, Mn, Ni, Ca, Cr, e MP.
LANGRISH et al. (2012)	$PM_{2.5}$	Redução na exposição reduz incidentes cardiovasculares em pessoas com doenças coronárias.
CAO et al. (2012)	$PM_{2.5}$	Associação com mortalidade cardiovascular e por problemas respiratórios.
COUTINHO et al. (2015)	PM_{10}	Aumento nas internações por doenças cardiovasculares.
MANTOVANI et al. (2016)	$PM_{2.5}$	Possível aumento nos casos de trombose.

Fonte: Adaptado de Polezer (2015).

O MP tende a se acumular nas vias respiratórias, e assim causa uma resposta inflamatória e danos às células epiteliais. Além disso, o MP estimula a secreção de fluidos e mediadores de origem celular (Galvis-Vizcaíno et al., 2021). A Agência Internacional de Pesquisa sobre o Câncer (IARC) classifica o MP como cancerígeno. A exposição prolongada a esse poluente está associada ao desenvolvimento de câncer de pulmão com o risco elevado quando a concentração de $PM_{2.5}$ superior a 10 µg/m³ (Galvis-Vizcaíno et al., 2021).

A queima de material orgânico é a principal fonte de material particulado fino. Entre os componentes orgânicos, os Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs) merecem destaque devido à sua frequência de ocorrência nesse material e à toxicidade associada a essas substâncias (Silva, 2011). Os Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs) são compostos formados por átomos de carbono e hidrogênio, que possuem dois ou mais

anéis aromáticos interligados. Essas substâncias são produzidas principalmente durante processos de combustão incompleta, ocorrendo em altas temperaturas (>350°C). Os principais processos envolvidos são a pirólise e a pirossíntese (Lee et al., 1981).

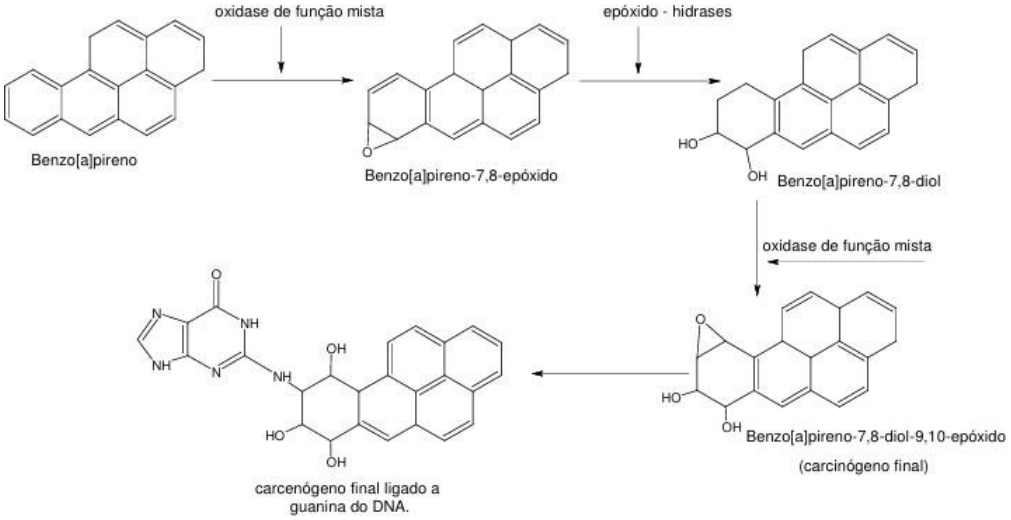
As plantas possuem diversos componentes, como celulose, lignina, glicose, manose, galactose, xilose, taninos e terpenos, que formam suas paredes celulares. Durante a queima do material vegetal, esses constituintes passam por reações químicas, incluindo hidrólise, oxidação, desidratação, pirólise e pirossíntese, resultando em várias substâncias (Gibbs, 1958).

A combustão ocorre em três etapas: ignição (com poucas chamas), queima (emissão de CO_2, H_2O, N_2, NOx e SOx) e latência (processo autossustentável sem chama, com emissão de substâncias parcialmente oxidadas como CO, CH_4, hidrocarbonetos e aminas) (Crutzen e Goldammer, 1993).

Os Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs), devido às suas propriedades físico-químicas, podem estar presentes na fase vapor ou adsorvidos no material particulado atmosférico (Stroher et al., 2007). A deposição é um processo de remoção dos HPAs da atmosfera, influenciados pelo tamanho das partículas. Além disso, os HPAs podem reagir com radicais atmosféricos, formando derivados com maior potencial mutagênico e carcinogênico, como os nitro-HPAs e oxi-HPAs (Stroher et al., 2007).

Porém, os HPAs não são carcinogênicos diretos, passam por reações sofrem de oxidação no organismo e formando epóxidos que são moléculas reativas, formando um composto cancinogênico que se ligam ao DNA, como representado na Figura 1 (Silva, 2011).

Figura 1: Formação do metabólito mais importante do BaP que se liga a guanina do DNA.



Fonte: Flavio Soares Silva, 2011.

6. MATERIAL E MÉTODOS

6.1 Localização e Caracterização da Área de Estudo

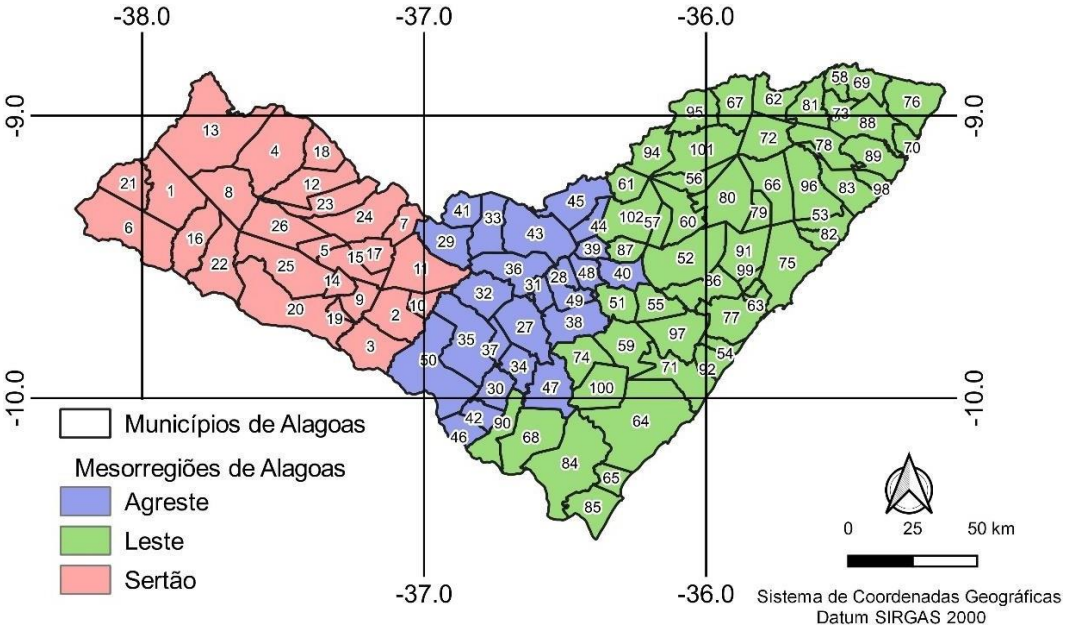
Localizado no Leste do NEB (ENEB), Alagoas ocupa uma área de 27.848,140 km², sendo distribuídos em 102 municípios e com limites aos estados de Pernambuco, Sergipe, Bahia e Oceano Atlântico (IBGE, 2023). De acordo com o censo demográfico de 2022 houve um crescimento populacional total de 0,23%, com uma densidade demográfica de 112,38 hab/km^2 (IBGE, 2022). A Figura 1 representa a configuração espacial das mesorregiões climáticas do estado de Alagoas e de seus municípios, sendo divido em: Leste, Agreste e Sertão. O Leste é a maior região territorial e abrange o Litoral e a Zona da Mata. O Agreste é a região de transição entre as zonas úmida e seca, e o Sertão Alagoano corresponde às localidades com características climáticas áridas e semiáridas (IBGE, 2010).

Em relação à economia e crescimento industrial, nas duas décadas recentes, constatam-se tendências de mudanças na economia estadual, na agropecuária, os dois grandes setores cana- de-açúcar e pecuária bovina, apresentaram alterações: i) o sucroalcooleiro reduziu de tamanho e a ii) pecuária ampliou sua especialização na atividade leiteira. A pecuária de leite, concentrada em 80% das áreas do agreste e sertão,

vai se especializando na produção crescente da matéria-prima para seu parque industrial local: a rede de pequenos laticínios espalhadas por vários municípios. Na área urbana, no setor industrial, a cadeia da química e do plástico vem se firmando como um segmento expressivo, por outro lado, vem acontecendo um processo de industrialização, com um crescente número de empresas industriais e de construção (Carvalho, 2019).

A indústria química em Alagoas deu um salto em 1977 com a inauguração da Salgema Indústrias Químicas, transformada em Braskem em 2002. Essa empresa abriria a possibilidade de instalação do Polo Cloroalcoolquímico de Alagoas (PCA), adiado pela conjuntura nacional dos anos 1980/1990 e pela concorrência dos polos de Camaçari (BA), Cubatão (SP) e Triunfo (RS). A Cadeia Produtiva da Química e do Plástico (CPQP) que substituiu a ideia de um polo cloroalcoolquímico, surge a partir da empresa-matriz, Braskem, sexta maior petroquímica do mundo, proprietária da maior planta de processamento de cloro-soda e maior produtora de PVC da América Latina. A cadeia é formada por 17 indústrias químicas de primeira à terceira geração, mais 104 indústrias diversas a elas vinculadas, concentradas em Marechal Deodoro e Maceió (Diodato, 2017).

Figura 2: Configuração espacial das mesorregiões do estado de Alagoas e de seus municípios.



1.Água Branca	27.Arapiraca	53.Barra de Santo Antônio	79.Messias
2.Batalha	28.Belém	54.Barra de São Miguel	80.Murici
3.Belo Monte	29.Cacimbinhas	55.Boca da Mata	81.Novo Lino
4.Canapi	30.Campo Grande	56.Branquinha	82.Paripueira
5.Carneiros	31.Coité do Nóia	57.Cajueiro	83.Passo de Camaragibe
6.Delmiro Gouveia	32.Craíbas	58.Campestre	84.Penedo
7.Dois Riachos	33.Estrela de Alagoas	59.Campo Alegre	85.Piaçabuçu
8.Inhapi	34.Feira Grande	60.Capela	86.Pilar
9.Jacaré dos Homens	35.Girau do Ponciano	61.Chã Preta	87.Pindoba
10.Jaramataia	36.Igaci	62.Colônia Leopoldina	88.Porto Calvo
11.Major Isidoro	37.Lagoa da Canoa	63.Coqueiro Seco	89.Porto de Pedras
12.Maravilha	38.Limoeiro de Anadia	64.Coruripe	90.Porto Real do Colégio
13.Mata Grande	39.Mar Vermelho	65.Feliz Deserto	91.Rio Largo
14.Monteirópolis	40.Maribondo	66.Flexeiras	92.Roteiro
15.Olho d'Água das Flores	41.Minador do Negrão	67.Ibateguara	93.Santa Luzia do Norte
16.Olho d'Água do Casado	42.Olho d'Água Grande	68.Igreja Nova	94.Santana do Mundaú
17.Olivença	43.Palmeira dos Índios	69.Jacuípe	95.São José da Laje
18.Ouro Branco	44.Paulo Jacinto	70.Japaratinga	96.São Luís do Quitunde
19.Palestina	45.Quebrangulo	71.Jequiá da Praia	97.São Miguel dos Campos
20.Pão de Açúcar	46.São Brás	72.Joaquim Gomes	98.São Miguel dos Milagres
21.Pariconha	47.São Sebastião	73.Jundiá	99.Satuba
22.Piranhas	48.Tanque d'Arca	74.Junqueiro	100.Teotônio Vilela
23.Poço das Trincheiras	49.Taquarana	75.Maceió	101.União dos Palmares
24.Santana do Ipanema	50.Traipu	76.Maragogi	102.Viçosa
25.São José da Tapera	51.Anadia	77.Marechal Deodoro	
26.Senador Rui Palmeira	52.Atalaia	78.Matriz de Camaragibe	

Fonte: Autor, 2023.

O leste de alagoas é caracterizado por clima tropical úmido com chuvas intensas no outono-inverno e bioma Mata Atlântica. O sertão de Alagoas apresenta clima semiárido agregado a uma vegetação xerófita, que ocupa cerca de 50% do território do estado. Esse clima caracteriza-se pelo regime de chuvas irregular espacialmente e temporalmente, característica com maior evidência nas mesorregiões do Agreste e do Sertão alagoano (Oliveira Júnior et al., 2012).

6.2 Estatística Aplicada

Os dados dos poluentes atmosféricos oriundos do SISAM foram avaliados pelos testes não-paramétrico de Mann-Kendall (MK), para avaliar a tendência temporal na série temporal, e de Pettitt, utilizado para identificar tendências positivas ou negativas com as mudanças abruptas na série temporal (INPE, 2023). Para verificação da relação linear entre os poluentes do ar e as variáveis meteorológica, utilizou-se o teste de correlação de Pearson. Por outro lado, os dados obtidos do Datasus foram submetidos a uma análise estatística descritiva para identificar tendências (CIDACS, 2023).

6.3 Teste de Mann-Kendall

Foi utilizado o teste de MK para verificar se há tendência temporal ao longo da série. Com esse teste, Mann (1945) propôs hipótese nula, H_0 e alternativa H_1, que estão relacionadas respectivamente com os dados de uma população onde as variáveis podem ser independente e igualmente distribuídas ou seguir uma tendência monoatômica no tempo.

Sendo assim:

H_0 = *Não há tendência*

H_1 = *Há tendência*

Para hipótese nula temos:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{k=1}^{n-1} sgn\,(Xj - Xk) \qquad (\mathbf{1})$$

Sendo que:

$$sgn = +1, 0\ ou\ -1 \qquad (\mathbf{2})$$

em que:

- +1 para x > 0
- 0 para x = 0
- -1 para < 1

Com a análise de Kendall, pode-se demonstrar que S é normalmente distribuída, e se houver em determinadas situações valores iguais para x, utiliza-se a equação abaixo para calcular:

$$E\,[Si] = 0 \qquad (\mathbf{3})$$

$$Var[S] = 1/18\,[n(n-1)(2n+5) - \sum_{j=i}^{p} t\ j(tj-1)(2tj+5) \qquad (\mathbf{4})$$

em que, t_j é o número de dados com valores iguais a certo grupo *j* e *p* é o número de grupos contendo valores iguais na série de dados.

Valores positivos para *S* indicam tendência positiva, ou seja, os dados crescem com o tempo, um *S* negativo indica tendência negativa, com valores decrescentes. Pode-se verificar se a tendência positiva ou negativa é significativamente diferente de zero e se *S* é significativamente diferente de zero, H_0 pode ser rejeitada para certo nível de significância apontando para a existência de tendência, H_1 é aceita (Mann, 1945; Kendall, 1975).

6.4 Teste não paramétrico de Pettitt

Para o teste de Pettitt (Pettitt, 1979), verifica se duas amostras $x_1,....x_t$ e $x_{t+1}, \quad ,x_T$ provêm da mesma população. Utilizando a estatística $U_{t,T}$ pode-se contar o número de vezes que um membro da primeira amostra é maior do que um membro da segunda. Essa contagem pode ser expressa como:

$$\cup\, t.T = \cup\, t-1, T + \sum_{j=1}^{T} sgn(X1 - Xj) \qquad (\mathbf{5})$$

em que:

$$\begin{cases} sgn(x) = 1 \text{ para } x>0; \\ sgn(x) = 0 \text{ para } x = 0; \\ sgn(x) = -1 \text{ para } x<0. \end{cases}$$

Considera-se:

H_0: Os dados são homogêneos.

H_1: Há um dado com alteração positiva ou negativa nos dados.

A estatística $U_{t,TU}$ é calculada para os valores de $1 < t < T$. A estatística *k(t)* do teste de Pettitt é representada da seguinte maneira:

$$k_{(T)} \quad = MAX_{1 \leq t \leq T} \cup\, t, T \qquad (\mathbf{6})$$

Sendo assim, essa estatística localiza o ponto onde houve uma mudança brusca na média de uma série temporal, e pode-se calcular a sua significância pela equação:

$$p \cong 2\exp\{-6k(t)^2 \ / \ (T^3 + T^2)\} \qquad (7)$$

t é o ponto de mudança brusca onde ocorre o máximo de k(t). E *K* podem ser calculados pela equação:

$$K_{crit} = \frac{\sqrt[+]{-\ln(\frac{p}{2})(T^3 + T^2)}}{6} \qquad (8)$$

6.5 Coeficiente de Correlação de Pearson (r)

O coeficiente de Pearson é conhecido como coeficiente de correlação produto-momento ou simplesmente *r* de Pearson, onde avalia o grau de correlação linear entre duas variáveis quantitativas. Este índice adimensional varia de -1,0 a 1,0, refletindo a intensidade da relação linear entre dois conjuntos de dados (Lira, 2004). Se representarmos uma amostra de dados bivariados por ((x, y) = {(X_i, Y_i)}), com (i = 1, …, n), o coeficiente de correlação amostral de Pearson é calculado utilizando a seguinte fórmula (Martins, 2014):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(xi - \bar{x})(yi - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}} \qquad (9)$$

Onde:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} xi}{n} \text{ e } \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^{n} yi}{n}$$

(10)

Ou seja, o coeficiente de correlação (r) para o par de variáveis ((x, y)) é a razão entre a covariância amostral das variáveis (x) e (y) e o produto de seus respectivos desvios padrão (Martins, 2014).

Sendo assim se:

r= 1 Significa uma correlação perfeita positiva entre as duas variáveis.

r= -1 Significa uma correlação negativa perfeita entre as duas variáveis - Isto é,

se uma aumenta, a outra sempre diminui.

r= 0 Significa que as duas variáveis não dependem linearmente uma da outra.

6.6. Modelo de Interpolação Espacial

Os dados dos poluentes atmosféricos ($PM_{2.5}$, O_3, SO_2, NO_2 e CO) e da intensidade do vento foram interpolados no QGIS versão 3.28.11 firenze (QGIS, 2023) utilizando o método de interpolação espacial Inverso da Distância Ponderada (IDW - *Inverse Distance Weighted*) utilizou-se apenas para os anos de 2000, 2001, 2002 e 2018, pois foram os anos onde houve maiores concentrações, principalmente para o $PM_{2.5}$.

6.7. ERA5

O ERA5, desenvolvido pelo Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo (ECMWF), oferece reanálises globais de alta resolução com cobertura temporal contínua, tornando-se uma ferramenta essencial para análises climáticas de longo prazo (Hersbach et al., 2020). Para este estudo, o ERA5 foi utilizado para coletar dados de temperatura, velocidade e direção do vento entre os anos de 2000 e 2019 para o estado de Alagoas. Esta escolha se deu pela necessidade de informações climáticas contínuas com boa resolução espacial para análise das relações meteorológicas com as concentrações dos gases poluidores na atmosfera.

6.8. WRPLOT

O WRPLOT View é um software desenvolvido pela Lakes Environmental que é amplamente utilizado para a criação de diagramas de rosa dos ventos, análise e visualização de dados meteorológicos. A versão 8.0.2 do WRPLOT View é uma das versões mais recentes do programa e oferece diversas funcionalidades que auxiliam na análise de dados relacionados ao vento, sendo especialmente útil em estudos de qualidade do ar, planejamento ambienta (WRPLOT, 2021). Os dados anuais de direção e velocidade do vento foram baixados do site do INMET (Instituto Nacional e Meteorologia), sendo usadas as sete estações meteorológicas automáticas (EMA): i) Maceió, ii) Coruripe, iii) Palmeira dos Índios, iv) Pão e açúcar, v) Piranhas, vi) Arapiraca e vii) São Luiz do

Quitunde. Esses dados foram trabalhados no WRPLOT (Wind Rose Plots for Meteorological Data) para gerar rosas de poluição do $PM_{2.5}$ para o estado de Alagoas.

6.9. SPI

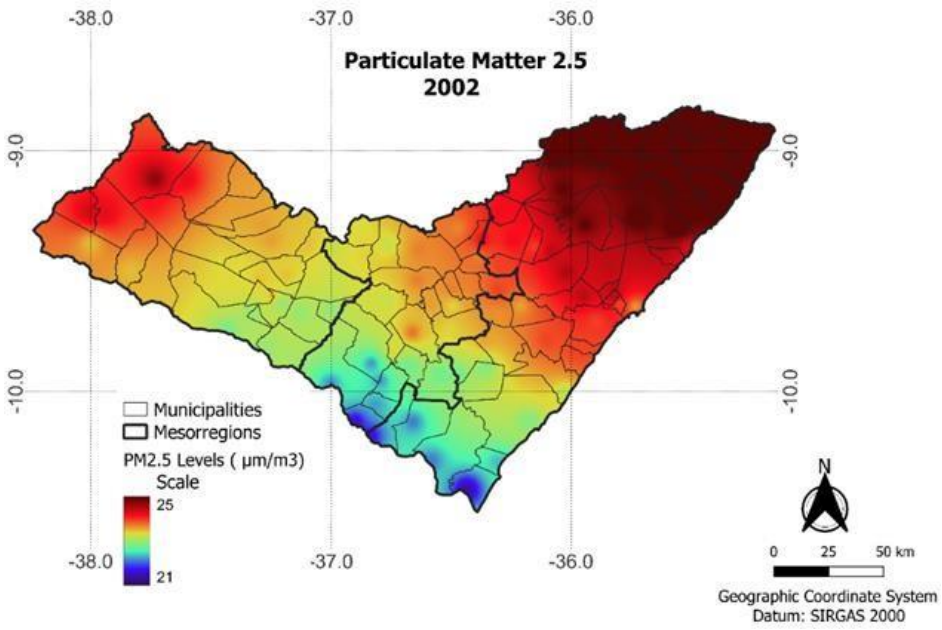
O Índice Padronizado de Precipitação (SPI) é uma ferramenta estatística amplamente utilizada para monitorar secas, oferecendo uma análise quantitativa das variações de precipitação em diferentes escalas temporais. Desenvolvido por McKee, Doesken e Kleist em 1993, o SPI se destaca por sua flexibilidade e capacidade de adaptação a diversos regimes climáticos (McKee et al, 1993). Identificar o período de seca permite correlacioná-lo com as concentrações de poluentes, possibilitando a análise de uma possível relação entre a baixa precipitação e o aumento na concentração desses poluentes.

7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.1 Análise Espacial dos Poluentes

A distribuição espacial dos poluentes atmosféricos ($PM_{2.5}$, O_3, SO_2, NO_2, CO) para os anos de 2002 e 2018 no estado de Alagoas foram avaliadas via uso do método IDW (Figuras 2 e 3), sendo verificado a dispersão, possíveis fontes de emissões e influência meteorológica. Ambos os anos foram escolhidos por se destacarem com concentrações elevadas de poluentes, principalmente de $PM_{2.5}$ via estatística descritiva. Os valores de $PM_{2.5}$ em quase todos os municípios de Alagoas foram superiores a (50 µg/m³ e 10 µg/m³) para o ano de 2002, com um decaimento em 2018, como preconizado pelo CONAMA de 1990 e 2018 respectivamente. Destaque para porção norte (N) da mesorregião Leste, com as maiores concentrações, seguido do Sertão.

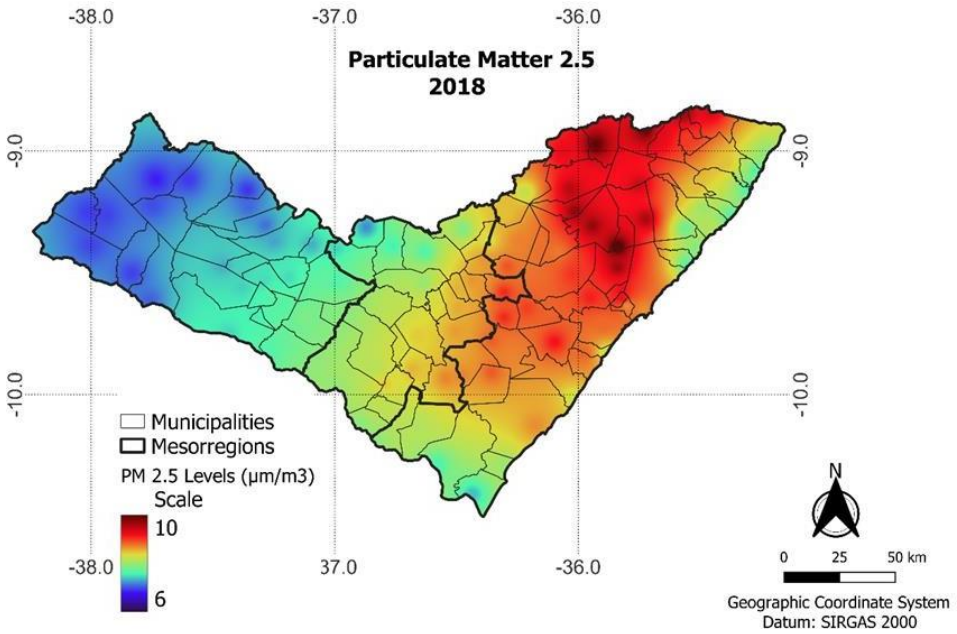
Figura 3: Concentração de material particulado ($PM_{2.5}$) em µg/m³ no 2002 no estado de Alagoas.



Fonte: Autor, 2023.

Comparativamente as Figuras 3 e 4 houve uma diminuição significativa de $PM_{2.5}$ em toda Alagoas, exceto o município de Messias (ID 79 – Figura 2) em 2018 pertencente a Região Metropolitana de Maceió (RMM), ultrapassou o limite (10,2 µg/m³) estabelecido pelo CONAMA 2018 e OMS 2005, que é de 10 µg/m³. Em 2018, o município de Messias tinha 20% de seu território ocupado por plantações de cana-de-açúcar, de acordo com dados da malha municipal do IBGE (IBGE, 2018). Observou-se que as áreas com maior concentração de material particulado (PM 2.5) coincidiam com as regiões de maior cultivo de cana-de-açúcar e esse cultivo pode liberar grandes quantidades de material particulado ($PM_{2.5}$) no ar, especialmente quando envolve práticas como a queima da palha antes da colheita. Entretanto, a média anual dos demais municípios variou entre 6,0 µg/m³ e 9,9 µg/m³, ainda considerado dentro dos padrões para os órgãos vigentes.

Figura 4: Concentração de material particulado ($PM_{2.5}$) em µg/m³ no 2018 no estado de Alagoas.



Fonte: Autora, 2023.

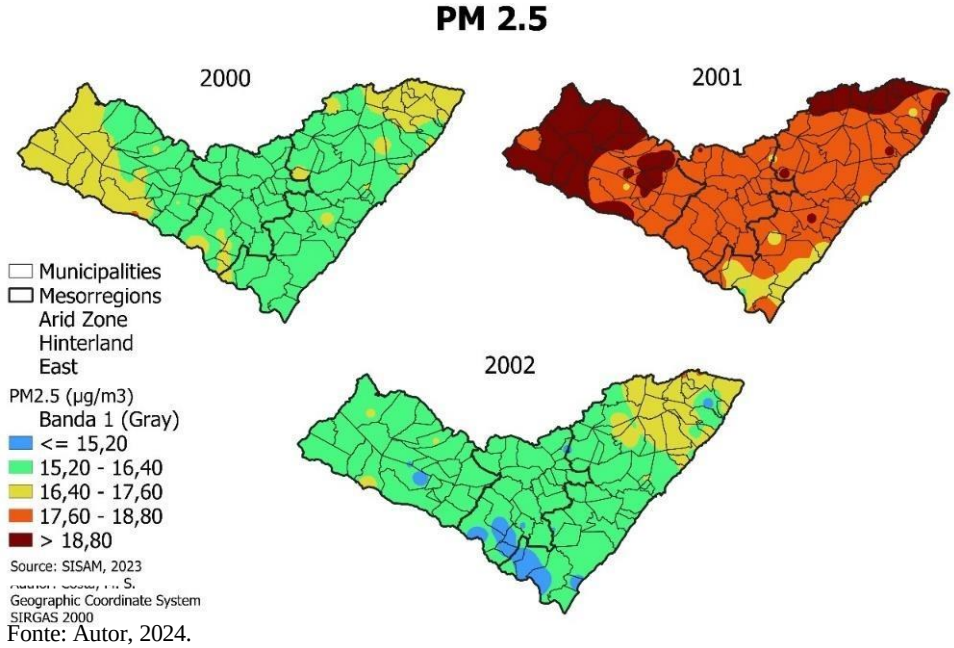
A circulação dos ventos desempenha um papel fundamental na dispersão ou concentração de poluentes atmosféricos. Durante a atuação do fenômeno El Niño, os ventos alísios enfraquecem, o que contribui para sua própria formação, ao reduzir a circulação e a intensidade das chuvas. Com a diminuição dos ventos, a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) também enfraquece, resultando em uma queda significativa na precipitação (INMET, 2023).

Esse efeito foi evidente em 2002, quando a região Nordeste do Brasil (NEB) enfrentou um período de severa estiagem, afetando particularmente o Norte e Nordeste do país devido à baixa precipitação associada ao El Niño (Abreu et al., 2023). Em 2018, a situação foi similar em Alagoas, onde a porção oeste do estado registrou uma seca extrema, enquanto o Leste apresentou chuvas abaixo da média entre janeiro e novembro, impactando a vegetação e a disponibilidade de água na região (Correia Filho et al., 2020; Sousa Santos et al., 2023).

Assim, os anos de 2002 e 2018 foram marcados por períodos de seca severa e prolongada, associados à atuação do El Niño, que reduziu a circulação dos ventos e, consequentemente, dificultou a dispersão dos poluentes, favorecendo sua concentração no ambiente.

A Figura 5 apresenta a concentração de $PM_{2.5}$ entre 2000 e 2002, destacando-se em relação a outros poluentes, com médias variando de 15 µg/m³ a 18 µg/m³ nesses anos. De acordo com as diretrizes de 2005 da Organização Mundial da Saúde (OMS), adotadas pelo CONAMA para definir os padrões de qualidade do ar no Brasil, os limites estabelecidos para o $PM_{2.5}$ são de 25 µg/m³ para a média diária e 10 µg/m³ para a média anual. Entretanto, as normas mais recentes da OMS atualizaram esses limites, recomendando médias mais rigorosas: 15 µg/m³ para a média diária e 5 µg/m³ para a média anual.

Figura 5 Concentração de $PM_{2.5}$ nos anos 2000, 2001 e 2002 para o estado de Alagoas.



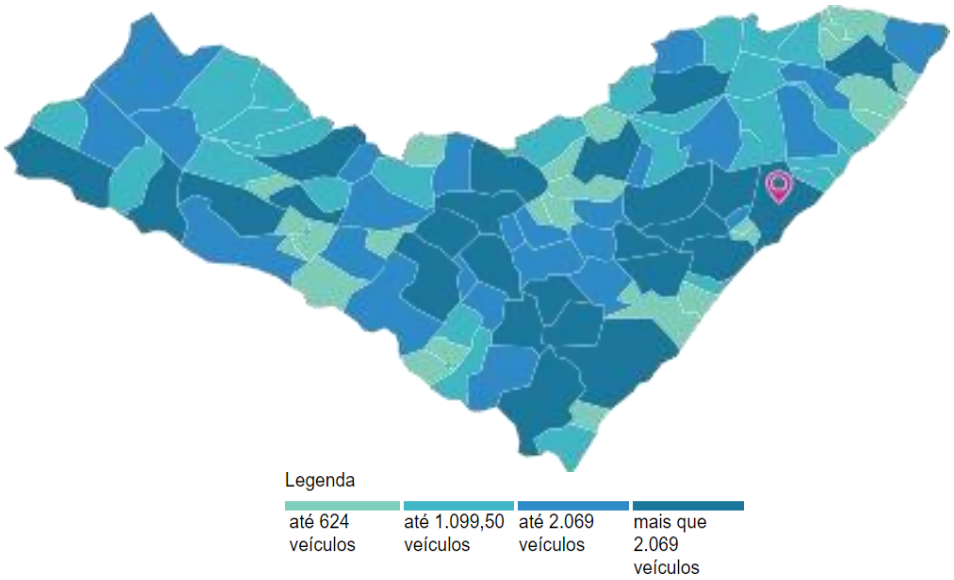
Fonte: Autor, 2024.

Sabe-se que a maior fonte de poluição nas cidades brasileiras é a frota de automóveis, que aumenta a cada ano e, portanto, Alagoas também segue a tendência nacional de expansão da frota veicular (Silva et al., 2024).

De acordo com os dados do DENATRAN (2006 e 2019), Alagoas aumentou sua frota veicular de 277.978 veículos em 2006 para 889.900 em 2019. A Figura 6 exibe a distribuição espacial da frota veicular de automóveis, conforme levantamento realizado em 2022. Os municípios com mais de 2.000 veículos estão localizados nas mesorregiões Leste e Agreste, que pode ter contribuído juntamente com a seca severa no aumento de $PM_{2.5}$ nos anos de 2002 (Figura 3) e 2018 (Figura 4). Na Figura 5 está representada a distribuição da frota veicular no estado, sabe-se que o aumento da frota está diretamente relacionado ao nível de poluição atmosférica, especialmente ao MP. Entre os municípios com as maiores frotas veiculares destaque para Maceió (392.177 veículos); Palmeira dos

Índios(285.56 veículos); Delmiro Gouveia (248.77 veículos); Rio Largo (211.87 veículos) e Arapiraca (130.573 veículos).

Figura 6: Distribuição de veículos no estado de Alagoas para o ano de 2022.



Fonte: IBGE, 2022.

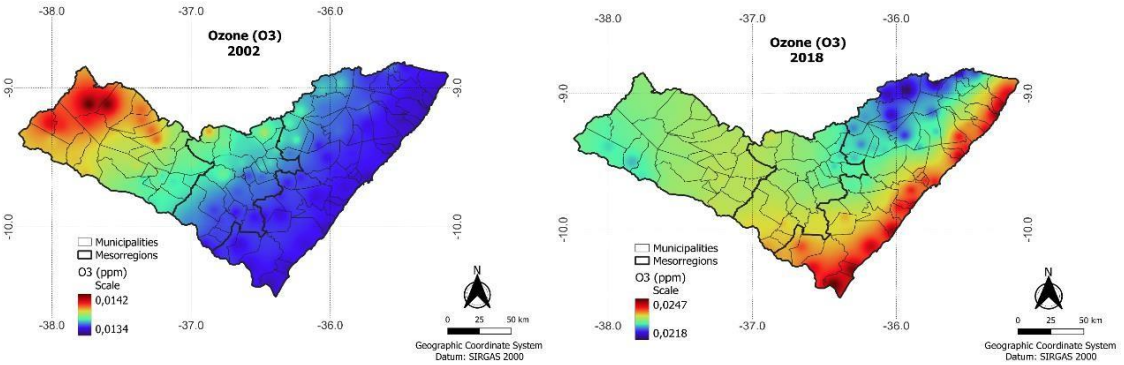
Em 2012, Wu analisou a emissão de poluentes realizada no tráfego de Taiwan e avaliou as distribuições do número de partículas por tamanho, sendo constatado que os padrões diurnos eram influenciados pela densidade do tráfego. Durante as horas de maior tráfego houve um aumento significativo da concentração de PM 2.5 – 1.0 e 0.25. Concluindo assim que em ambientes urbanos, as emissões oriundas do tráfego rodoviário são as principais fontes de partículas atmosféricas, e o tamanho e a distribuição delas influenciam o transporte, a deposição e os efeitos na saúde e no meio ambiente.

Por esse motivo, o monitoramento da concentração de material particulado é de grande importância, pois possui em sua constituição, material carcinogênicas e/ou mutagênicas, que podem ser emitidos de várias fontes, incluindo a queima da biomassa (Silva et al.,2011).

A Figura 7 mostra a concentração do O_3 para o ano de 2002 e 2018 em Alagoas. A maior concentração do O_3 ocorreu no Sertão em 2002, onde a temperatura e radiação são elevadas, e assim favorece a formação do O_3, uma vez que a radiação ultravioleta é um percursor para as suas reações de formação (Boleira Lopo e Lucio, 2013). Outro fato refere-se as queimadas na Caatinga onde INPE verificou no ano de 2002 que ocorreram

25.422 focos de calor no NEB. A queima da biomassa libera para atmosfera gases, tais como, o NO_2 que passa por uma série de reações químicas e que vão contribuir para a formação de ozônio troposférico (Calderón, 2015).

Figura 7 Concentração do Ozônio (O_3) em ppm para os anos de 2002 e 2018 no estado de Alagoas.

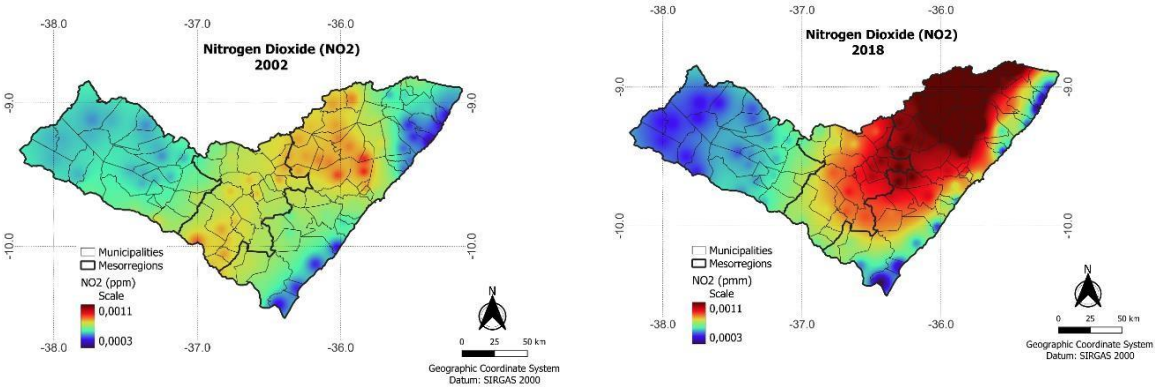


Fonte: Autor, 2023.

A seca severa juntamente com alta incidência de radiação solar acarretam nas maiores concentrações de O_3 no Sertão e Leste (De Souza et al., 2024). As queimadas na Mata Atlântica foram menores no ano de 2018, com cerca de 11.296 focos de calor (INPE, 2023). A concentração do O_3 no Leste se deve ao adensamento populacional e aumento da frota automotiva (Figura 6).

A Figura 8 exibe a concentração do NO_2 em Alagoas. Destaque para as maiores concentrações em 2018 e mais uma vez a mesorregião Leste. É sabido que N entra no meio ambiente via produção industrial e espécies utilizadas em fertilizantes se dispersam facilmente no ambiente, contribuindo para a entrada de grandes quantidades de N na atmosfera (Garcia et al., 2013). Esses processos de combustão geram energia térmica suficiente para promover reações secundárias entre o nitrogênio (N_2) e o oxigênio (O_2), componentes majoritários do ar atmosférico, e assim à produção de monóxido de nitrogênio (NO), que por sua vez é rapidamente oxidado a NO_2, devido à presença de compostos oxidantes na atmosfera, tais como, o O_3 (Rocha e Cardoso, 2020). Assim, o transporte por veículos com motores à combustão, as usinas termoelétricas, as indústrias que utilizam combustíveis em seu processo de produção e a queima de biomassa são fontes significativas de gases de N para o meio ambiente (Rocha e Cardoso, 2020).

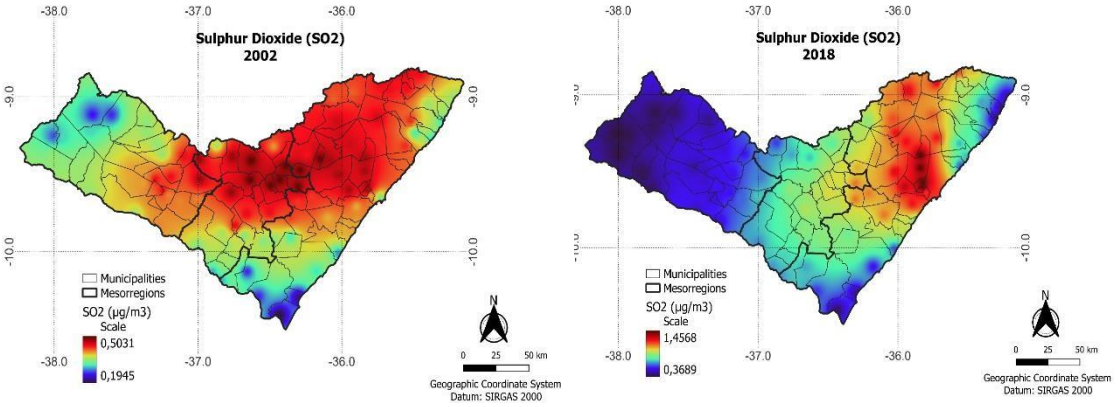
Figura 08: Concentração de Dióxido de Nitrogênio (NO_2) em ppm para os anos de 2002 e 2018 no estado de Alagoas.



Fonte: Autor, 2023.

Na Figura 9 exibe a concentração do SO_2 para o ano de 2002 e 2018, onde maior ocorrência de SO_2 foi nas mesorregiões Leste e Agreste do Estado. As maiores emissões de compostos de S na atmosfera são derivadas do carvão mineral e óleos derivados do petróleo, eles são classificados como poluentes primários, que são aqueles emitidos diretamente pelas fontes de emissão (Vergnhanini Filho, 2020).

Figura 9: Concentração de Dióxido de Enxofre (SO_2) em µg/m³ para os anos de 2002 e 2018 no estado de Alagoas.

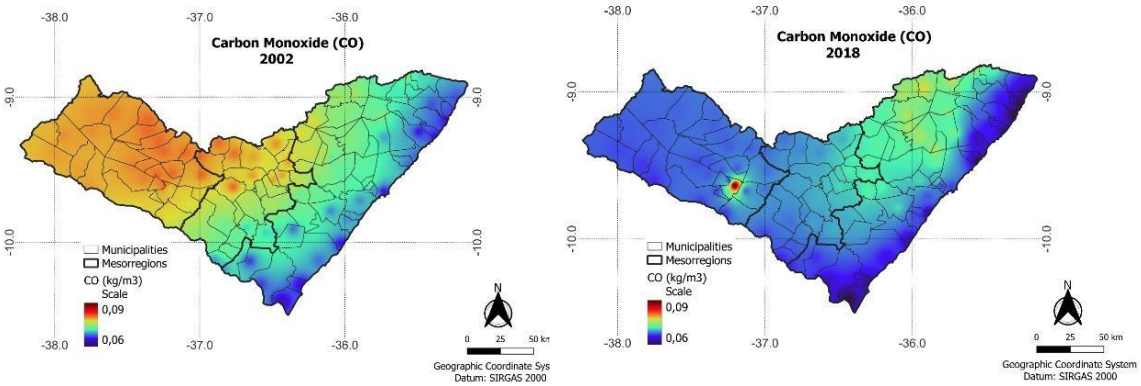


Fonte: Autor, 2023.

Na Figura 10 exibe a concentração do CO em Alagoas para os anos de 2002 e 2018. As maiores concentrações ocorreram no Sertão e Agreste em 2002, com diminuição significativa de CO, em 2018. Destaque para município de Jacaré dos Homens (ID 9 –

Figura 1), com maior concentração em 2018 (0.091 ppm), porém nos limites do CONAMA 2018.

Figura 10: Concentração de Monóxido de Carbono (CO) em ppm para os anos de 2002 e 2018 no estado de Alagoas.



Fonte: Autor, 2023.

O poluente CO pode ser liberado no ambiente por fontes naturais, tais como, descargas elétricas e emissão de gás natural e antropogênicas, como produto da combustão incompleta de combustíveis fósseis, sistemas de aquecimento, usinas termelétricas carvão e queima de biomassa. Outras fontes incluem a oxidação fotoquímica de COVs na atmosfera ou na superfície de corpos de água. Destaque para as maiores concentrações do CO em 2002, sendo relacionadas a queima de biomassa da Caatinga (Sousa Filho et al., 2022).

A preocupação com as concentrações de CO na atmosfera urbana reside em sua elevada toxicidade. Ao contrário do MP, que geralmente exerce seus efeitos a médio e longo prazo na saúde das pessoas, o poluente CO, provoca efeitos imediatos associados a doenças agudas. Este gás é imediatamente inalado, difundindo-se rapidamente nos alvéolos pulmonares, na corrente sanguínea e nas membranas da placenta (Weaver, 2009).

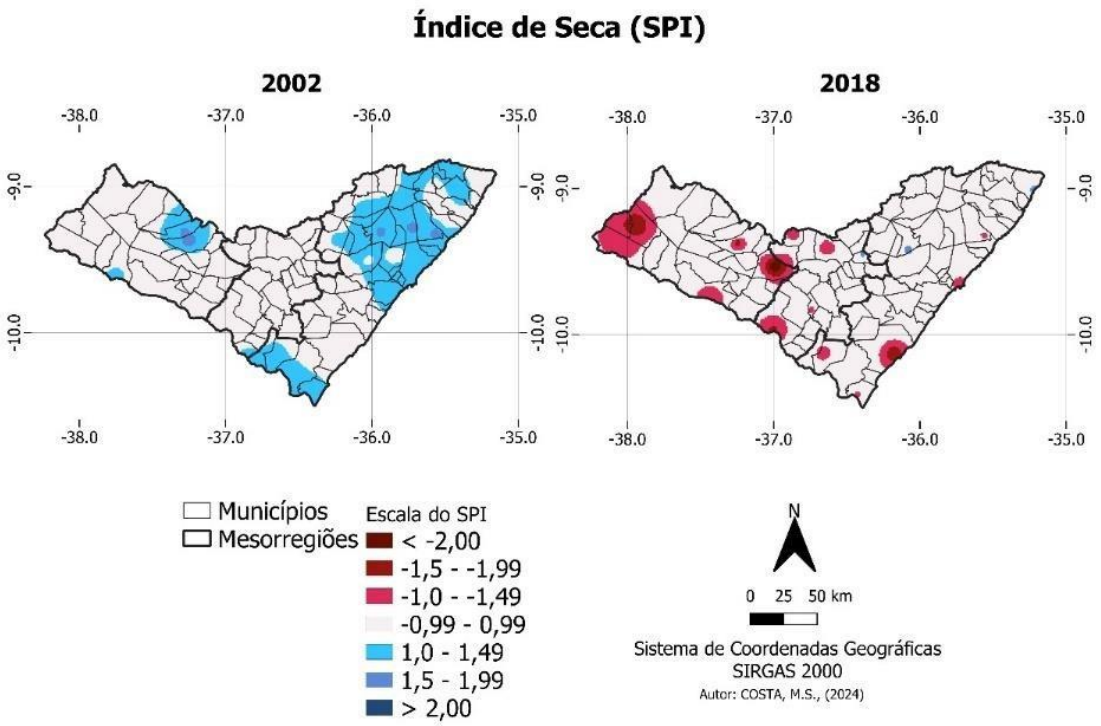
Os sintomas da intoxicação subaguda por CO manifestam-se através de dor de cabeça, tonturas, fadiga e mal-estar, frequentemente assemelhando-se aos sintomas da gripe. No organismo humano, a afinidade da hemoglobina pelo CO é consideravelmente maior do que pelo oxigênio. O CO absorvido se une à hemoglobina, formando a carboxihemoglobina (COHb), a qual reduz a capacidade de transporte de oxigênio no sangue e compromete a liberação eficaz de oxigênio da hemoglobina para os tecidos

vasculares. Em casos mais graves de exposição, essa condição pode resultar em hipóxia, caracterizada pela insuficiência de oxigênio nos tecidos do corpo humano (Weaver, 2009).

Para analisar as características de seca no estado de Alagoas, utilizou-se o Índice de Precipitação Padronizada- SPI (*Standardized Precipitation Index*), que foi desenvolvido por McKee et al. (1993), e é baseado somente no produto de precipitação mensal. A principal característica do SPI é a utilização de monitoramento tanto de condições úmidas como secas em diversas escalas de tempo (McKee et al, 1993).

Aplicou-se o método de SPI nos dados das estações pluviométricas presente no estado de Alagoas, obtidos da Agência Nacional das Águas (ANA), para os anos de 2002 e 2018 como representado na Figura 11 a seguir.

Figura 11: Índice de Precipitação do estado de Alagoas para os anos 2002 e 2018.



O ano de 2002 é caracterizado como muito úmido, especialmente na mesorregião Leste, enquanto 2018 se destacou por ser seco ou muito seco em várias áreas, com predominância na mesorregião do Sertão. Essa classificação foi realizada levando em consideração a classe de IPP, que varia de (≥2,00) extremamente úmido, (1,5 a 1,99) Muito úmido, (1,00 a 1,49) moderadamente úmido, (0,99 a –0,99) próximo ao normal, (–1,00 a –1,49) Moderadamente seco, (–1,50 a –1,99) muito seco e (≤ –2,00) extremamente seco (Oliveira Júnior et al., 2012). Ao comparar essa análise com os poluentes

atmosféricos estudados, observa-se que em 2002 as concentrações de ozônio (O_3), dióxido de nitrogênio (NO_2) e monóxido de carbono (CO) foram mais baixas, mas houve um comportamento oposto para o material particulado ($PM_{2.5}$) e o dióxido de enxofre (SO_2). Moraes (2017) demonstrou que a concentração de poluentes tende a diminuir com a precipitação, especialmente o monóxido de carbono (CO) e o material particulado ($PM_{2.5}$). Contudo, no presente estudo, não foi observado o mesmo comportamento para o $PM_{2.5}$. Já em 2018, houve um aumento nos poluentes na mesorregião Leste, com exceção do monóxido de carbono. Entretanto, nas áreas de seca moderada e severa, não foram verificadas concentrações elevadas.

7.2. Análise das médias diárias e anuais

Na Figura 12 exibe as análises diárias dos poluentes, o $PM_{2.5}$ é o único cuja concentração média ultrapassou o terceiro quartil. Isso indica que 75% dos valores estão abaixo da média, com uma variabilidade significativa nas concentrações diárias.

Comparando esses dados com os limites diários estabelecidos pelo CONAMA (2018), de 25 µg/m³, e pela OMS (2021), de 15 µg/m³, verifica-se que a concentração média diária de $PM_{2.5}$ está dentro dos limites estabelecidos por ambos os órgãos ambientais para a maior parte dos dados. Uma análise mais profunda nos dados revela que os anos de 2003 a 2019 apresentam concentração máxima de 8,31 µg/m³, no entanto, entre 2000 a 2002 os valores ultrapassaram as recomendações dos órgãos mencionados, pois constatou-se, em episódios específicos, concentrações de 1.191,00 µg/m³ em Delmiro Gouveia no dia 14 de março de 2000 as 6:00 h, 686 µg/m³ em Mata Grande em 2001 as 6:00 h no dia 12 de março e 999 0, em Feliz Deserto no dia 03 de fevereiro de 2002 as 18:00 h.

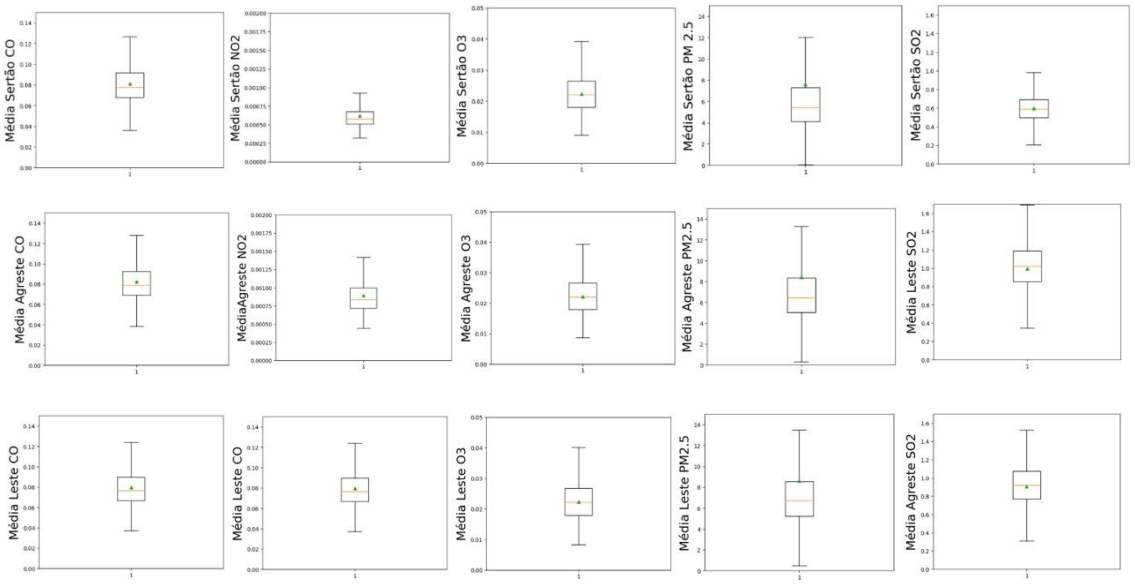
No entanto, é importante destacar que, embora as concentrações médias diárias estejam dentro dos limites regulamentares, os valores que excedem o terceiro quartil indicam picos de poluição que podem ter impactos negativos à saúde. Esses picos podem ser especialmente prejudiciais para grupos vulneráveis, como crianças, idosos e pessoas com condições respiratórias preexistentes (Wang et al., 2022; Shetty et al., 2023).

Além disso, a variabilidade nas concentrações de $PM_{2.5}$ e a ocorrência de valores acima do terceiro quartil destacam a necessidade de monitoramento contínuo e de

estratégias eficazes para mitigar os fatores que contribuem para esses picos de poluição. Isso inclui a implementação de políticas públicas voltadas para a redução das emissões de fontes conhecidas, como veículos automotores e processos industriais (Khreis et al., 2023), além da promoção de práticas sustentáveis que possam ajudar a manter as concentrações de $PM_{2.5}$ em níveis seguros para a população. Isso reforça a necessidade de uma abordagem abrangente para a gestão da qualidade do ar no estado de Alagoas.

Para os demais poluentes, a maioria dos valores está entre o primeiro e o terceiro quartil, indicando que 50% dos valores estão concentrados ao redor da mediana e abaixo da média. Isso sugere uma distribuição relativamente equilibrada das concentrações diárias desses poluentes, com variações menores ao longo do tempo. O O_3 foi o único poluente que apresentou menor variabilidade equilibrado ao longo da série temporal, isso indicando uma distribuição uniforme das suas concentrações diárias, com menores variações que não ultrapassaram 0,043 ppm.

Figura 12: Média diária das concentrações dos poluentes CO, NO_2, O_3, $PM_{2.5}$ e SO_2 para as mesorregiões do sertão, agreste e leste alagoano do ano de 2000 a 2019.



Fonte: Autor, 2024.

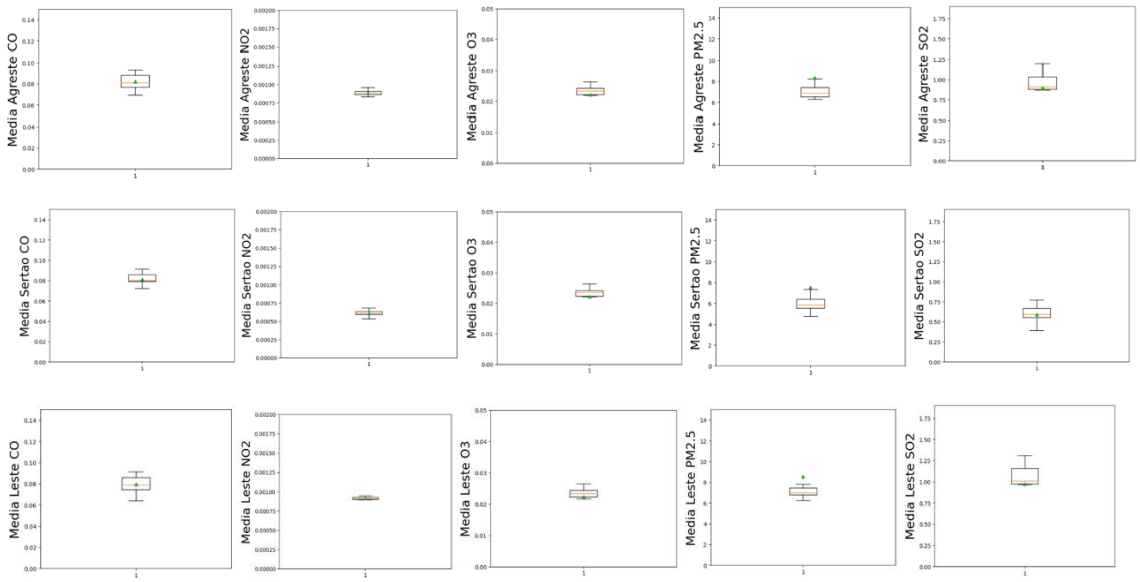
A figura 13 exibe o CO com variações entre 0,059 a 0,081 ppm e o NO_2 com 0,00075 a 0,00091 ppm, em ambos os poluentes apresentam similaridade, isso implica em uma distribuição equilibrada das suas concentrações anuais (média igual ou semelhante a mediana da distribuição). Esse padrão sugere que as fontes de emissão

destes poluentes e as condições ambientais que influenciam suas concentrações têm sido relativamente estáveis ao longo dos anos, sem episódios de poluição.

Os valores médios anuais de O_3 foram de 0,0008 ppm no Sertão e 0,022 ppm no Agreste e Leste de Alagoas. Para o SO_2, os valores foram de 0,15 µg/m³ no Sertão, 0,54 µg/m³ no Agreste e 0,46 µg/m³ no Leste Alagoano. Os valores de referência do CONAMA e da OMS não incluem concentrações anuais para o O_3, apenas para períodos de 8 horas, o que impossibilita a comparação. No entanto, as concentrações de SO_2 estão dentro dos limites recomendados, já que o valor anual recomendado pelo CONAMA de 2018 foi de 20 µg/m³. A OMS não fornece valores anuais para esse poluente.

Já o $PM_{2.5}$ apresentou valores abaixo da média anual de 8,52 µg/m³, isso indica que as concentrações deste poluente foram baixas ao longo dos anos para os padrões do CONAMA (2018), mas altas para os limites da OMS (2021). Exceder os limites das diretrizes de qualidade do ar está associado a risco importante de saúde pública segundo a OMS (WHO, 2021).

Figura 13: Médias anuais das concentrações dos poluentes CO, NO_2, O_3, $PM_{2.5}$ e SO_2 para as mesorregiões do sertão, agreste e leste alagoano do ano de 2000 a 2019.



Fonte: Autor, 2024.

7.3. Teste de Mann-Kendall e Pettit

Na Tabela 7 encontra-se análise temporal dos poluentes utilizando o teste de Mann-Kendall com nível de significância de 5%, com padrões distintos nas mesorregiões de Alagoas. No Leste, os resultados indicaram que não houve tendência significativa diárias nas concentrações dos poluentes, exceto para o O_3, de 0,013 ppm entre 2000 a 2002 para 0,023 ppm a partir de 2003, mesmo que os valores sejam baixos, sugere um aumento e 176,9%. Contudo, ao longo do período, as concentrações de poluentes permaneceram constantes.

Tabela 7: Tendência via teste de Mann-Kendall para valores médios diários dos poluentes atmosféricos em Alagoas, à um nível de significância de 5%.

	Sertão (τ)	Tendência	Agreste (τ)	Tendência	Leste (τ)	Tendência
CO	-0,098*	Com	-0,055*	Com	-0,011	Sem
NO_2	-0,089*	Com	-0,015	Sem	0,010	Sem
O_3	0,212	Sem	0,206	Sem	0,204*	Com
$PM_{2.5}$	-0,114*	Com	-0,054*	Com	-0,014	Sem
SO_2	-0,058*	Com	-0,016*	Com	-0,003	Sem

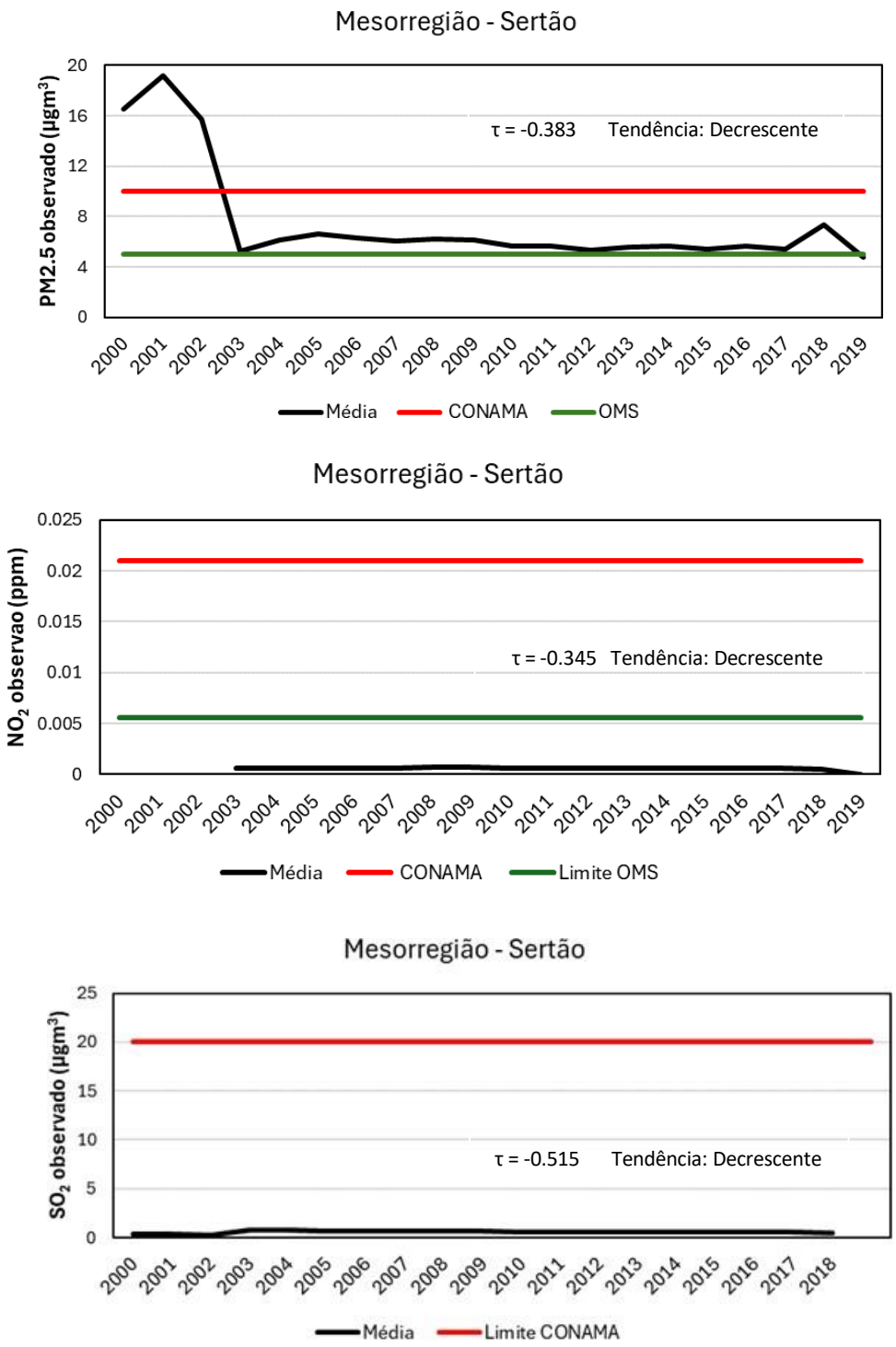
Legenda: *Fraca, **Moderada e ***Forte.

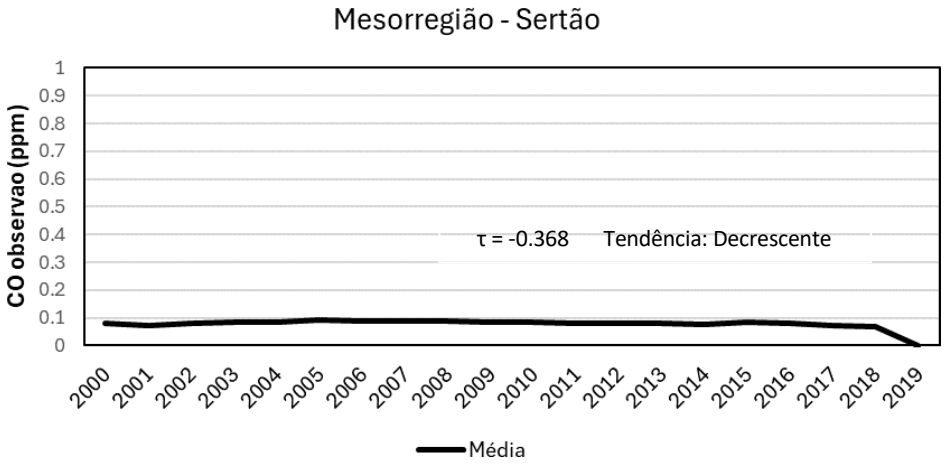
Fonte: Autor, 2024.

A Figura 14 houve tendência significativa anual para o sertão, revelando uma tendência significativa decrescente para os poluentes $PM_{2.5}$ (τ = -0.515), SO_2(τ = -0.345), NO_2 (τ = -0.383) e CO (τ = -0.368). No entanto, apenas os valores de $PM_{2.5}$ e NO_2 podem ser comparados com os limites das médias anuais estabelecidos pelo CONAMA (10 µg/m³) e OMS (5 µg/m). Os dados indicaram que as concentrações de $PM_{2.5}$ foram superiores a recomendado nos anos 2000 (17,8 µg/m³), 2001 (20,24 µg/m³) e 2002 (17,78 µg/m³), no entanto, abaixo dos limites ao longo da série temporal, com valores máximos de 9,4 µg/m³ em Rio Largo em 2005. Entretanto, o município de Messias em 2018 atingiu 10,20 µg/m³, violando os limites de PQAr's. Essas concentrações elevadas podem estar relacionadas a fatores meteorológicos como inversões térmicas e baixa velocidade do vento, uma vez que agrava significativamente a poluição do ar, aprisionando poluentes na cama mais próxima o solo, a inversões em áreas urbanas são oriundas de fontes antropogênicas (Moraes et al 2019). Já a concentração de NO_2 manteve-se abaixo dos

limites durante todo o período estudado, ambos demonstrando um decrescimento significativo.

Figura 14: Análise anual temporal da concentração de $PM_{2.5}$, CO, NO_2 e SO_2 comparativamente com os limites do CONAMA (2018) e OMS (2021) para o sertão. Alagoano.





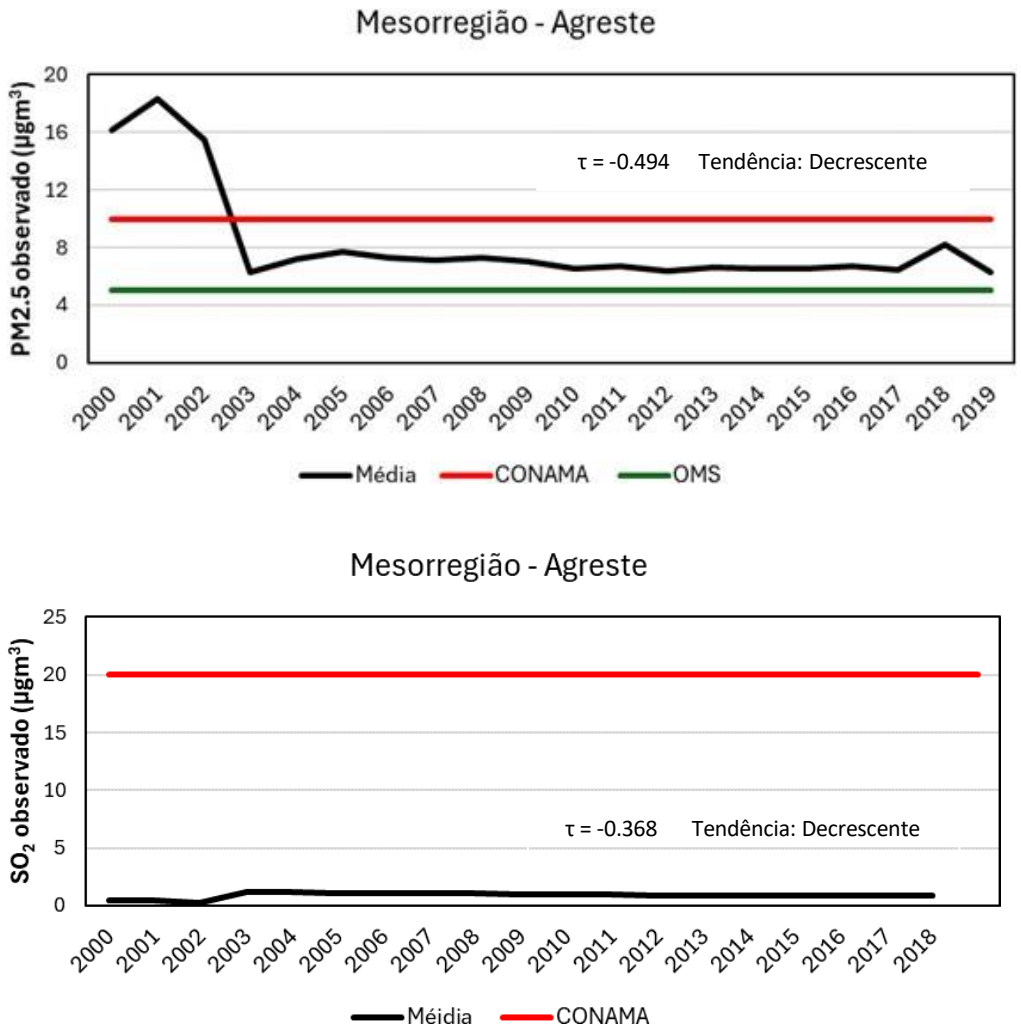
Fonte: Autor (2024).

A análise comparativa dos limites recomendados não pode ser realizada para o CO, pois não há limites anuais descritos na literatura, apenas limites de 8 h com 9 ppm, como descrito no CONAMA (2018) e OMS (2021) representados na Tabela 2.

A redução nos níveis de PM2.5 é particularmente importante devido ao seu impacto adverso na saúde. A hipertensão é uma das doenças associadas principalmente ao $PM_{2.5}$, que tem sido reconhecido como um fator de risco independente para o aumento da pressão arterial sistólica (PAS) como descreve Salerno, et al 2023. Da mesma forma, a queda nas concentrações de SO_2, NO_2 e CO sugere uma melhoria na qualidade do ar, como mostrado no trabalho de Biswal et al. (2020), que durante a pandemia, quando o lockdown foi implementado a circulação de veículos e comércios tiveram atividades reduzidas a concentração desses poluentes diminuíram, melhorando a qualidade do ar. Manter essa diminuição depende de medidas eficazes de controle de poluição e a implementação de práticas ambientais rigorosas, para que se tenha um controle eficaz das emissões, particularmente aquelas originadas do transporte, processos industriais e queimadas (Sant'Anna et al., 2021).

Para a região do Agreste (Figura 15) foi observada uma tendência decrescente significativa para os poluentes $PM_{2.5}$ e SO_2. A diminuição de $PM_{2.5}$ é crucial, pois está associada a problemas de saúde graves, como doenças respiratórias e cardiovasculares. A redução de SO_2 é igualmente relevante, pois contribui para a diminuição da chuva ácida e dos problemas respiratórios associados a esse poluente.

Figura 15: Análise anual temporal da concentração de $PM_{2.5}$ e SO_2 comparativamente com os limites do CONAMA (2018) e OMS (2021) para o agreste Alagoano.



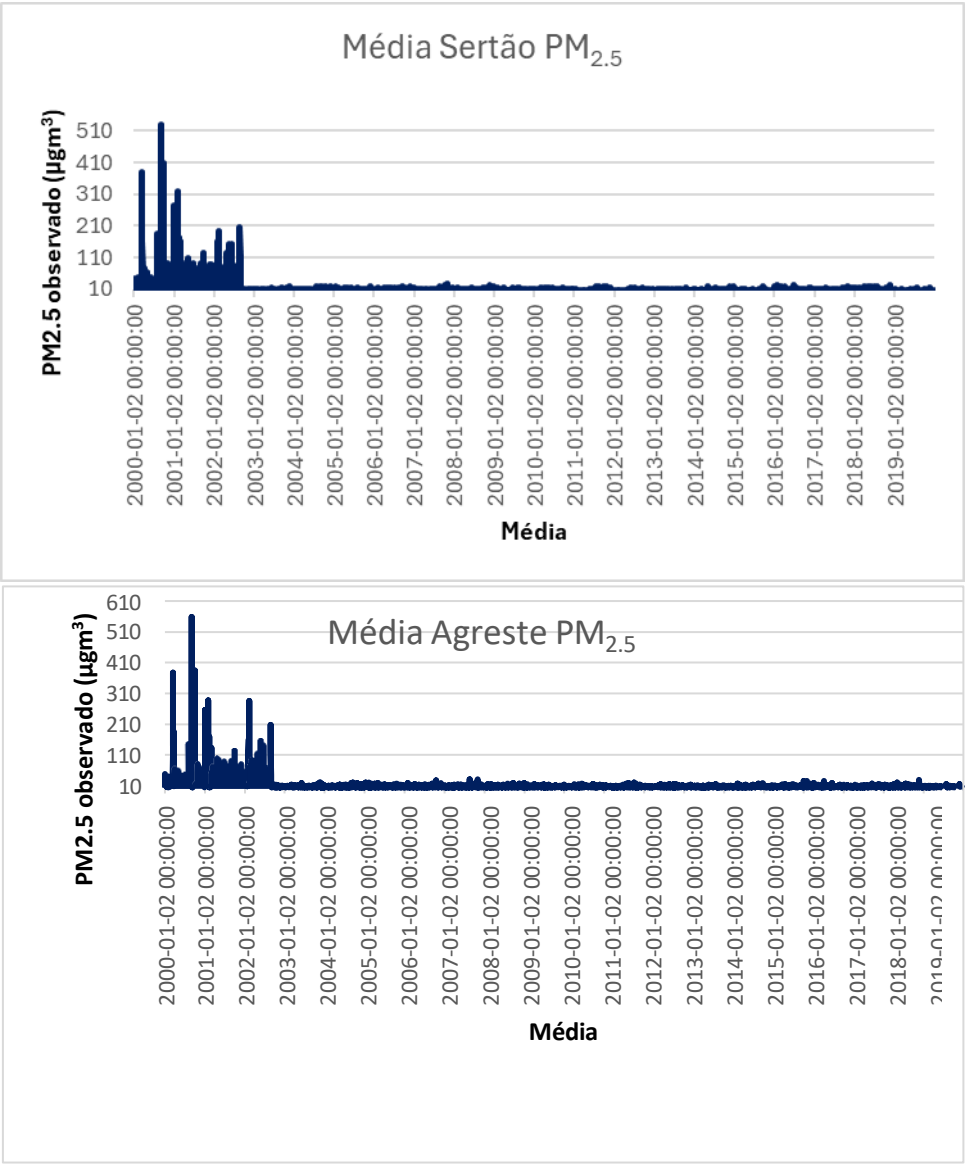
Fonte: Autor (2024).

Ao analisar a série temporal diária dos poluentes na Figura 16, observa-se a variabilidade das concentrações desses poluentes. Todos os poluentes monitorados apresentaram uma tendência significativa de redução na mesorregião do Sertão Alagoano, conforme indicado pelos testes de MK e Pettitt.

Entre os poluentes avaliados, apenas o $PM_{2.5}$ mostrou concentrações superiores aos limites diários recomendados pelo CONAMA (25 µg/m³) e pela OMS (10 µg/m³) durante os anos 2000 a 2002, com 661 dias com PQAr's > 10 µg/m³, sendo 170 dias foram superiores a 25 µg/m³. Nos anos subsequentes, houve uma redução das concentrações de $PM_{2.5}$ em aproximadamente 99,24% saindo de máximas de 1.191 µg/m³ para 9 µg/m³, permanecendo abaixo dos valores-limite estabelecidos por essas entidades reguladoras. A

comparação dos valores limite do CONAMA e da OMS com os dados obtidos revelou que, apesar dos valores iniciais elevados, houve uma tendência significativa de diminuição tanto no Sertão quanto no Agreste. Pontos de mudança na tendência central foram observados em 2 de fevereiro de 2009 e 31 de agosto de 2008, respectivamente. Chen et al. (2020) demonstraram em seu estudo em Pequim (China) que a baixa precipitação e a inversão térmica são fatores determinantes para o acúmulo de poluentes atmosféricos. O mesmo comportamento foi observado em 2009 no Sertão, porém com temperaturas mais elevadas, apresentando máximas de 40ºC e mínimas de 19ºC, o que favorece fenômenos como inversões térmicas.

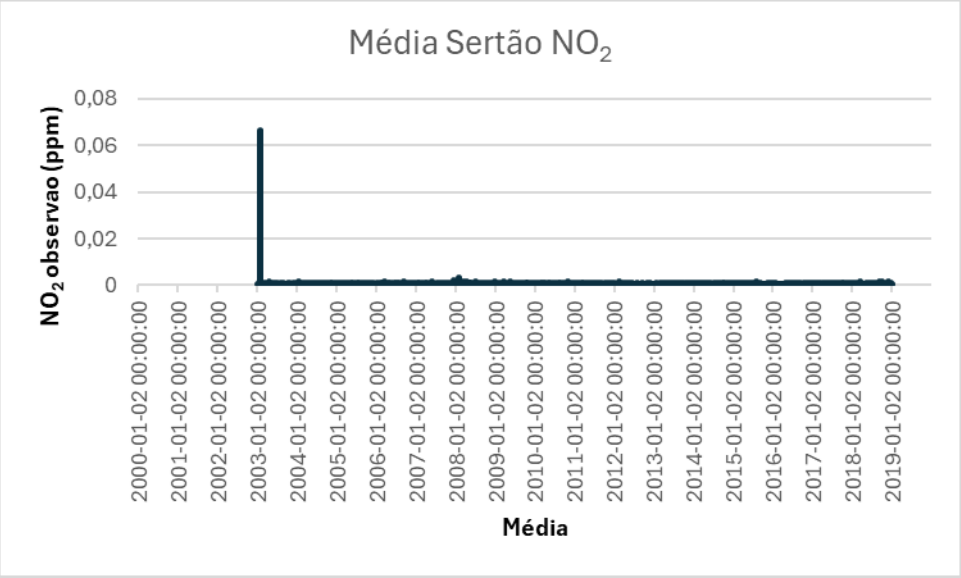
Figura 16: Médias diárias de PM $_{2.5}$ para o sertão e agreste do ano de 2000 a 2019.



Fonte: Autor (2024).

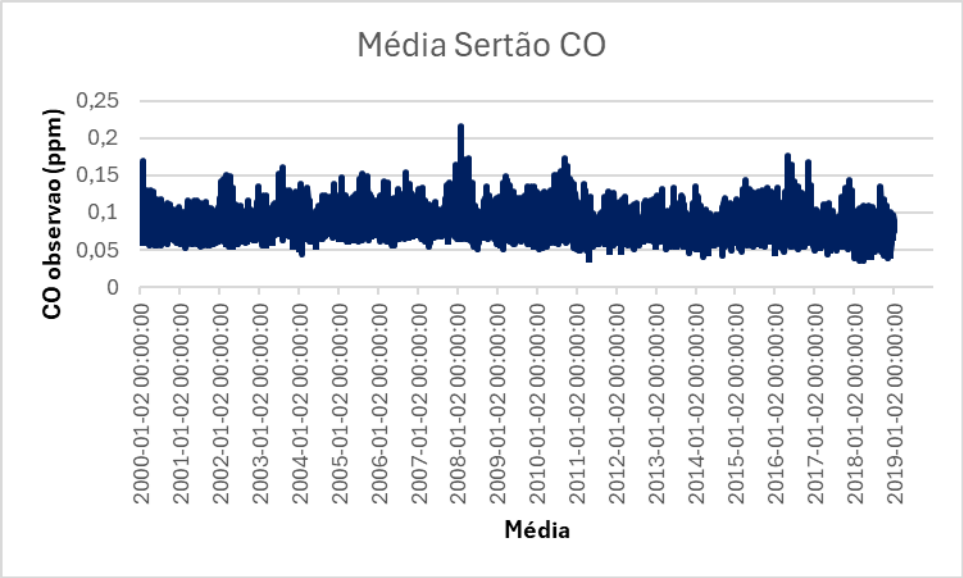
Na Figura 17 estão representadas as médias diárias para o dióxido de nitrogênio, onde o estudo constatou uma diminuição significativa para o NO_2 na mesorregião do sertão, a partir do dia 20 de agosto de 2008, saindo de 0,0083 ppm para 0,0080 ppm, as médias. O NO_2 é crucial na química dos radicais livres e nos processos fotoquímicos que ocorrem tanto na troposfera quanto na estratosfera. Ele pode contribuir para a formação de ozônio e material particulado fino através de processos físico-químicos complexos (Shah et al 2023).

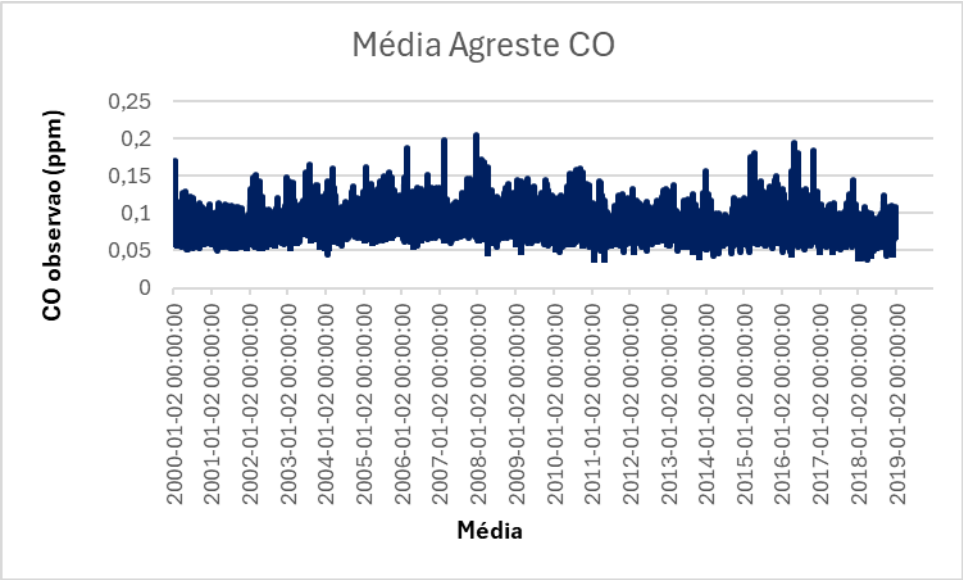
Figura 17: Médias diárias de NO_2 para o sertão do ano de 2000 a 2019.



No dia 28 de março de 2011, houve uma redução na concentração diária de CO no Sertão, de 0,021 ppm até 2010 para 0,017 ppm a partir de 2011, conforme a Figura 18. As temperaturas máximas e mínimas registradas para o respectivo ano foram de 41ºC e 22ºC no Sertão, com uma média pluviométrica de 643,7 mm.

Figura 18: Médias diárias de CO para o Sertão e Agreste do ano de 2000 a 2019.

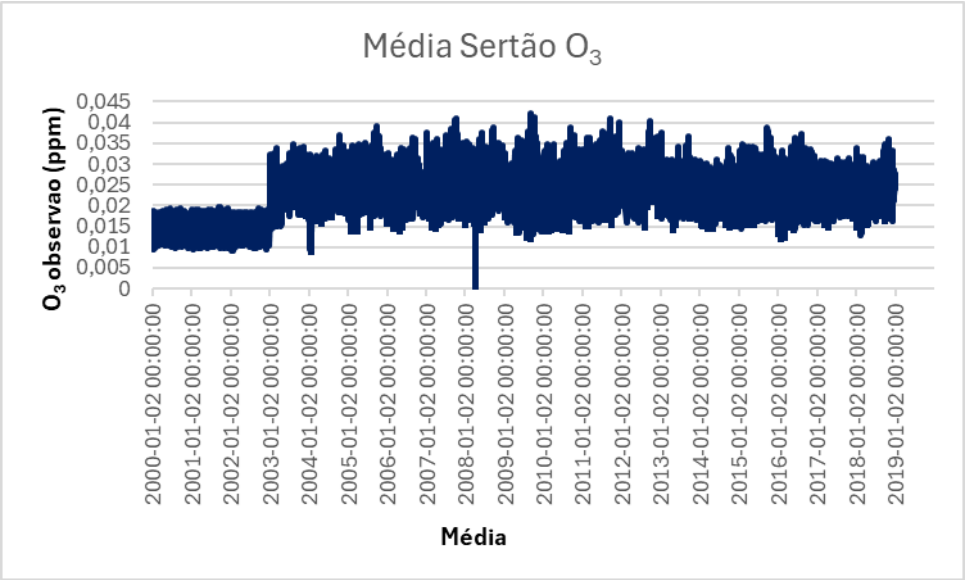


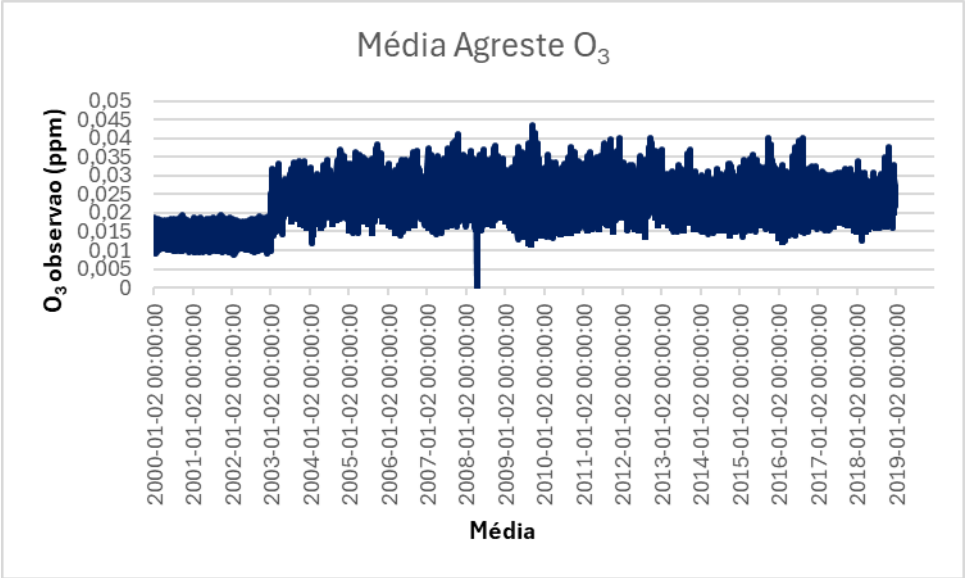


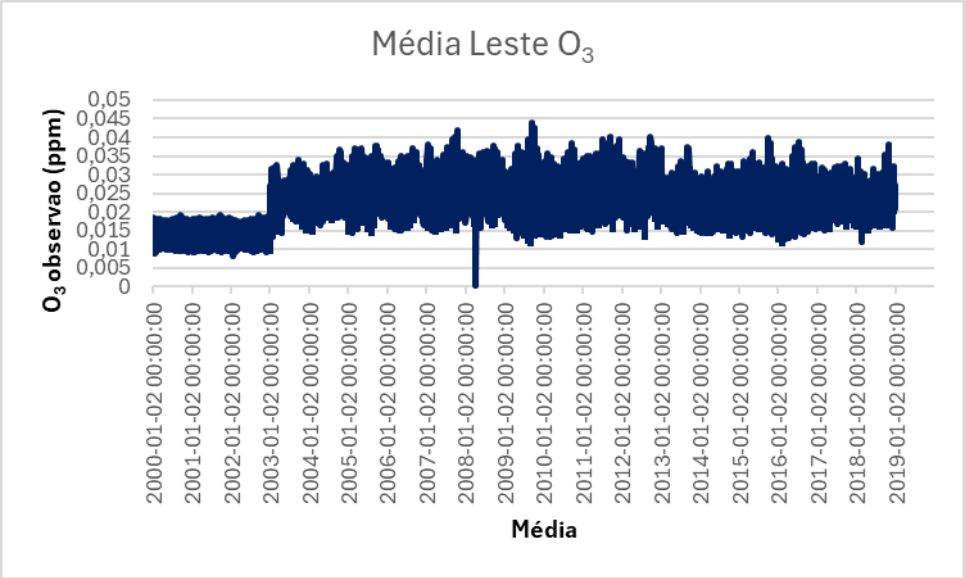
Fonte: Autor (2024).

Na Figura 19, estão representadas as médias diárias para o O_3, onde o comportamento de aumento foi significativo em todo o estado, a partir do ano de 2003, dentro dos limites regulamentados. Aulakh (2020) mostrou em seu estudo que mesmo em concentrações abaixo dos limites preconizados pelas agências ambientais e por curtos períodos foi ligada a um aumento no risco de mortalidade devido a doenças como a doença pulmonar obstrutiva crônica, hipertensão, doença cardíaca isquêmica e derrame (Lin, et al 2022). Os estudos realizados por Lin (2022), mostraram resultados que indicam que moradores de áreas urbanas quanto rurais podem sofrer com efeitos negativos à saúde devido à exposição de curto prazo ao O_3.

Figura 19: Médias diárias de O_3 para o sertão, agreste e leste alagoano do ano de 2000 a 2019.



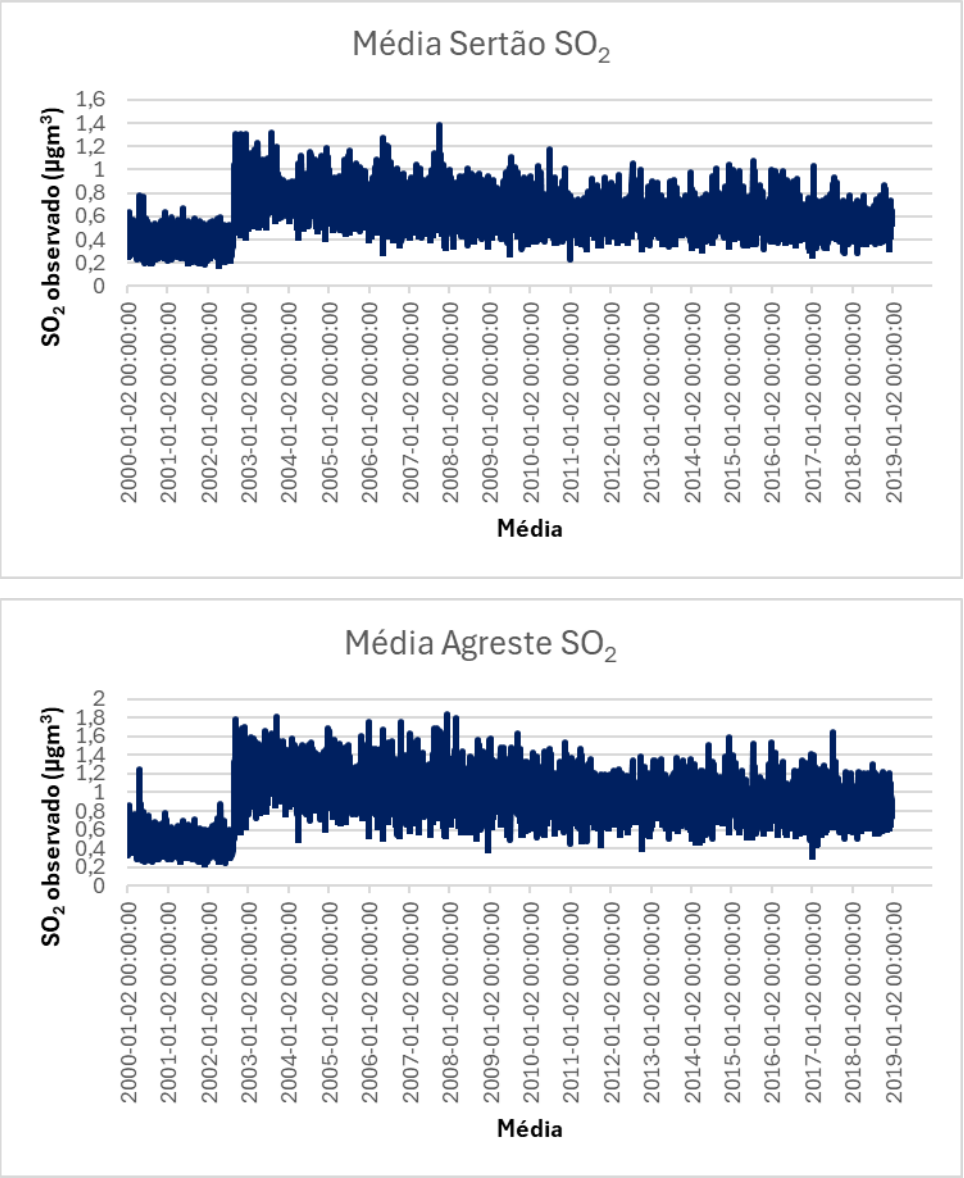




Fonte: Autor, 2024.

Já o SO_2 (Figura 20), que é um gás formado principalmente nas indústrias pela queima de combustíveis fósseis, como indicado no trabalho de Vergnhanini (2020), teve uma diminuição significativa no sertão e agreste alagoano equivalentes a 14,2%, com mudança da tendência no dia 01 de setembro de 2009.

Figura 20: Médias diárias de SO_2 para o sertão, agreste e leste alagoano do ano de 2000 a 2019.



Fonte: Autor, 2024.

A tabela 8, mostra os poluentes do estudo com as principais fontes de emissão, área de ação no sistema respiratório e efeito sobre a saúde humana, onde, as principais fontes de emissão do $PM_{2.5}$ são queima de combustíveis fósseis e de biomassa.

Tabela 8: Principais poluentes atmosféricos, suas fontes, áreas de ação no sistema respiratório e efeitos sobre a saúde humana.

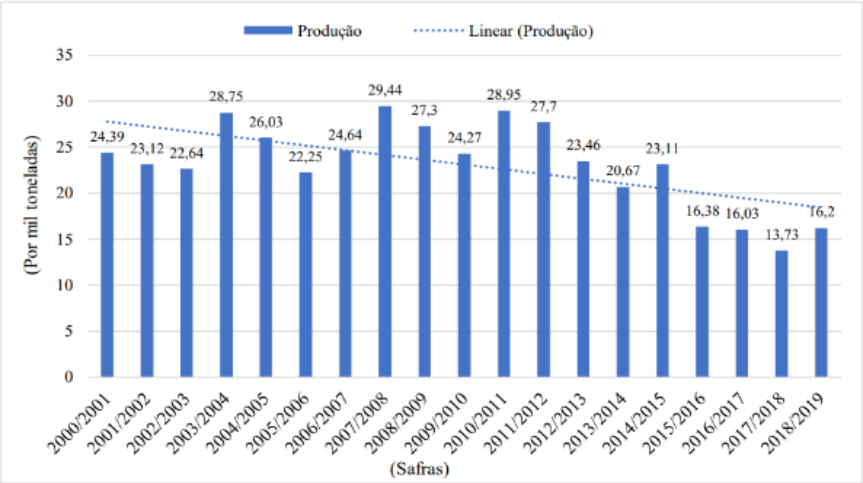
Fonte: Santos, 2019.

Poluentes	***Fontes***	***Penetração no sistema respiratório***	***Fisiopatologia***
$PM_{2,5}$	Queima de combustíveis fósseis e biomassa, usinas termoelétricas.	Alvéolos	Redução da atividade mucociliar e dos macrófagos, irritação nas vias respiratórias, estresse oxidativo, inflamação pulmonar e sistêmica, remodelamento brônquico, DPOC, potencial cancerígeno
O_3	Reações químicas na atmosfera envolvendo COVs e NOx na presença de luz solar.	Traquéia, brônquios, bronquíolos, alvéolos	Irritação da mucosa do trato respiratório, inflamação, obstrução das vias aéreas, lesão no tecido epitelial, aumento da reatividade brônquica
NO_x, NO_2	Emissões de veículos, indústrias, usinas térmicas.	Traqueia, brônquios, bronquíolos, alvéolos	Irritação da mucosa dos olhos, nariz, garganta e trato respiratório, aumento da reatividade brônquica, suscetibilidade a infecções e alérgenos
SO_2	Refinarias de petróleo, veículos a diesel, fornos, metalurgia, fabricação de papel. .	Vias aéreas superiores, traqueia, brônquios, bronquíolos	Irritação da mucosa dos olhos, nariz, garganta e trato respiratório, tosse, aumento da reatividade brônquica, broncoconstrição
CO	Queimadas florestais, combustão incompleta de combustíveis fósseis, transporte rodoviário	Alvéolos, corrente sanguínea	União com a hemoglobina, interferência no transporte de oxigênio, cefaleia, náuseas, tontura, efeitos deletérios sobre o feto, baixo peso ao nascer, morte fetal.

A frota veicular segue aumentando no estado de Alagoas, até dezembro de 2019, Alagoas somava 889,900 veículos e em 2022 já ultrapassa 1 milhão, com total de

1.034,187, segundo os dados do Ministério dos Transporte (2023), ocorrendo um aumento na emissão desse poluente. Já em relação a queima de biomassa, setor da cana-de-açúcar tem apresentado diminuição na produtividade entre os anos 2000 e 2019, como mostra a Figura 21**.**

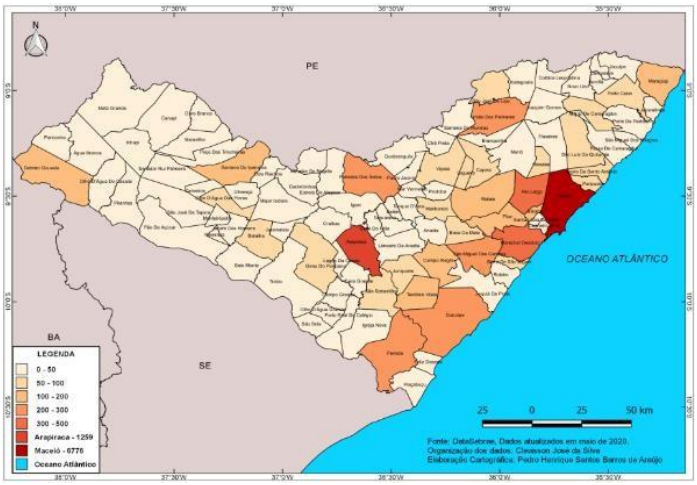
Figura 21: Alagoas: histórico produtivo da cana-de-açúcar (2000-2019).



Fonte: Clevisson José da Silva, 2020.

Quando se trata do processo de industrialização Figura 22 percebe-se que a maioria das indústrias estão localizadas na região do agreste e leste alagoano, como mostra o trabalho de Silva (2020). Onde de acordo com os dados do DataSebrae, o estado de Alagoas possuía em maio de 2020 um total de 13.852 empresas industriais ativas distribuídas pelos 102 municípios, e no município de Maceió possui 59% das empresas industriais (Silva, 2021).

Figura 22: Alagoas: concentração de empresas industriais por município (2020).



Fonte: Clevisson José da Silva, 2020**.**

A análise das fontes de emissão de $PM_{2.5}$ em Alagoas revela que o aumento da frota veicular, Ministério dos Transporte (2023) e a concentração de atividades industriais, como mostra a Figura 22 nas regiões do agreste e leste são os principais fatores que contribuem para a emissão de $PM_{2.5}$. Enquanto a redução na produtividade da cana-de-açúcar pode indicar uma diminuição na queima de biomassa, os outros fatores ainda mantêm as concentrações de $PM_{2.5}$ em níveis preocupantes de acordo com os níveis estipulados pela OMS.

Com relação ao aumento do O_3 no estado, mesmo em concentrações abaixo do limite fornecido, sugere que seus precursores como o NOx e COV liberados pela combustão de combustíveis fósseis e indústrias, podem estar favorecendo as reações fotoquímicas que produzem esse poluente na troposfera (Netto et al., 2017). Entretanto, essas emissões industriais não estão favorecendo a elevação dos níveis de SO_2 e CO, o que é um fator positivo.

7.4. Padrões relacionais entre variáveis meteorológicas e os poluentes atmosféricos

Na Tabela 9 é exibido a análise anual de correlação de Pearson com os poluentes CO, NO_2, O_3, $PM_{2.5}$ e SO_2 em relação as seguintes variáveis meteorológicas: i) temperatura do ar, ii) precipitação e iii) velocidade do vento no período de estudo.

Baseado na classificação para o coeficiente de Pearson de Dancey e Reidy (2006), o r = 0,10 até 0,30 (fraco); r = 0,40 até 0,6 (moderado) e r = 0,70 até 1 (forte), onde resultados de r negativos indicam associação negativa ou relação inversamente proporcional, enquanto que r positivo, indicam associação positiva, com relação diretamente proporcional (Figueiredo Filho et al., 2009).

Tabela 9: Correlação de Pearson para médias anuais das variáveis meteorológicas temperatura, precipitação e velocidade do vento, para a mesorregiões Sertão, nos anos de 2000 a 2019.

Correlações

		Média de Sertão CO	Média de Sertão NO2	Média de Sertão O3	Média de Sertão PM 2.5	Média de Sertão SO2	Média de temperatura	Média de total de precipitation	Média de velocidade do vento
Média de Sertão CO	Correlação de Pearson	1	,601*	,399	-,308	,734**	-,114	,402	,133
	Sig. (2 extremidades)		,014	,091	,199	<,001	,643	,088	,588
	N	19	16	19	19	19	19	19	19
Média de Sertão NO2	Correlação de Pearson	,601*	1	,013	-,142	,717**	-,130	,412	,284
	Sig. (2 extremidades)	,014		,961	,599	,002	,631	,112	,286
	N	16	16	16	16	16	16	16	16
Média de Sertão O3	Correlação de Pearson	,399	,013	1	-,954**	,759**	,426	-,089	,087
	Sig. (2 extremidades)	,091	,961		<,001	<,001	,069	,718	,723
	N	19	16	19	19	19	19	19	19
Média de Sertão PM 2.5	Correlação de Pearson	-,308	-,142	-,954**	1	-,721**	-,540*	,123	-,119
	Sig. (2 extremidades)	,199	,599	<,001		<,001	,017	,615	,627
	N	19	16	19	20	19	19	19	19
Média de Sertão SO2	Correlação de Pearson	,734**	,717**	,759**	-,721**	1	,207	,186	,139
	Sig. (2 extremidades)	<,001	,002	<,001	<,001		,395	,445	,570
	N	19	16	19	19	19	19	19	19
Média de temperatura	Correlação de Pearson	-,114	-,130	,426	-,540*	,207	1	-,647**	,230
	Sig. (2 extremidades)	,643	,631	,069	,017	,395		,003	,343
	N	19	16	19	19	19	19	19	19
Média de total de precipitation	Correlação de Pearson	,402	,412	-,089	,123	,186	-,647**	1	,254
	Sig. (2 extremidades)	,088	,112	,718	,615	,445	,003		,294
	N	19	16	19	19	19	19	19	19
Média de velocidade do vento	Correlação de Pearson	,133	,284	,087	-,119	,139	,230	,254	1
	Sig. (2 extremidades)	,588	,286	,723	,627	,570	,343	,294	
	N	19	16	19	19	19	19	19	19

*. A correlação é significativa no nível 0,05 (2 extremidades).
**. A correlação é significativa no nível 0,01 (2 extremidades).

Fonte: Autor, 2024.

Na Tabelas 10 e 11 mostram as análises de correlação de Pearson para o Agreste e Leste. Os resultados mostram similaridade do NO_2 para o Sertão, Agreste e Leste, com uma correlação positiva moderada e fraca com a precipitação de (r = 0,41), (r = 0,34) e (r = 0,30) respectivamente. É sabido que fatores meteorológicos e químicos podem contribuir para manter a concentração NO_2 durante a precipitação. Segundo Li et al. (2018), mostrou que alta umidade relativa (UR) pode favorecer a formação de aerossóis mais estáveis, pois aumenta as taxas de oxidação de compostos orgânicos voláteis (COVs), que por sua vez poderá fazer com que o NO_2 permaneça por mais tempo na atmosfera, por outro lado, também pode favorecer a reação desses compostos com o NO_2 e gerando através da oxidação heterogênea nitratos secundários que podem se tornar poluentes particulados secundários.

Tabela 10: Correlação de Pearson para as médias anuais das variáveis meteorológicas temperatura, precipitação e velocidade do vento, para a mesorregiões Agreste, nos anos de 2000 a 2019.

Correlações

		Média de agreste CO	Média de agreste NO2	Média de agreste O3	Média de agreste PM 2.5	Média de agreste SO2	Média de temperatura	Média de total de precipitation	Média de velocidade do vento
Média de agreste CO	Correlação de Pearson	1	,324	,606**	-,510*	,764**	,090	,140	,141
	Sig. (2 extremidades)		,221	,006	,026	<,001	,713	,566	,564
	N	19	16	19	19	19	19	19	19
Média de agreste NO2	Correlação de Pearson	,324	1	-,134	,007	,546*	,008	,342	,284
	Sig. (2 extremidades)	,221		,620	,980	,029	,977	,195	,287
	N	16	16	16	16	16	16	16	16
Média de agreste O3	Correlação de Pearson	,606**	-,134	1	-,946**	,855**	,434	-,137	,098
	Sig. (2 extremidades)	,006	,620		<,001	<,001	,064	,576	,691
	N	19	16	19	19	19	19	19	19
Média de agreste PM 2.5	Correlação de Pearson	-,510*	,007	-,946**	1	-,824**	-,543*	,092	-,119
	Sig. (2 extremidades)	,026	,980	<,001		<,001	,013	,699	,618
	N	19	16	19	20	19	20	20	20
Média de agreste SO2	Correlação de Pearson	,764**	,546*	,855**	-,824**	1	,383	-,023	,106
	Sig. (2 extremidades)	<,001	,029	<,001	<,001		,106	,925	,667
	N	19	16	19	19	19	19	19	19
Média de temperatura	Correlação de Pearson	,090	,008	,434	-,543*	,383	1	-,582**	,296
	Sig. (2 extremidades)	,713	,977	,064	,013	,106		,007	,205
	N	19	16	19	20	19	20	20	20
Média de total de precipitation	Correlação de Pearson	,140	,342	-,137	,092	-,023	-,582**	1	,179
	Sig. (2 extremidades)	,566	,195	,576	,699	,925	,007		,449
	N	19	16	19	20	19	20	20	20
Média de velocidade do vento	Correlação de Pearson	,141	,284	,098	-,119	,106	,296	,179	1
	Sig. (2 extremidades)	,564	,287	,691	,618	,667	,205	,449	
	N	19	16	19	20	19	20	20	20

**. A correlação é significativa no nível 0,01 (2 extremidades).

*. A correlação é significativa no nível 0,05 (2 extremidades).

Fonte: Autor, 2024.

Tabela 11: Correlação de Pearson para as médias anuais das variáveis meteorológicas temperatura, precipitação e velocidade do vento, para a mesorregiões Leste, nos anos de 2000 a 2019.

Correlações

		Média de leste CO	Média de leste NO2	Média de leste O3	Média de leste PM 2.5	Média de leste SO2	Média de temperatura	Média de total de precipitation	Média de velocidade do vento
Média de leste CO	Correlação de Pearson	1	,183	,738**	-,676**	,845**	,204	-,015	,137
	Sig. (2 extremidades)		,497	<,001	,001	<,001	,403	,950	,577
	N	19	16	19	19	19	19	19	19
Média de leste NO2	Correlação de Pearson	,183	1	-,276	-,158	,450	,320	,304	,444
	Sig. (2 extremidades)	,497		,302	,558	,080	,227	,252	,085
	N	16	16	16	16	16	16	16	16
Média de leste O3	Correlação de Pearson	,738**	-,276	1	-,945**	,881**	,374	-,193	,094
	Sig. (2 extremidades)	<,001	,302		<,001	<,001	,115	,429	,701
	N	19	16	19	19	19	19	19	19
Média de leste PM 2.5	Correlação de Pearson	-,676**	-,158	-,945**	1	-,862**	-,539*	,218	-,131
	Sig. (2 extremidades)	,001	,558	<,001		<,001	,014	,356	,582
	N	19	16	19	20	19	20	20	20
Média de leste SO2	Correlação de Pearson	,845**	,450	,881**	-,862**	1	,406	-,110	,135
	Sig. (2 extremidades)	<,001	,080	<,001	<,001		,085	,653	,581
	N	19	16	19	19	19	19	19	19
Média de temperatura	Correlação de Pearson	,204	,320	,374	-,539*	,406	1	-,402	,302
	Sig. (2 extremidades)	,403	,227	,115	,014	,085		,079	,196
	N	19	16	19	20	19	20	20	20
Média de total de precipitation	Correlação de Pearson	-,015	,304	-,193	,218	-,110	-,402	1	,148
	Sig. (2 extremidades)	,950	,252	,429	,356	,653	,079		,534
	N	19	16	19	20	19	20	20	20
Média de velocidade do vento	Correlação de Pearson	,137	,444	,094	-,131	,135	,302	,148	1
	Sig. (2 extremidades)	,577	,085	,701	,582	,581	,196	,534	
	N	19	16	19	20	19	20	20	20

**. A correlação é significativa no nível 0,01 (2 extremidades).

*. A correlação é significativa no nível 0,05 (2 extremidades).

Fonte: Autor, 2024.

O O_3 mostrou correlação positiva (r = 0,43), (r = 0,43) e (r = 0,37) moderada e fraca com a temperatura do ar para o Sertão, Agreste e Leste, onde a correlação positiva já é esperada, pois é um poluente secundário, sua formação depende de reações

fotoquímicas, que incluem os NOx e os COVs, as altas temperaturas favorecem essa reação, juntamente com outras condições propícias, como alta radição solar e baixa nebulosidade (Brasseur et al., 1999;, Sharkey et al., 1993, Chiquetto et al., 2019, CETESB, 2020).

O $PM_{2.5}$ mostrou uma relação inversa a temperatura, com correlação negativa no Sertão, Agreste e Leste, com (r = -0,56), (r = -0,59) e (r = -0,54), categorizadas como moderadas. O resultado obtido corrobora com obtido na literatura científica, onde há uma relação inversa da temperatura e a concentração de partículas como o $PM_{2.5}$ (Pohjola et al., 2002; Unal et al., 2011; Adam, 2013; Zalakeviciute et al., 2018; Cichowicz et al., 2020, Tian et al., 2021. O estudo realizado por Villafáña (2022) no estado de Guanajuato, no México, encontrou resultados similares ao do estudo, para o $PM_{2.5}$, com um valor de r = -0,59 para a temperatura, seguido de r = 0,16 para precipitação e r = 0,18 para velocidade do vento, onde concluiu-se que a variação da concentração do $PM_{2.5}$ não depende somente de fatores meteorológicos, mas também de outros fatores, por exemplo, fluxo veicular, atividade agrícola, industrial, comercial de acordo com cada cidade e dos incêndios florestais ou de pastagem (Zamorategui et al., 2024).

Para o SO_2 foi obtido uma correlação fraca e moderada com a temperatura (r = 0,21) para o Sertão, (r = 0,38) no Agreste e (r = 0,41) para o Leste. A maior correlação ocorreu no Leste alagoano, onde as temperaturas elevadas, favorecem a formação de SO_2, que oriundos de fontes industriais ou automotiva. A mesorregião Leste é industrializada, com maior quantidade de automóveis e com maior adensamento populacional, estão interligados (Santos et al., 2021). A precipitação desempenha um papel significativo nas concentrações do SO_2 na atmosfera, reduz a sua concentração, segundo Landim (2018) na cidade Gravataí-RS, onde também foram encontrados correlação fraca e negativa com a precipitação, ou seja, a precipitação reduz a concentração por remoção úmida (Landim et al., 2018).

É importante ressaltar que NEB é uma região com vulnerabilidade aos impactos das variações climáticas, devido às suas características específicas e às condições socioeconômicas (Marengo, 2009). A região enfrenta grandes desafios relacionados à irregularidade das chuvas, incluindo secas prolongadas e severas, bem como episódios de chuvas extremas (Bezerra et al., 2022). A variabilidade na precipitação no NEB tem sido associada às anomalias de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) no Pacífico

equatorial. Durante a fase positiva (El Niño), há uma tendência de redução das chuvas no Nordeste, enquanto na fase negativa (La Niña) há uma maior probabilidade de precipitações, às vezes superiores à média histórica (Andreoli e Kayano, 2007).

Destaque para interações entre os poluentes e entre as variáveis meteorológicas, conforme as Tabelas 3, 4 e 5 de médias anuais. Por exemplo, no Sertão correlação de r = 0,60 entre a média de CO e a média de NO_2, com significância inferior a 0,01. Este resultado indica uma correlação positiva moderada e significativa entre essas duas variáveis, sugerindo que, nas regiões onde a concentração de CO é maior, também tende a haver uma concentração maior de NO_2. No Agreste, obteve-se correlação positiva e fortes do CO com o SO_2 (r = 0,76), NO_2 (r = 0,76) e O_3 (r = 0,61), e no Leste, o CO continuou com uma correlação positiva forte com o SO_2 (r = 0,74) e O_3 (r = 0,85). Este fato pode ser explicado pela origem desses poluentes, geralmente associados à queima de combustíveis fósseis e assim gerar outros poluentes secundários. Um estudo recente analisou dados de satélites para entender a correlação entre o CO e o NO_2. Os pesquisadores usaram observações feitas por satélites como o TROPOMI, que monitora a troposfera, e descobriram que as concentrações de CO e NO_2 estão frequentemente aumentadas nas mesmas regiões, especialmente em áreas urbanas densamente povoadas. Esse aumento simultâneo ocorreu porque ambos os poluentes são subprodutos da combustão de combustíveis fósseis, como em motores de veículos e processos industriais (Macdonald et al., 2023).

O $PM_{2.5}$ mostrou correlação negativa de moderada a forte com os poluentes atmosféricos para as mesorregiões estudadas, com (r = -0,60) e (-r = 0,95) para o O_3, no Sertão e Agreste, e de (r = -0,95) com o O_3, (-0,862) com o SO2 e (r = -0,68) com o CO para o Leste. Em 2005, Alves (2022) mostrou a origem e formação de aerossóis na atmosfera, influenciada por outros poluentes oriundas de processos antrópicos ou naturais, o que pode explicar as elevadas concentrações de $PM_{2.5}$ em relação aos outros poluentes.

A análise mostrou uma correlação de r = -0,65 entre a média de temperatura e a média de precipitação, com significância inferior a 0,01 para o Sertão, r = -0,58, para o Agreste e r = -0,40 para o Leste. Esta correlação negativa moderada e significativa indicou que, nas regiões onde a temperatura é elevada, a precipitação tende a ser menor. Esse padrão é comum em climas semiáridos, onde o aumento da temperatura pode estar

associado a condições mais secas, que é o caso do Sertão alagoano (Castro, 2024). Um aumento das temperaturas e a redução das chuvas, podem afetar a qualidade do ar, pois temperaturas mais altas aumenta a poluição do ar em áreas urbanas e semiáridas (Monte, 2016). À medida que a temperatura aumenta, ocorrem mudanças na circulação atmosférica e padrões climáticos, tais como, inversões térmicas, reações químicas, evaporação e os padrões de precipitação e isso afeta a dispersão e concentração dos poluentes (Jacob et al., 2009, Feng et al., 2020). As correlações entre a média de velocidade do vento e outras variáveis ambientais foram, em sua maioria, fracas e não significativas. Isto sugere que, dentro deste conjunto de dados, a velocidade do vento tem pouca ou nenhuma relação linear com as demais variáveis analisadas, tais como, as concentrações de poluentes ou condições meteorológicas.

Quando se realiza a análise de correlação mensal de Pearson, conforme representado nas Tabelas 12, 13 e 14, para as mesorregiões do Sertão, Agreste e Leste respectivamente, mostrou que o grau de correlação se intensificou. Isso mostrou que as influências sazonais das variáveis meteorológicas têm um impacto significativo na concentração dos poluentes em comparação com as influências anuais.

Tabela 12: Correlação de Pearson para as médias mensais das variáveis meteorológicas temperatura, precipitação e velocidade do vento, para a mesorregiões Sertão, nos anos de 2000 a 2019.

Correlações

		Média de Sertão CO	Soma de Sertão NO2	Média de Sertão O3	Média de Sertão PM 2.5	Média de Sertão SO2	Média de temperatura	Média de precipitatção	Média de velocidade do vento
Média de Sertão CO	Correlação de Pearson	1	-,066	,692*	,143	,319	,340	-,739**	-,304
	Sig. (2 extremidades)		,837	,013	,657	,312	,280	,006	,337
	N	12	12	12	12	12	12	12	12
Soma de Sertão NO2	Correlação de Pearson	-,066	1	-,475	,206	-,225	,269	,352	-,084
	Sig. (2 extremidades)	,837		,119	,521	,482	,397	,262	,795
	N	12	12	12	12	12	12	12	12
Média de Sertão O3	Correlação de Pearson	,692*	-,475	1	-,353	,676*	-,341	-,848**	,094
	Sig. (2 extremidades)	,013	,119		,260	,016	,278	<,001	,772
	N	12	12	12	12	12	12	12	12
Média de Sertão PM 2.5	Correlação de Pearson	,143	,206	-,353	1	-,351	,448	,339	-,322
	Sig. (2 extremidades)	,657	,521	,260		,264	,144	,281	,308
	N	12	12	12	12	12	12	12	12
Média de Sertão SO2	Correlação de Pearson	,319	-,225	,676*	-,351	1	-,406	-,530	,558
	Sig. (2 extremidades)	,312	,482	,016	,264		,190	,076	,060
	N	12	12	12	12	12	12	12	12
Média de temperatura	Correlação de Pearson	,340	,269	-,341	,448	-,406	1	-,090	-,506
	Sig. (2 extremidades)	,280	,397	,278	,144	,190		,780	,093
	N	12	12	12	12	12	12	12	12
Média de precipitatção	Correlação de Pearson	-,739**	,352	-,848**	,339	-,530	-,090	1	,118
	Sig. (2 extremidades)	,006	,262	<,001	,281	,076	,780		,714
	N	12	12	12	12	12	12	12	12
Média de velocidade do vento	Correlação de Pearson	-,304	-,084	,094	-,322	,558	-,506	,118	1
	Sig. (2 extremidades)	,337	,795	,772	,308	,060	,093	,714	
	N	12	12	12	12	12	12	12	12

*. A correlação é significativa no nível 0,05 (2 extremidades).

**. A correlação é significativa no nível 0,01 (2 extremidades).

Fonte: Autor, 2024.

Para o Sertão, o CO obteve r = 0,70, com correlação forte e positiva com o O_3, isso indicou que à medida que a concentração de O_3 aumenta o CO também aumenta e ambos demonstraram uma correlação forte e negativa com a precipitação r = -0,73 a nível de significância de 1%, ou seja, a precipitação diminui a concentração desses poluentes. O O_3 é um poluente secundário, formado por reação fotoquímica e seus precursores, porém o comportamento da variação a concentração ocorre semelhante ao poluente primário como CO, por fontes antropogênicas e reações incompletas oriundas de combustíveis fósseis (Silva Júnior et al.,2020). E como já mencionado, nos estudos de Monte (2016) e Nascimento (2016), a precipitação diminui a concentração de poluentes atmosféricos, tais como, o CO.

Na Tabela 13 é exibido CO com o O_3 com r = 0,66 e precipitação com r = -0,74, sendo observados para o Agreste Alagoano. Porém, outros poluentes como o NO_2 se destacaram, com r = -0,692 com o O_3, indicando uma relação inversa na concentração dos poluentes. O estudo realizado em Palermo (Itália), por Vulttagio (2020) demonstrou que as concentrações de O_3 estão associadas a dois fatores principais: i) a redução do NO_2 e o ii) aumento da radiação solar. Isso ocorre porque a variabilidade do O_3 está vinculada à processo fotoquímico, uma vez que as taxas de formação e acumulação de O_3 são funções não lineares da mistura de COVs e NOx na atmosfera. Em determinadas condições, a diminuição de NOx pode resultar em elevados níveis de O_3 no ambiente. Os veículos motorizados são a principal fonte de emissões de NOx em áreas urbanas; o aumento na produção de O_3 foi relacionado à redução do tráfego de veículos (Vulttagio et al., 2020).

Tabela 13: Correlação de Pearson para as médias mensais das variáveis meteorológicas temperatura, precipitação e velocidade do vento, para a mesorregiões Agreste, nos anos de 2000 a 2019.

Correlações

		Média de Agreste CO	Soma de Agreste NO2	Média de Agreste O3	Média de Agreste PM 2.5	Média de Agreste SO2	Média de temperatura	Média de precipitatção	Média de velocidade do vento
Média de Agreste CO	Correlação de Pearson	1	-,332	,662*	,140	,534	,296	-,735**	-,279
	Sig. (2 extremidades)		,292	,019	,665	,074	,349	,006	,380
	N	12	12	12	12	12	12	12	12
Soma de Agreste NO2	Correlação de Pearson	-,332	1	-,611*	,295	-,331	,003	,692*	-,047
	Sig. (2 extremidades)	,292		,035	,353	,293	,993	,013	,884
	N	12	12	12	12	12	12	12	12
Média de Agreste O3	Correlação de Pearson	,662*	-,611*	1	-,328	,276	-,410	-,819**	,137
	Sig. (2 extremidades)	,019	,035		,297	,385	,186	,001	,672
	N	12	12	12	12	12	12	12	12
Média de Agreste PM 2.5	Correlação de Pearson	,140	,295	-,328	1	-,084	,379	,332	-,288
	Sig. (2 extremidades)	,665	,353	,297		,794	,224	,292	,364
	N	12	12	12	12	12	12	12	12
Média de Agreste SO2	Correlação de Pearson	,534	-,331	,276	-,084	1	,444	-,542	,101
	Sig. (2 extremidades)	,074	,293	,385	,794		,148	,069	,754
	N	12	12	12	12	12	12	12	12
Média de temperatura	Correlação de Pearson	,296	,003	-,410	,379	,444	1	-,090	-,506
	Sig. (2 extremidades)	,349	,993	,186	,224	,148		,780	,093
	N	12	12	12	12	12	12	12	12
Média de precipitatção	Correlação de Pearson	-,735**	,692*	-,819**	,332	-,542	-,090	1	,118
	Sig. (2 extremidades)	,006	,013	,001	,292	,069	,780		,714
	N	12	12	12	12	12	12	12	12
Média de velocidade do vento	Correlação de Pearson	-,279	-,047	,137	-,288	,101	-,506	,118	1
	Sig. (2 extremidades)	,380	,884	,672	,364	,754	,093	,714	
	N	12	12	12	12	12	12	12	12

*. A correlação é significativa no nível 0,05 (2 extremidades).

**. A correlação é significativa no nível 0,01 (2 extremidades).

Fonte: Autor, 2024.

A relação do O_3 com a precipitação foi inversamente proporcional, com r = -0,82 para o nível de significância de 1%, uma correlação negativa e forte. No Leste Alagoano foi observado similaridade para o CO e O_3, com a diferença que, nessa mesorregião a temperatura estava ligada inversamente a concentração de O_3, com valore de r = -0,82, conforme a Tabela 8. Vale ressaltar que temperaturas elevadas aceleram as reações químicas que formam o ozônio troposférico, pois o O_3 é uma molécula instável e pode ser dissociada por altas temperaturas, especialmente próximo da superfície, onde o aquecimento é elevado. A temperatura também pode influenciar a distribuição vertical do O_3, onde em dias quentes, pode haver maior convecção (Susan Solomon, 1999).

Tabela 14: Correlação de Pearson para as médias mensais das variáveis meteorológicas temperatura, precipitação e velocidade do vento, para a mesorregiões Leste, nos anos de 2000 a 2019.

Correlações

		Média de Agreste CO	Soma de Agreste NO2	Média de Agreste O3	Média de Agreste PM 2.5	Média de Agreste SO2	Média de temperatura	Média de precipitatção	Média de velocidade do vento
Média de Agreste CO	Correlação de Pearson	1	-,332	,662*	,140	,534	,296	-,735**	-,279
	Sig. (2 extremidades)		,292	,019	,665	,074	,349	,006	,380
	N	12	12	12	12	12	12	12	12
Soma de Agreste NO2	Correlação de Pearson	-,332	1	-,611*	,295	-,331	,003	,692*	-,047
	Sig. (2 extremidades)	,292		,035	,353	,293	,993	,013	,884
	N	12	12	12	12	12	12	12	12
Média de Agreste O3	Correlação de Pearson	,662*	-,611*	1	-,328	,276	-,410	-,819**	,137
	Sig. (2 extremidades)	,019	,035		,297	,385	,186	,001	,672
	N	12	12	12	12	12	12	12	12
Média de Agreste PM 2.5	Correlação de Pearson	,140	,295	-,328	1	-,084	,379	,332	-,288
	Sig. (2 extremidades)	,665	,353	,297		,794	,224	,292	,364
	N	12	12	12	12	12	12	12	12
Média de Agreste SO2	Correlação de Pearson	,534	-,331	,276	-,084	1	,444	-,542	,101
	Sig. (2 extremidades)	,074	,293	,385	,794		,148	,069	,754
	N	12	12	12	12	12	12	12	12
Média de temperatura	Correlação de Pearson	,296	,003	-,410	,379	,444	1	-,090	-,506
	Sig. (2 extremidades)	,349	,993	,186	,224	,148		,780	,093
	N	12	12	12	12	12	12	12	12
Média de precipitatção	Correlação de Pearson	-,735**	,692*	-,819**	,332	-,542	-,090	1	,118
	Sig. (2 extremidades)	,006	,013	,001	,292	,069	,780		,714
	N	12	12	12	12	12	12	12	12
Média de velocidade do vento	Correlação de Pearson	-,279	-,047	,137	-,288	,101	-,506	,118	1
	Sig. (2 extremidades)	,380	,884	,672	,364	,754	,093	,714	
	N	12	12	12	12	12	12	12	12

*. A correlação é significativa no nível 0,05 (2 extremidades).

**. A correlação é significativa no nível 0,01 (2 extremidades).

Fonte: Autor, 2024.

Por sua localização, o estado de Alagoas é influenciado por sistemas meteorológicos em multiescala, por exemplo, Zona de Convergência Intertropical, (ZCIT), Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN), Sistemas Frontais (SF), os Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOLs) e Perturbações Ondulatórias no campo dos ventos Alísios (POAS) e destaca também os Complexos Convectivos e Brisas Marítimas e Terrestres (Lyra et al., 2014), principalmente a mesorregião Leste (Marques, 2022). A irregularidade pluviométrica, fotoperíodo com pouca variação e baixa amplitude de radiação solar, refletem no déficit hídrico, que por sua vez são influenciados pelo modo de variabilidade climático El Nino-Oscilação Sul (ENOS), classificando o estado e Alagoas com três estações: chuvosa, seca e de transição (Barros, 2012; Da Silva Lima, 2018; Souza et. al 2021; Marques, 2022).

7.5. Rosa de poluição

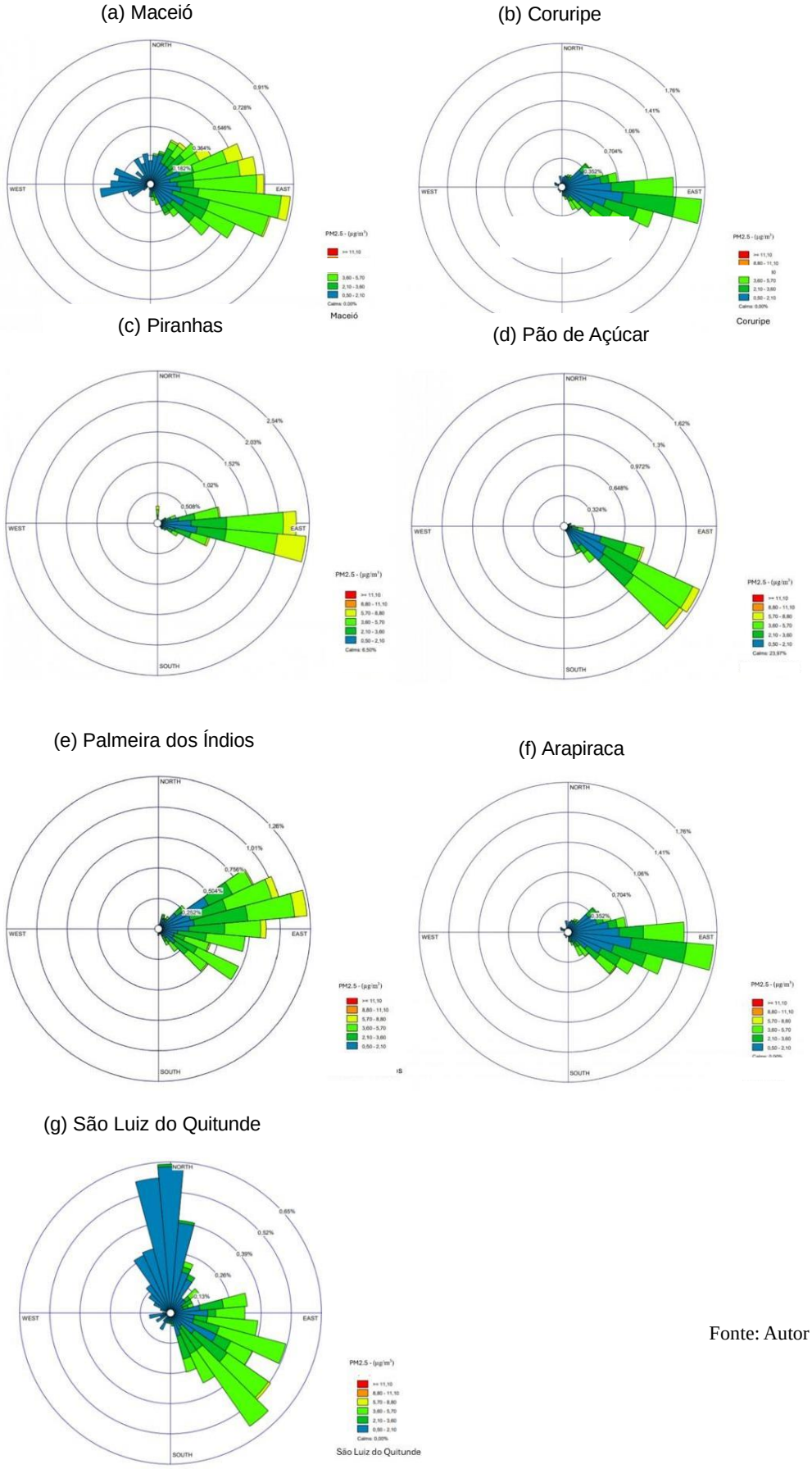
A Figura 23 mostra a rosa de poluição de $PM_{2.5}$ em Alagoas obtidas das sete estações distribuídas pelo estado (a) Maceió, (b) Coruripe, (c) Piranha, (d) Pão de Açúcar, (e) Palmeira dos índios, (f) Arapiraca e (g) São Luiz do Quitunde. Em (a) Maceió as concentrações predominantes foram do Leste (E), Leste-Sudeste (ESE) e Leste-Nordeste

(ENE), com variações entre 1,50 µg/m³ a 3,00 µg/m³ e 3,00 µg/m³ a 5,00 µg/m³. Em (a) Maceió foi possível identificar recirculação do poluente e sendo associado aos efeitos da circulação das brisas (mesoescala) e padrões de escoamento local, principalmente regime de calmaria zero (LIMA, 2019).

Para (b) Coruripe, as concentrações predominantes foram de E, com menor intensidade em comparação com (a) Maceió, categorizadas nas faixas de 0,00 - 1,50 µg/m³ e 1,50 µg/m³ e 1,50 µg/m³ a 3,00 µg/m³ (verde). Já em Arapiraca, apenas predominância da direção leste, destaque que a estação se encontra no Agreste, portanto no interior de Alagoas, onde as concentrações de $PM_{2.5}$ categorizadas nas faixas 0,00 µg/m³ a 1,50 µg/m³ e 1,50 µg/m³ a 3,00 µg/m³. Em Palmeira dos Índios as concentrações predominantes foram de leste (E) e nordeste (NE), similar a (a) Maceió e (b) Coruripe, que pertencem a mesorregião Leste Alagoano e tem influência do regime de alísios e circulações de brisas (Lyra et al., 2014). As concentrações foram distribuídas principalmente entre 1,50 µg/m³ a 3,00 µg/m³ e 3,00 µg/m³ a 5,00 µg/m³.

Em (d) Pão de Açúcar a predominância das concentrações é de sudeste (SE), com variações entre 1,50 µg/m³ a 3,00 µg/m³ e 0,00 µg/m³ a 1,50 µg/m³, visto que a estação se encontra no cânion do Rio São Francisco e o regime de ventos do ambiente costeiro percorre todo trecho (Ramos et al., 2013). A estação (c) Piranhas também apresentou concentração predominante de leste, mas com concentrações maiores, na faixa de 1,50 µg/m³ a 3,00 µg/m³ e de 3,00 µg/m³ a 5,00 µg/m³, valores similares a (a) Maceió e (e) Palmeira dos Índios. Em (g) São Luiz do Quitunde, as concentrações predominantes foram de Norte (N) (menores valores) e leste (E) (maiores valores), com concentração entre 3,6 µg/m³ a 5.7 µg/m³. A predominância de ventos oriundos do Norte (N) e do Leste (E) resulta da combinação de diversos sistemas atmosféricos. Entre eles, destacam-se os ventos alísios, que sopram do Oceano Atlântico em direção à costa leste do Nordeste brasileiro, a circulação da brisa marítima, intensificada pelo contraste térmico entre o oceano e o continente, e os distúrbios ondulatórios de leste, responsáveis por transportar umidade do Atlântico para o interior da região (FERREIRA et al., 2005).

Figura 23: Rosa de poluição de $PM_{2.5}$ das estações meteorológicas automáticas de Maceió, Coruripe, Palmeira dos Índios, Pão e açúcar, Piranhas, Arapiraca e São Luiz do Quitunde para o estado de Alagoas.



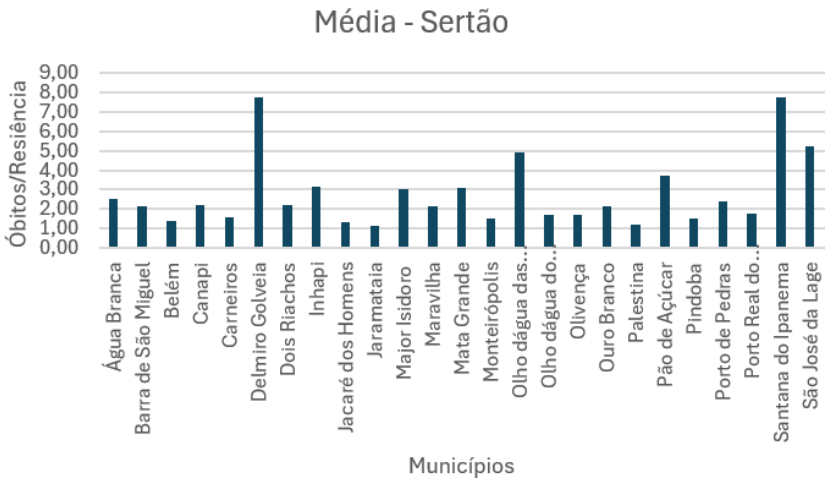
Fonte: Autor 2024.

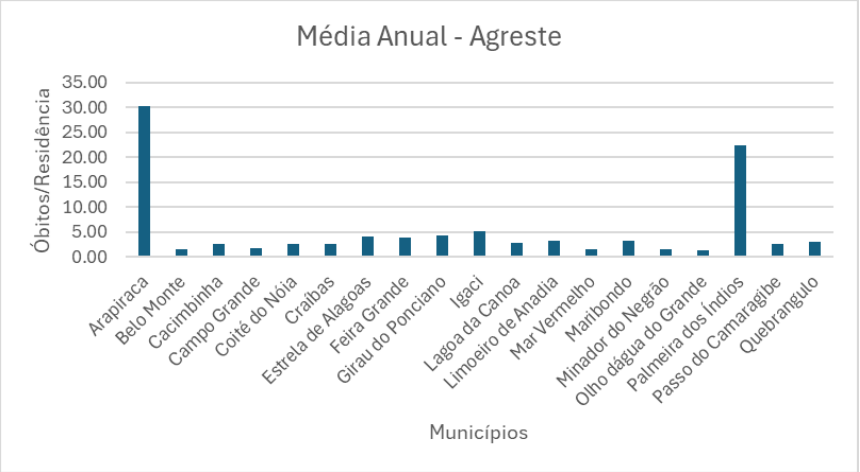
7.6. Dados da Saúde – DATASUS

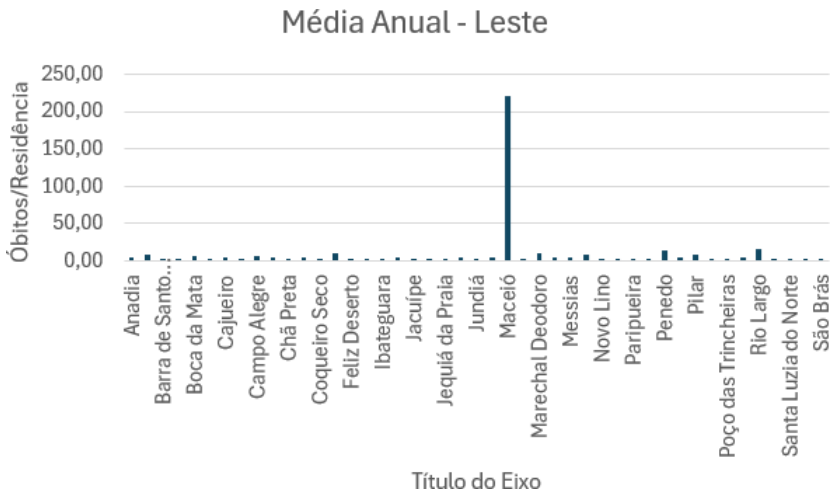
Em Alagoas, os dados de mortalidade do DATASUS revelam que, entre 2000 e 2019, houve um aumento significativo nos óbitos por doenças relacionadas ao Grupo CID-10. A denominação CID-10 incluem doenças cardíacas pulmonares e da circulação pulmonar, outras doenças das vias aéreas superiores, doenças crônicas das vias aéreas inferiores e doenças pulmonares causadas por agentes externos. Esse aumento pode ser atribuído a diversos fatores, tais como, a exposição contínua a poluentes atmosféricos, mudanças nos hábitos de vida e envelhecimento da população.

Além disso, todos os municípios de Alagoas notificaram mortes por doenças respiratórias ou cardiovasculares, destacando a abrangência e a gravidade do problema no Estado. Esses dados são apresentados na Figura 24.

Figura 24: Municípios alagoanos e quantidade de óbitos por residência de acordo com o Grupo CID-10: Doenças cardíaca pulmonar e da circulação pulmonar, outras doenças das vias aéreas superiores, doenças crônicas das vias aéreas inferiores, doenças pulmonares devidas a agentes externos, no período: 2000-2019.



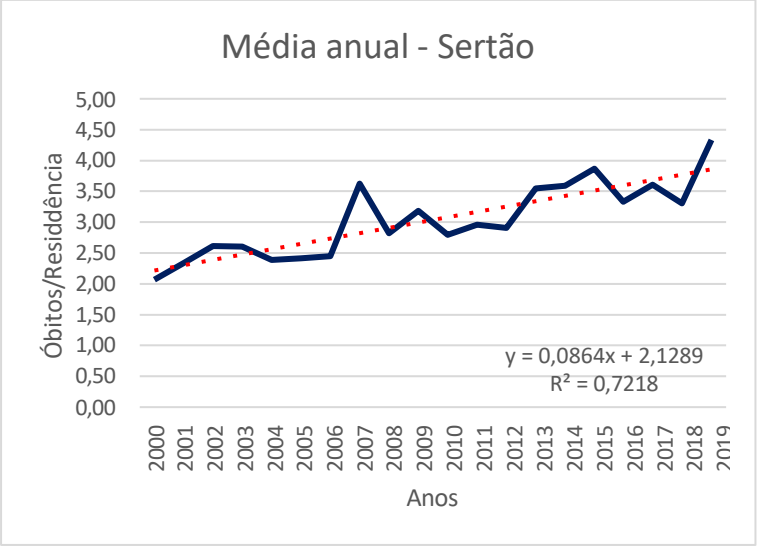


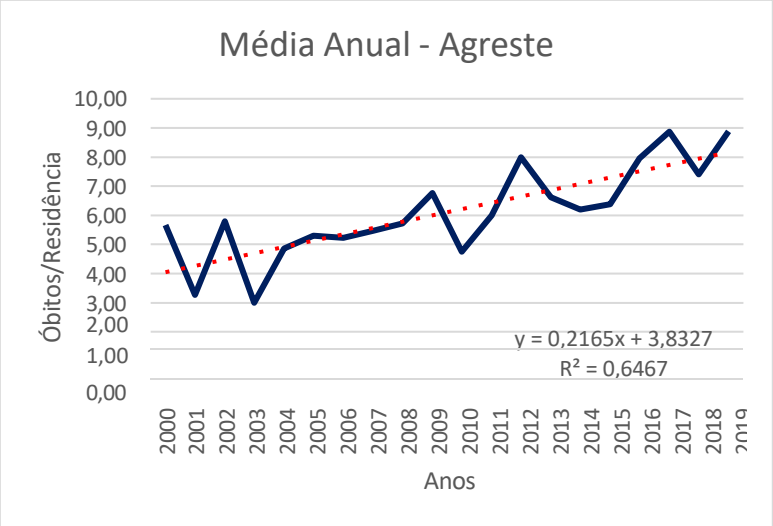


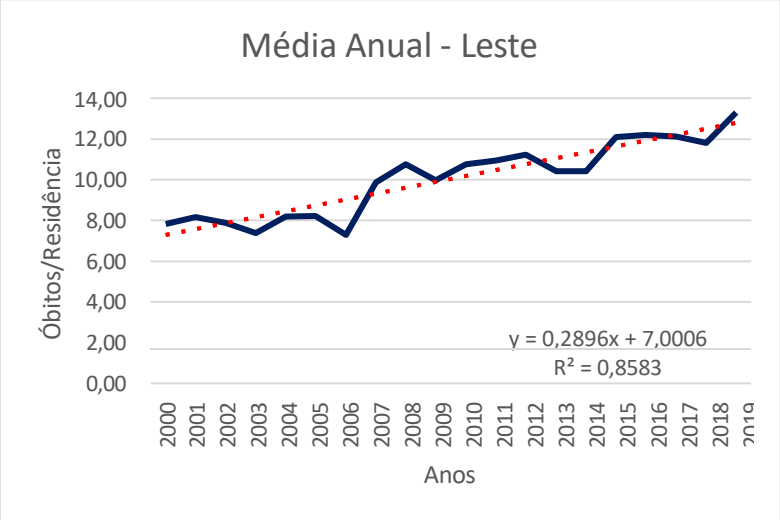
Fonte: Autor (2024).

Essas doenças podem ter sido agravadas pela exposição a poluentes atmosféricos, como o $PM_{2.5}$, que se manteve acima dos limites recomendados pela OMS durante os vinte anos de estudo. O O_3 também apresentou aumento em todos os estados, embora ainda esteja dentro das concentrações permitidas pelos órgãos responsáveis. Conforme citado anteriormente, Wang (2022) demonstrou que, mesmo em concentrações abaixo dos limites, o ozônio está associado a um aumento no risco de mortalidade devido a doenças como doença pulmonar obstrutiva crônica, hipertensão, doença cardíaca isquêmica e derrame. A Figura 25 mostra o número de óbitos confirmados, destacando que o Leste e o Agreste Alagoano apresentam os maiores números de óbitos.

Figura 25: Médias anuais de óbitos confirmados para o Sertão, Agreste e Leste Alagoano.







Fonte: Autor (2024).

Este estudo indica que há uma tendência de aumento nos óbitos por mesorregiões, que podem ter sido agravadas por exposição a poluição atmosférica para os anos avaliados. Maceió, como o município mais populoso, registra o maior número de óbitos (4.400), seguido por outras cidades maiores como Arapiraca (607) e Palmeira dos Índios (449), seguido de Rio Largo (313), São Miguel dos Campos (301), Penedo (275), União dos Palmares (229) e Coruripe (215) (SIM, 2020). Esses óbitos podem sugerir que áreas urbanas e densamente povoadas são mais suscetíveis aos efeitos adversos da poluição do ar devido a maiores níveis de emissões de veículos e atividades industriais (Maia, 2019).

Entretanto, municípios menores como Jundiá (24 óbitos), Feliz Deserto (20 óbitos), Pindoba (18 óbitos), Mar Vermelho (13 óbitos), e Palestina (11 óbitos) também registraram mortes relacionadas a doenças respiratórias e cardiovasculares. Monitorar a qualidade do ar e as tendências de saúde relacionadas é crucial para avaliar a eficácia das políticas implementadas e ajustar as estratégias conforme necessário. Estudos longitudinais podem ajudar a entender melhor a relação entre a poluição do ar e a saúde pública em Alagoas, como uma implementação monitoramento contínuo da qualidade do ar no estado.

8. CONCLUSÕES

O estudo inédito mostra que os poluentes atmosféricos no estado de Alagoas apresentam variabilidade espaço-temporal das concentrações em suas mesorregiões climáticas, especialmente $PM_{2.5}$ com taxas elevadas em ano de seca severa.

A qualidade do ar baseada nas médias diárias e anuais das concentrações dos poluentes em Alagoas revela que $PM_{2.5}$ se destaca por violar os limites recomendados nas diretrizes nacionais (CONAMA) e internacionais (OMS). Isso é preocupante, pois episódios de poluição são potencialmente prejudiciais à saúde humana.

Os testes de Mann-Kendall e Pettitt apontam tendências significativas e distintas nas concentrações dos poluentes atmosféricos em Alagoas. Há uma tendência decrescente significativa para $PM_{2.5}$, SO_2, NO_2 e CO no Sertão, isso indica melhoria na qualidade do ar, após 2002. Situação contrária, com um aumento nas concentrações de O_3, no Leste, com um crescimento de 176,9% entre 2000 e 2003, apesar de seus valores permanecerem dentro dos limites regulamentares. Este aumento pode estar associado à emissão de precursores, tais como, NOx e compostos orgânicos voláteis (COVs).

As fontes de emissão referente a frota veicular, a concentração industrial e queimadas no Agreste e Leste de Alagoas são fatores fundamentais para as emissões de $PM_{2.5}$ e os precursores de O_3. A correlação entre variáveis meteorológicas e os poluentes atmosféricos no Sertão, Agreste e Leste de Alagoas revela padrões importantes de interação. A precipitação mostra uma correlação moderada com a concentração de CO, especialmente no Sertão, sugerindo possíveis influências sazonais ou locais. Já a temperatura exibe uma correlação positiva com o O_3 nas três mesorregiões climáticas. Por outro lado, o $PM_{2.5}$ apresenta correlação negativa com a temperatura em todas as mesorregiões, onde temperaturas elevadas tendem a reduzir a sua concentração. O SO_2 exibe correlação positiva com a temperatura, principalmente no Leste, sendo atribuído à maior industrialização e densidade populacional. As correlações moderadas entre CO e NO_2 sugerem uma origem comum, como a queima de combustíveis fósseis.

A análise mensal das correlações mostra que as variáveis meteorológicas têm um impacto significativo na concentração de poluentes em comparação a escala anual, onde a sazonalidade desempenha um papel crucial. A precipitação é eficaz na redução das concentrações de CO e O_3, enquanto a temperatura interfere na concentração de poluentes, que depende da região e do poluente.

As rosas de poluição revelam a importância da direção e das concentrações e na dispersão de partículas finas ($PM_{2.5}$) em Alagoas. As concentrações predominantes foram de E, SE e NE, associadas a circulação da brisa e regime de alísios, exceto direção N oriunda de efeito local, que por sua vez desempenham um papel crucial na distribuição entre as mesorregiões. As concentrações de $PM_{2.5}$ variaram entre as estações, com Maceió e Piranhas maiores concentrações, ao contrário, de Coruripe e Pão de Açúcar, com as menores concentrações.

Em relação aos dados de mortalidade do DATASUS para Alagoas no período de estudo revela um preocupante aumento nos óbitos relacionados a doenças respiratórias e cardiovasculares, segundo categoria Grupo CID-10. Esse aumento é potencialmente agravado pela exposição contínua da população a poluentes atmosféricos, tais como, o $PM_{2.5}$ e o O_3. A qualidade do ar parece ter contribuído significativamente no aumento dessas doenças, particularmente em áreas urbanas e densamente povoadas, tais como Maceió, Arapiraca e Palmeira dos Índios.

Em geral, o estudo reforça de forma clara a importância de monitorar continuamente a qualidade do ar e de realizar estudos para compreender melhor a relação entre poluição e saúde pública em Alagoas. A implementação de políticas eficazes, como o controle de emissões e o fortalecimento da vigilância ambiental, é essencial para mitigar os impactos da poluição na saúde da população e garantir um ambiente mais saudável para as futuras gerações. Por fim, as mesorregiões climáticas de Alagoas necessitam de implantação de estações de monitoramento e qualidade do ar, pois as ferramentas de SIG e estatísticas apontam a variabilidade espaço-temporal das concentrações dos poluentes avaliados.

9. RECOMENDAÇÕES

Com base no estudo realizado, recomenda-se que futuros trabalhos enfatizem a necessidade de estabelecer uma rede robusta de monitoramento da qualidade do ar no estado de Alagoas, com foco especial no controle das partículas finas (PM2.5). Essas partículas, associadas a substâncias carcinogênicas, representam um risco significativo para a saúde.

Além disso, é essencial ampliar os estudos epidemiológicos para investigar a correlação entre a exposição prolongada a poluentes atmosféricos, especialmente $PM_{2.5}$ e O_3, e seus impactos em doenças respiratórias e cardiovasculares a longo prazo.

Para abordar essa questão, é crucial avaliar as fontes de emissão e implementar políticas de controle. Um inventário detalhado das principais fontes emissoras de poluentes atmosféricos em Alagoas deve incluir a frota veicular, atividades industriais e queimadas agrícolas. Recomenda-se adotar tecnologias limpas, reforçar a fiscalização e incentivar o uso de energias renováveis. Além disso, investir em programas de educação ambiental e sensibilização pública é fundamental. Isso pode incluir incentivar o uso do transporte público e reduzir práticas que contribuem para a poluição, como o uso excessivo de veículos particulares e queimadas.

Por fim, a colaboração interinstitucional e multidisciplinar entre pesquisadores, órgãos governamentais e organizações não governamentais é essencial para criar políticas eficazes. A troca de informações entre áreas como meteorologia, saúde pública e urbanismo permitirá desenvolver estratégias abrangentes e integradas para combater a poluição e proteger a saúde pública em Alagoas.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, M. C.; DE SOUZA FRAGA, M.; LYRA, G. B.; DE OLIVEIRA JUNIOR, J. F.; DE JESÚS VILLAR-HERNÁNDEZ, B.; DE SOUZA, A.; ZERI, M. Long-term trend analysis in annual, seasonal and monthly rainfall in East Northeast of Brazil and the influence of modes of climate variability. International Journal of Climatology, v. 43, n. 16, p. 7463-7480, 2023.

ALAGOAS EM DADOS E INFORMAÇÃO. Programa do censo 2022 em Alagoas: população, idade, sexo e densidade demográfica. Disponível em: https://dados.al.gov.br/. Acesso em: 15 nov. 2023.

ALAGOAS. Governo do Estado. Gabinete do Governador. Lei nº 7.653, de 24 de julho de 2014. Dispõe sobre as atividades pertinentes ao controle da poluição atmosférica, padrões e gestão da qualidade do ar, conforme especificações e adota outras disposições. Maceió, 2014.

ALVES, C. Aerossóis atmosféricos: perspectiva histórica, fontes, processos químicos de formação e composição orgânica. Química Nova, v. 28, n. 5, p. 895-905, 2005. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0100-40422005000500025. Acesso em: 19 ago. 2024.

ALVIM, D. S.; GATTI, L. V.; CORRÊA, S. M.; CHIQUETTO, J. B.; SANTOS, G. M.; ROSSATTI, C. S.; PRETTO, A.; ROZANTE, J. R.; FIGUEROA, S. N.; PENDHARKAR, J.; NOBRE, P. Determining VOCs Reactivity for Ozone Forming Potential in the Megacity of São Paulo. Aerosol and Air Quality Research, v. 18, p. 2460-2474, 2018.

ANDREOLI, R. V.; KAYANO, M. T. A influência das anomalias de TSM no Pacífico equatorial sobre a precipitação no Nordeste do Brasil. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 22, n. 3, p. 337-350, 2007.

BARROS, A. H. C.; ARAÚJO FILHO, J. C.; SILVA, A. B.; SANTIAGO, G. A. C. F. Climatologia do Estado de Alagoas. Recife: Embrapa Solos, 2012. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/103956/1/BPD-211-Climatologia-Alagoas.pdf. Acesso em: 5 set. 2024.

BEZERRA, K. F. S. Variações e mecanismos atmosféricos de fundo que desencadeiam eventos simultâneos de seca e ondas de calor durante o verão sobre o Nordeste do Brasil. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas, Instituto de Ciências Atmosféricas, Maceió, 2022.

BOLEIRA LOPO, A.; SPYRIDES, M. H. C.; LUCIO, P. S.; SIGRÓ, J. Radiação ultravioleta, ozônio total e aerossóis na cidade de Natal-RN. HOLOS, v. 6, p. 3-21, 2013.

BRAIT, C. H. Monitoramento Ambiental de Metais Utilizando Biomonitores e Sistema Passivo de Coleta de Poluentes. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) – Universidade Federal de Goiás, 2008.

BRANCO, S. M.; MURGEL, E. Poluição do Ar. São Paulo: Editora Moderna, 2004. BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução nº 491, de 19 de novembro de 2018. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar. Brasília, 2018.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 005, de 15 de junho de 1989. Dispõe sobre a criação do Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar – PRONAR. Diário Oficial da União, seção 1, Brasília, DF, p. 62, 19 jul. 1989. Disponível em: https://www.gov.br/ibama/pt-br. Acesso em: 3 dez. 2023.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar – PRONAR. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 1989. Disponível em: https://www.gov.br/mma/pt-br. Acesso em: 3 dez. 2023.

BRASSEUR, G. P.; ORLANDO, J. J.; TYNDAL, G. S. Atmospheric Chemistry and Global Change. Oxford: Oxford University Press, 1999.

BRITO, P. H. F.; ARAÚJO, R. S.; SILVA, G. M. M. Composição Química do Material Particulado Atmosférico: Uma Revisão de Literatura. HOLOS, v. 34, n. 3, 2018.

BROOK, R. D., et al. Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: An update to the scientific statement from the American Heart Association. Circulation, v. 121, n. 21, p. 2331-2378, 2010. DOI: <10.1161/CIR.0b013e3181dbece1>.

CALDERÓN, M. E. G. (2015). Impacto das condições de contorno químicas na apresentação do ozônio troposférico na região metropolitana de São Paulo com o modelo WRF-Chem (Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Departamento de Ciências Atmosféricas). São Paulo, Brasil, 2015.

CARDOSO, A. A. Química da atmosfera: a vida no planeta. 2009.

CARDOSO, A. A.; FRANCO, A.; Algumas Reações de Enxofre de Importância Ambiental. QUÍMICA NOVA NA ESCOLA, N° 15, MAIO 2002. Recebido em 3/8/01, aceito em 4/4/02.

CARVALHO, C. P.; ALAGOAS 2000-2018. BNB Conjuntura Econômica. Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste – ETENE. 2019. CASTELHANO, F. J., SIQUEIRA PINTO, J. E. S. Tendências e alterações climáticas no Estado de Sergipe, nordeste do Brasil. Revista do Departamento de Geografia, v. 42, p. e185565-e185565, 2022.

CASTRO, C. N.; Capacidade adaptativa às mudanças climáticas de agricultores familiares no semiárido brasileiro. Rio de Janeiro: Ipea, maio 2024. 50 p.: il. (Texto para Discussão, n. 2999). DOI: http://dx.doi.org/10.38116/td2999-port JEL: Q1, Q18. CETESB (2020). Relatório de Qualidade do Ar no Estado de São Paulo 2020. São Paulo: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Disponível em: CETESB.

CETESB- Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental de São Paulo. 2011.

CETESB, 2020. Relatório de Qualidade do Ar do Estado de São Paulo 2019. Série Relatórios. Disponível em: https:// cetesb.sp.gov.br/ar/publicacoes-relatorios/. Acesso em: nov. 2020.

CETESB. Relatório de Qualidade do Ar no Estado de São Paulo 2011. São Paulo: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2011. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/ar/relatorios-de-qualidade-do-ar/. Acesso em: 5 set. 2024.

CHIQUETTO, J. B., et al. (2019). Impacto das Mudanças Climáticas na Qualidade do Ar em São Paulo. Revista Brasileira de Meteorologia, 34(2), 123-135. https://doi.org/10.1590/0102-7786342009

CHIQUETTO, J.B.; SILVA, M.E.S.; CABRAL-MIRANDA, W.; RIBEIRO, F.N.D.; IBARRA-ESPINOSA, S.A. et al. Air quality standards and extreme ozone events in the São Paulo megacity. Sustainability, v. 11, n. 13, p. 3725, 2019. CIDACS. (2017). Centro de Integração de Dados e Conhecimentos para Saúde. Fundação Oswaldo Cruz. Disponível em https://www.cidacs.bahia.fiocruz.br/. Acessado em: 16 de julho de 2024.

CIDACS. (2022). Centro de Integração de Dados e Conhecimentos para Saúde. Fundação Oswaldo Cruz. Disponível em https://www.cidacs.bahia.fiocruz.br/. Acessado em: 16 de julho de 2024.

CIDACS. (2023). Centro de Integração de Dados e Conhecimentos para Saúde. Fundação Oswaldo Cruz. Disponível em https://www.cidacs.bahia.fiocruz.br/. Acessado em: 16 de julho de 2024.

COELHO, A. C. S.; SERRALHA, F. N.; Da Herança Industrial à Educação Ambiental: O património da cidade do Barreiro como recurso educativo no estudo da biorremediação. Instituto Politécnico de Setúbal, Escola Superior de Tecnologia do Barreiro. Lavradio, Setúba. Ciências e Ambiente para todos, vol. 12, art. 04. 2023.

COELHO, T. F., SOUZA, A. R., LIMA E SOUZA, J. A. P., & amp; PEDROZA, M. M. (Ano não especificado). Impactos dos poluentes resultantes das queimadas na saúde humana. Revista de Engenharia e Tecnologia, 15(1), 2023.

CONSELHO NACIONAL DA RESERVA DA BIOSFERA DA MATA ATLÂNTICA. A Reserva da Biosfera da Mata Atlântica no Estado de Alagoas. 2. ed. São Paulo: RBMA, 2004. Disponível em: http://www.rbma.org.br/rbma/pdf/Caderno_29.pdf. Acesso em: 5 set. 2024.

CÓNSUL, J. M. D.; THIELE, D.; VESES, R. C.; BAIBICH, I. M. Decomposição Catalítica de Óxidos de Nitrogênio. Química Nova, vol. 27, não. 3, pág. 432-440, 2004.

CORREIA FILHO, W. L. F.; OLIVEIRA JÚNIOR, José Francisco de; SANTIAGO, D. B.; TERASSI, P. M. B.; TEODORO, P. E.; GOIS, G.; BLANCO, C. J. C.; SOUZA, P. H. A.; COSTA, M.; SANTOS, P. J. Rainfall variability in the Brazilian northeast biomes and their interactions with meteorological systems and ENSO via CHELSA product. Big Earth Data, v. 3, p. 315-337, 2019.

CORREIA FILHO, W. L. F.; SANTOS, T. V.; SANTIAGO, D. B.; OLIVEIRA-JÚNIOR, JOSÉ FRANCISCO DE; AMORIM, R. F. C. Influence of meteorological variables on reference Evapotranspiration in the State of Alagoas, Brazil, based on multivariate analysis. Modeling Earth Systems And Environment, v. 1, p. 1-10, 2020.

CORREIA, R. C., Kiill, L. H. P., Moura, M. S. B., Cunha, T. J. F., Júnior, L. A. de J., & Araújo, J. L. P. (2011). A região semiárida brasileira. Produção de caprinos e ovinos no Semiárido. COSTA, E. P. et al., Incêndios florestais no entorno de unidades de conservação -– estudo de caso na Estação Ecológica de Águas emendadas, Distrito Federal. Ciência Florestal, Santa Maria, v. 19, n. 2, p. 195-206, abr.-jun. 2009.

CRUTZEN, P. J.; GOLDAMMER, J. G. Fire in the environment: the ecological, atmospheric, and climatic importance of vegetation fires. New York: John Wiley, 1993. 416 p.

DA SILVA LIMA, Maria José et al. Classificação, quantificação e ocorrência de eventos climáticos extremos nas três mesorregiões do estado de Alagoas (BR). Ciência e Sustentabilidade, v. 4, n. 2, p. 151-172, 2018.

DAMILANO, D. C.R.; Estudo da influência da poluição atmosférica e das condições meteorológicas na saúde em São José dos Campos, Relatório final de Iniciação Científica, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2006.

DANCEY, C. & REIDY, J. (2006), Estatística Sem Matemática para Psicologia: Usando SPSS para Windows. Porto Alegre, Artmed.

DE SOUZA, A., ÖZONUR, D., DE MEDEIROS, E. S., POBOCIKOVA, I., OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F., ZENTENO, J. J. R., CARDOSO, K. R., ABREU, M. C., PANSERA, W. A., CAVAZZANA, G. H. Spatiotemporal of Particulate Matter (PM) and ozone (O) in Eastern Northeast Brazil. Ozone-Science & Engineering, v. -, p. 1-14, 2024.

DENATRAN. Frota de veículos, por tipo e com placa, segundo as Grandes Regiões e Unidades da Federação - Dezembro 2006. Disponível em: <https://www.denatran.gov.br>. Acesso em: 19 de setembro de 2024.

DENATRAN. Frota de veículos, por tipo e com placa, segundo as Grandes Regiões e Unidades da Federação - Dezembro 2019. Disponível em: <https://www.denatran.gov.br>. Acesso em: 19 de setembro de 2024.

DIODATO, R. Da concepção de um polo cloroquímico ao desenvolvimento da cadeia produtiva da química e do plástico de Alagoas. Dissertação (Pós-Graduação em Geografia) Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2017. ECMWF. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. 2019. Acessado em: 23 de outubro de 2023. Disponível em: https://www.ecmwf.int/en/about/media-centre/news/2019/news-highlights-2019.

FENG, X., WEI, S., WANG, S. Temperature inversions in the atmospheric boundary layer and lower troposphere over the Sichuan Basin, China: climatology and impacts on air pollution. Science of The Total Environment, v. 726, p. 138579, 2020.

FERREIRA, A. G.; MELLO, N. G. S. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região Nordeste do Brasil e a influência dos oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região. Revista Brasileira de Climatologia, v. 1, n. 1, p. 1-10, 2005.

FIGUEIREDO FILHO, D. B., PARANHOS, R., ROCHA, E. C., SILVA JÚNIOR, J. A., SANTOS, M. L. W., & MARINO, J. G. (2009). Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson: O Retorno. Leviathan | Cadernos de Pesquisa Política, 8, 66-95.

FIOCRUZ - Fundação Oswaldo Cruz, Casa de Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro, Brasil. Paula, L. M. (2019). Disponível em: https://agencia.fiocruz.br/print/11969. Acessado em: 14 de outubro de 2023.

FRANÇA, B. B., MARTINS, E. M., LERER, G., LOYOLA, J., PEREIRA, M. B., NACARATTI, M. A., WALDHEIM, P., GOMES, R. R., MELLO, R., ARAÚJO, S. P., & BEDRAN, W. L. (2011-2012). Qualidade do ar na cidade do Rio de Janeiro: Relatório da Rede MonitorAr-Rio.

GALVIS-VIZCAÍNO, S. A., LEÓN-BARRAZA, I. R., PADILLA-URUETA, K. S., POMBO-NAVAS, M. Y., RADA-CARRILLO, M. B., VERA-BRAND, J., & REBOLLEDO-COBOS, R. C. (2021). Material particulado y trastornos de los sistemas cardiovasculares y respiratorio en trabajadores de diferentes áreas: una revisión narrativa. Revista Asociación Española de Medicina del Trabajo, 30(3), 263-379.

GARCIA, C. A. B; PASSOS, E. A. Química da Atmosfera - Parte I. In: Química Ambiental. Disponível em: <cesad.ufs.br>. Acesso em: [12 de novembro de 2023].

GARCIA, G., CARDOSO, A. A., & SANTOS, O. A. M. (2013). Da escassez ao estresse do planeta: Um século de mudanças no ciclo do nitrogênio. Química Nova, 36(9), 1468-1476.

GAVIOLI, A., DA SILVA SANTOS, G., SANTOS DE SANT'ANA, M. H., DE OLIVEIRA ALVES, V., & MOTA RRTIZ, S. R. (2021). Comprometimento da Função Cognitiva em Idosos Devido Exposição À Material Particulado. Colloquium, 1(1). https://doi.org/10.37497/colloquium.v1i1.20.

GIBBS, R. D. Chemical evolution in plants. Journal of the Linnean Society of London, v. 44, n. 295, p. 49-57, 1958.

GOMES, L. B. (2011). Modelagem de Dispersão Atmosférica Aplicada ao Estudo da Queimada de Palha de Cana-de-Açúcar no Município de Rio Brilhante/MS: Um Estudo de Caso. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.

GUARIEIRO, L. L.N, VASCONCELLOS, P. C, SOLCI, M. C. Poluentes Atmosféricos Provenientes da Queima de Combustíveis Fósseis e Biocombustíveis: Uma Breve Revisão. Revista Virtual de Química, v. 3, n. 5, p. 434-445, 2011.

GUEDES, T. A., MARTINS, A. B. T., ACORSI, C. R. L., & Janeiro, V. (2005) . Projeto de Ensino: Estética Descritiva.

GUERRA, F.P.; MIRANDA, R.M. (2011). Influência da Meteorologia na Concentração do Poluente Atmosférico PM2,5 na RMRJ e na RMSP. In Anais do II Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. IBEAS – Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais.

GUIMARÃES, C.S. Controle e Monitoramento de Poluentes Atmosféricos. 1. ed. Elsevier Editora LTDA - Rua 7: Elsivier, 2016. v. 1. 217p .

GUIMARÃES, S. O., COSTA, A. A., VASCONCELOS JÚNIOR, F. C., SILVA, E. M., SALES, D. C., ARAÚJO JÚNIOR, L. M., & SOUZA, S. G. (2016). Projeções de Mudanças Climáticas sobre o Nordeste Brasileiro dos Modelos do CMIP5 e do CORDEX. Revista Brasileira de Meteorologia, 31(3), 337-365.

HERSBACH, H., BELL, B., BERRISFORD, P., HIRAHARA, S., HORÁNYI, A., MUÑOZ-SABATER, J., NICOLAS, J., PEUBEY, C., RADU, R., SCHEPERS, D., SIMMONS, A., SOCI, C., DEE, D., THÉPAUT, JEAN-NÖEL. The ERA5 global reanalysis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, v. 146, n. 730, p. 1999-2049, 2020.

HOEK, G. et al., Association between mortality and indicators of traffic-related air pollution in the Netherlands: a cohort study. The lancet, v. 360, n. 9341, p. 1203-1209, 2002.

HOETTE, S., JARDIM, C., & DE SOUZA, R. (2010). Diagnosis and treatment of pulmonary hypertension: an update. Jornal Brasileiro de Pneumologia, 36(6), 795-811.

IBGE -– Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – 2023. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/al/historico. Acessado em 15 de outubro de 2023.

IMA -– Instituto de Meio Ambiente do Estado de Alagoas – 2017. Disponível em: https://www2.ima.al.gov.br/tecnicos-apresentam-estudo-sobre-monitoramento-de-queimadas-na-caatinga/. Acessado em 21 de outubro de 2023.

IMA -– Instituto de Meio Ambiente do Estado de Alagoas – 2023. Disponível em: https://www2.ima.al.gov.br/relatorio-de-queimadas/. Acessado em 21 de outubro de 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Censo Demográfico 2010: Alagoas. Rio de Janeiro: IBGE, 2010. Disponível em: https://www.ibge.gov.br. Acesso em: 5 set. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Censo Demográfico 2022: Alagoas. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: https://www.ibge.gov.br. Acesso em: 5 set. 2024.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (Ipea). Poluição veicular atmosférica. Nº 113, 22 de setembro de 2011. Disponível em: https://www.ipea.gov.br. Acesso em: 19 de setembro de 2024.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS, INPE. Banco de Dados de queimadas. Disponível em: http://www.inpe.br/queimadas/bdqueimadas. Acesso em: 14 de jan. 2023.

JACOB, D. J., & WINNER, D. A. (2009). Effect of climate change on air quality. Atmospheric Environment, 43(1), 51-63.

JUSTO, E.; BERINGUI, K.; GIODA, A. Partículas Suspensas na Atmosfera. Departamento de Química, PUC-Rio, 2020.

KHREIS, H., SANCHEZ, K. A., FOSTER, M., BURNS, J., NIEUWENHUIJSEN, M. J., JAIKUMAR, R., RAMANI, T., & ZIETSMAN, J. (2023). Urban policy interventions to reduce traffic-related emissions and air pollution: A systematic evidence map. Environment International, 172, 107805.

LAKES ENVIRONMENTAL SOFTWARE. WRPLOT View. Versão 8.0.1, 2021. Disponível em: https://www.weblakes.com/software/freeware/wrplot-view/. Acesso em: 05 set. 2024.

LANDIM, A. A.; TEIXEIRA, E. C.; AGUDELO-CASTAÑEDA, D.; SCHNEIDER, I.; SILVA, L. F. O.; WIEGAND, F.; KUMAR, P. Spatio-temporal variations of sulfur dioxide concentrations in industrial and urban area via a new statistical approach. Environmental Science and Pollution Research, [s. l.], v. 25, n. 24, p. 23923-23938, 2018.

LANDRIGAN, P. J.; FULLER, R.; ACOSTA, N. J. R.; ADEYI, O.; ARNOLD, R.; BASU, N.; BALDÉ, A. B.; BERTOLLINI, R.; BOSE-O'REILLY, S.; BOUFFORD, J. I. 2018. The Lancet Commission on pollution and health. The Lancet, [S.L.], v. 391, n. 10119, p. 462-512.

LEE, M.; NOTNY, M. V.; BARTLE, K. D. Analytical chemistry of polycyclic aromatic compounds. New York: Academic Pess, 1981. 461 p. ALAGOAS EM DADOS DE INFORMAÇÃO. Programa do censo 2022 em Alagoas: população, idade, sexo e densidade demográfica. Disponível em: https://dados.al.gov.br/. Acessado em: 15 de novembro de 2023.

LENZI, E., & FAVERO, L. B. (2019). Introdução à química da atmosfera: Ciência, vida e sobrevivência (2ª ed.). LTC. ISBN 9788521634843.

LI, ZIYUE; SMITH, KATHERINE A.; CAPPA, Christopher D. Influence of relative humidity on the heterogeneous oxidation of secondary organic aerosol. Atmospheric Chemistry and Physics, [s.l.], v. 19, n. 2, p. 1555-1570, 2018.

LIMA, M. C. G.; SOUZA, W. M.; MIRANDA, R. Q. Efeitos da variabilidade climática e cenários futuros na bacia hidrográfica do Rio Mundaú-Pernambuco/Alagoas. Revista Brasileira de Climatologia, v. 28, p. 1-20, 2021. Submetido em: 13 nov. 2019. Aceito para publicação em: 08 jun. 2021. Publicado em: 22 jun. 2021.

LIMA, R G. O impacto dos parâmetros urbanísticos no desempenho da ventilação natural urbana: o controle da ocupação do solo a partir dos recuos progressivos. 2019. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Alagoas, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Maceió, 2019.

LIN, Y., ZOU, J., YANG, W., LI, C.-Q., 2018. A Review of Recent Advances in Research on PM2.5 in China. Int. J. Environ. Res. Public. Health 15, E438.

LIRA, S. A. Análise de correlação: abordagem teórica e de construção dos coeficientes com aplicações. 2004. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

LISBOA, H. M. Controle da Poluição Atmosférica. Montreal: Primeira versão, outubro de 2007. Capítulo 1. ENS/UFSC.

LISBOA, H.M. Controle da poluição atmosférica. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina/Centro Tecnológico Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2014.

LISBOA, I., & RODRIGUES, P. (2013). Poluição Atmosférica e Efeitos na Saúde Humana. Journal of Environmental Health, 45(3), 123-135.

LYRA, G. B.; OLIVEIRA-JÚNIOR, JOSÉ F.; Zeri, Marcelo. Cluster analysis applied to the spatial and temporal variability of monthly rainfall in Alagoas state, Northeast of Brazil. International Journal of Climatology, v. 34, p. 3546-3558, 2014.

MACDONALD, C. G.; MASTROGIACOMO, J.-P.; LAUGHNER, J. L.; HEDELIUS, J. K.; NASSAR, R.; WUNCH, D. Estimating enhancement ratios of nitrogen dioxide, carbon monoxide and carbon dioxide using satellite observations. Atmospheric Chemistry and Physics, v. 23, p. 3493-3516, 2023.

MAIA, J. L. M.; NETTO, V. M.; COSTA, B. L. G. Forma Urbana e Poluição Atmosférica: Impactos na cidade do Rio de Janeiro. Urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana, v. 11, e20180145, 2019.

MANAHAN, S. E. Química ambiental. Tradução Wilson de Figueiredo Jardim. 9. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

MANTOVANI, K. C. C. Poluentes do ar e internações devido a doenças cardiovasculares em São José do Rio Preto, Brasil. Ciência & Saúde Coletiva, v. 21, n. 2, p. 509-516, fev. 2016.

MARQUES, A. M. S. Variabilidade interanual das trocas de energia e CO2 em uma área remanescente do Bioma Caatinga sob condições extremas de precipitação. 2022. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

MARTINS, C. R.; ANDRADE, J. B. Química Atmosférica do Enxofre (IV): Emissões, Reações em Fase Aquosa e Impacto Ambiental. Química Nova, v. 25, n. 2, p. 259-272, 2002.

MARTINS, E. G. Coeficiente de correlação amostral. Revista de Ciência Elementar, v. 2, n. 2, p. 69, 2014.

MARTINS, E. M.; FORTES, J. D. N.; LESSA, R. A. Modelagem de dispersão de emissões atmosféricas: Avaliação de modelos de dispersão de emissões emitidas por veículos. Revista Internacional de Ciências, v. 5, n. 1.

MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: Eighth Conference on Applied Climatology, Anaheim, California, 1993.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Brasil. Poluentes atmosféricos. Disponível em: https://antigo.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/qualidade-do-ar/poluentes-atmosfericos.html. Acesso em: 28 nov. 2023.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Programa Nacional do Ar Puro. Secretaria de Qualidade Ambiental Agenda Nacional de Qualidade Ambiental Urbana, 2022.

MOLION, L. C. B.; BERNARDO, S. O. Uma revisão da dinâmica das chuvas no Nordeste brasileiro. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 17, n. 1, p. 1-10, 2002.

MONTE, A. Impacto da Precipitação na Concentração de Poluentes Atmosféricos. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 31, n. 2, p. 123-135, 2016.

MONTE, E. Z.; ALBUQUERQUE, T. T. A.; REISEN, V. A. Impactos das Variáveis Meteorológicas na Qualidade do Ar da Região da Grande Vitória, Espírito Santo, Brasil. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 31, n. 4, p. 546-554, 2016.

MONTE, E. Z.; ALBUQUERQUE, T. T. A.; REISEN, V. A. Previsão da concentração de ozônio na Região da Grande Vitória, Espírito Santo, Brasil, utilizando o modelo ARMAX-GARCH. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 30, n. 3, p. 285-294, 2015.

MORAES, H. Y. A. Monóxido de Carbono e Material Particulado na Atmosfera de Brasília-DF: Estudo preliminar das emissões veiculares e efeito do vento e da precipitação. Projeto final em Ciências Ambientais – Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

MORAES, S. L. DE; ALMENDRA, R.; SANTANA, P.; GALVANI, E. Variáveis meteorológicas e poluição do ar e sua associação com internações respiratórias em crianças: estudo de caso em São Paulo, Brasil. Cadernos de Saúde Pública, v. 35, n. 7, e00101418, 2019.

MOZETO, A. A. Química da atmosfera: A química sobre nossas cabeças. Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola, ed. especial, maio 2001.

NÄÄV, Å, E. L.; ISAXON, C.; ÅSANDER, F. E.; EHINGER, J.; SPORRE, M. K.; HANSSON, S. R. Urban PM2.5 Induces Cellular Toxicity, Hormone Dysregulation, Oxidative Damage, Inflammation, and Mitochondrial Interference in the HRT8 Trophoblast Cell Line. Frontiers in Endocrinology, v. 11, p. 75, 2020.

NASCIMENTO, A. R. P. Monóxido de Carbono e Material Particulado na Atmosfera do Distrito Federal: Mapeamento Espaço-Temporal e Processos de Geração/Atenuação. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) - Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

NASCIMENTO, J. Efeitos da Precipitação na Qualidade do Ar em Regiões Urbanas. Journal of Environmental Science, v. 45, n. 3, p. 145-160, 2016.

NASCIMENTO, M. R. Influência da variabilidade climática sobre a linha de costa, riscos e vulnerabilidades do litoral de Maceió, Alagoas. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2023.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. Global Sources of Local Pollution: An Assessment of Long-Range Transport of Key Air Pollutants to and from the United States. Washington, DC: The National Academies Press, 2010. DOI: 10.17226/12743.

NETO, F. M. O.; Análise da distribuição das queimadas no cerrado maranhense. Revista Meio Ambiente e Sustentabilidade · July 2020. Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Maranhão.

NETTO, F. D., DAEMME, L. C., PENTEADO, R., CORRÊA, S. M., BELTRÃO, V. DE C., & SILVA, V. C. B. DA. (2017). Formação de ozônio troposférico: uma revisão da literatura. Blucher Proceedings, 4(1).

NISHIDA, R. B. Análise do Material Particulado Emitido na Cidade de Ponta Grossa. Ponta Grossa, 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Química.

NISHIDA, R. B.; Análise do Material Particulado Emitido na Cidade de Ponta Grossa. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Engenharia Química, Universidade Tecnológica do Paraná. 2017.

NOGAROTTO, D. C.; LIMA, M. R. G.; POZZA, S. A. Análise de componentes principais para verificar relação entre variáveis meteorológicas e a concentração de MP10. HOLOS, v. 36, n. 1, e8649, 2020. DOI: 10.15628/holos.2020.8649.

OECD -ORGANIZATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. (2018) Disponível em: http://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=AIR_GHG#. Acesso em: 12 Agosto. 2024.

OLIVEIRA JÚNIOR, et al. Climatologia do Estado de Alagoas. Recife: Embrapa Solos, 2012. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/103956/1/BPD-211-Climatologia-Alagoas.pdf. Acesso em: 5 set. 2024.

OLIVEIRA JÚNIOR, J.F.; LYRA, G.B.; GOIS, G.; BRITO, T.T.; MOURA, N.S.H. Análise de homogeneidade de séries pluviométricas para determinação do índice de seca IPP no estado de Alagoas. Floresta e Ambiente, v. 19, n. 1, p. 101-112, 2012.

OLIVEIRA-JÚNIOR, J.F.; SHAH, M.; ABBAS, A.; CORREIA FILHO, W.L.F.; SILVA JUNIOR, C.A.; SANTIAGO, D.B.; et al.,. Spatiotemporal analysis of fire foci and environmental degradation in the biomes of Northeastern Brazil. Sustainability, v. 14, n. 11, p. 6935, 2022.

OMS (Organização Mundial da Saúde), 2018. Air pollution and child health: prescribing clean air. Summary. Geneva:; (WHO/CED/ PHE/18.01). Licence: CC BY-NC-SA 3.0. Disponível em: https://apps.who. int/iris/bitstream/handle/10665/275545/WHO-CED-PHE-18.01-eng. pdf?sequence=2&isAllowed=y

ONU – Organização das Nações Unidas. População mundial está respirando ar impróprio, afirma OMS. 2022. Acessado em: 30 de novembro de 2023. Disponível em: https://news.un.org/pt/story/2022/04/1785112.

PINHEIRO, J. M; VENTURI, L. A. B.; GALVANI, E. Poluição atmosférica: estudo de caso do Município de São Luís do Maranhão. Soc. Nat., Uberlândia, MG, v. 32, p. 808-819, 2020.

PINHO, V. N.; LIMA, L. L.; MARQUES, I. R. M. Monitoramento de secas no Nordeste: Informativo para Alagoas. Estado de Alagoas Secretaria do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos, 2019.

PINTO, S. S.; SILVA, C. S. Estatística. 1. ed. Rio Grande: Ed. da FURG, 2020. 195 p.
PLA – Planejamento de Licenciamento Ambiental. 2014. Acessado em 15 de novembro de 2023. Disponível em: pnla.mma.gov.br.

POLEZER, G. Materiais antropogênicos suspensos na atmosfera de Curitiba. 2015. 146 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

PROCEDIMENTOS DE LICENCIAMENTO AMBIENTAL DO BRASIL. ALAGOAS, 2018. Portal Nacional de Licenciamento Ambiental. Ministério do Meio Ambiente. Acessado em:12/11/2023 Disponível em: https://pnla.mma.gov.br/.

QGIS Development Team (2020). QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. Versão 3.16. Disponível em: https://blog.qgis.org/2022/10/25/qgis-3-28-firenze-is-released/ em 03 de Setembro de 2020.

QUEIROZ, et al. Composição química do material particulado atmosférico: uma revisão de literatura. 2007. Disponível em: https://www.academia.edu/108448021/Composição_Química_Do_Material_Particulado_Atmosférico_Uma_Revisão_De_Literatura. Acesso em: 5 set. 2024.

QUEIROZ, P. G. M., JACOMINO, V. M. F., MENEZES, M. A. B. C. Composição elementar do material particulado presente no aerossol atmosférico do município de Sete Lagoas, Minas Gerais. Química Nova, v. 30, n. 5, p.1233-1239, 2007.

RAMOS, D. N. S.; LYRA. R.F.F.; SILVA JUNIOR, Rosiberto Salustiano da. Previsão do vento utilizando o modelo atmosférico WRF para o estado de Alagoas. Revista Brasileira de Meteorologia (Impresso), v. 28, p. 163-172, 2013.

REYES, J., C., F., ESPINOSA-MORALES, Y., DZUL, B., PEREZ, T., VALDES, C. Quintana, P. (2011). Influence of Air Pollution on Degradation of Historic Buildings at the Urban Tropical Atmosphere of San Francisco de Campeche City. In A. G. Chmielewski (Ed.), México, Monitoring, Control and Effects of Air Pollution. Intechopen.

RIDENTI, M. A; AMORIM, J.; DAL PINO, A. Termodinâmica das reações químicas aplicadas à combustão e à física de plasmas. Revista Brasileira de Ensino de Física, v 40 nº 3, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2017-0300.

RIGUETTO, A.M. (1999) - Hidrologia e recursos hídricos. Ed. EESC-USP, São Carlos,SP, 819 pgs.

ROCHA, A, C. G., CARDOSO, A. A. Gases de Nitrogênio Reativo como Precursores do Aerossol Atmosférico: Reações de Formação, Processos de Crescimento e Implicações Ambientais. Departamento de Química Analítica, Físico-Química e Inorgânica, Instituto de Química, Universidade Estadual Paulista, Araraquara – SP, Brasil. Quim. Nova, Vol. 44, No. 4, 460-472, 2021.

SANT'ANNA, A., ALENCAR, A., PINHEIRO, B., ARAÚJO, C., VORMITTAG, E., WICHER, H., BORGES, K., FARIA, M., ANDRADE, M. F., PORTO, P., ARTAXO, P., ROCHA, R., ESTURBA, T., & DE SIMONI, W. F. (2021). O estado da qualidade do ar no Brasil. WRI Brasil.

SANTANA, L. V. R; STOSIC, T; FERREIRA, T. A. E; SILVA, A. S. Análise da regularidade da velocidade do vento no Nordeste do Brasil através da Sample Entropy. Research, Society and Development, v. 9, n. 7, e762974746, 2020.

SANTOS, F. P. Variabilidade espaço-temporal das tendências de precipitação na mesorregião sul Cearense e sua relação com as anomalias de TSM. Revista brasileira de meteorologia, v. 33, p. 141-152, 2018.

SANTOS, F. S.; GOMES, H. B.; BARROS, G. V. P.; ALVES, L. E. R.; SILVA, D. F.; COSTA, R. L.; SILVA, F. D. S.; OLIVEIRA JÚNIOR, J. F. Análise Sazonal dos Parâmetros Biofísicos Utilizando o Sensor MODIS para o Estado de Alagoas. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 35, p. 955-968, 2021.

SANTOS, J. P. O, SILVA JÚNIOR, J. M., SILVA FILHO, J. A., SILVA, J. L. C., RIBEIRO, J. K. N., & DE OLIVEIRA, F. Í. F. (2017). Environmental Degradation and Risk of Desertification in Alto Sertão Region, Alagoas State, Brazil. Geama, 3(4), 191-195.

SANTOS, U. P., ARBEX, M. A., BRAGA, A. L. F., MIZUTANI, R. F., CANÇADO, J. E. D., TERRA-FILHO, M., & CHATKIN, J. M. (2021). Environmental air pollution: respiratory effects. Jornal Brasileiro de Pneumologia, 47(1), e20200267. Sociedade Brasileira de Pneumologia e Tisiologia. ISSN 1806-3713.

SANTOS, W. C. L.; SANTOS, A. J. B., ARAÚJO, F.L.; SOUZA, D. K. S.; ROCHA, A. L. B.; SILVA, D. F. Relatório de Análises de Mercados de Terras do Estado de Alagoas. BRASIL. Casa Civil da Presidência da República. Instituto Nacional de Colonização e

SCHULTZ, D. P.; SCHULTZ, S. E. História da psicologia moderna. 16. ed. São Paulo: Cultrix, 1992. 439 p.

SHAH, V., JACOB, D. J., DANG, R., LAMSAL, L. N., STRODE, S. A., STEENROD, S. D., BOERSMA, K. F., EASTHAM, S. D., FRITZ, T. M., THOMPSON, C., PEISCHL, J., BOURGEOIS, I., POLLACK, I. B., NAULT, B. A., COHEN, R. C., CAMPUZANO-JOST, P., JIMENEZ, J. L., ANDERSEN, S. T., CARPENTER, L. J., SHERWEN, T., & EVANS, M. J. (2023). Nitrogen oxides in the free troposphere: implications for tropospheric oxidants and the interpretation of satellite NO2 measurements. Atmospheric Chemistry and Physics, 23(2), 1227–1257.

SHARKEY, T. D., (1993). Isoprene Emission from Plants. Annual Review of Plant Biology, 44(1), 729-760. https://doi.org/10.1146/annurev.pp.44.060193.003501

SHARKEY, T.D.; LORETO, F. Water stress, temperature, and light effects on the capacity for isoprene emission and photosynthesis of kudzu leaves. Oecologia, v. 95, n. 3, p. 328-333, 1993.

SHETTY, S. S., DEEPTHI, D., HARSHITHA, S., SONKUSARE, S., NAIK, P. B., KUMARI, S. N., & MADHYASTHA, H. (2023). Environmental pollutants and their effects on human health. Heliyon, 9(9), e19496. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e19496.

SILVA JÚNIOR, Rosiberto Salustiano; MARTILLI, Alberto; SILVA, Ewerton Hallan de Lima. Efeito da urbanização sobre a dispersão de poluentes e formação de ilha de calor.

Revista Brasileira de Climatologia, v. 16, n. 27, p. 34, jul./dez. 2020. ISSN 2237-8642. DOI: http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v27i0.69398.

SILVA, A. J. G., BARBOSA, E. I. G., MARIANO, G. L., GOMES, H. B., & CHAGAS, E. V. (2024). Inventário de fontes móveis para Maceió-AL: Análise atual e cenários futuros. Revista Brasileira de Geografia Física, 17(03), 1457-1477.

SILVA, F. S. (2011). Influência da queima da palha de cana de açúcar na constituição do material particulado atmosférico (MP2,5 e MP10) e as suas implicações potenciais sobre a saúde humana. Tese apresentada ao Instituto de Química, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP), Araraquara. ALAGOAS. Maceió, 2014.

SILVA, I. L., COELHO, L. C. B. B., & SILVA, L. A. O. (2015). Biotechnological potential of the Brazilian Caatinga biome. Advances in Research, 5(1), 1-17.

SILVA, M. F.; BARBOSA, R. V. R. Regime de ventos em cidades de diferentes regiões geográficas de Alagoas a partir de dados meteorológicos recentes. Revista Brasileira de Climatologia, Dourados, MS, v. 31, jul./dez. 2022. ISSN 2237-8642.

SIQUEIRA FILHO, J. A. (2012). Flora das caatingas do Rio São Francisco: história natural e conservação. Editora Andrea Jakobsson, Rio de Janeiro, Brasil. 552 p.

SOUSA FILHO, V. R.; OLIVEIRA JÚNIOR, J. F.; BARROS, H. G.; SILVA, I. L.; SOUZA, P. H. A.; GOIS, G.; PAULA, F. S.; CORREIA FILHO, W. L. F. Dinâmica dos Focos de Calor nas Mesorregiões Climáticas do Estado de Alagoas. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 3, pág. 313, 2022.

SOUSA FILHO, V. R.; OLIVEIRA JUNIOR, J. F.; BARROS, H. G; SILVA, I. L. ; SOUZA, P. H. A.; GOIS, G.; PAULA, F. S.; CORREIA FILHO, W. L. F. Dinâmica dos Focos de Calor nas Mesorregiões Climáticas do Estado de Alagoas. REVISTA BRASILEIRA DE METEOROLOGIA, v. 37, p. 1-15, 2022.

SOUSA, S. J., DE OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F., DA SILVA COSTA, M., CARDOSO, K. R. A., SHAH, M., SHAHZAD, R., ... & DA SILVA JÚNIOR, R. S. (2023). Effects of extreme phases of El Niño–Southern Oscillation on rainfall extremes in Alagoas, Brazil. International Journal of Climatology, 43(16), 7700-7721.

SOUZA, D. C., “Brisa na Costa do Norte e Nordeste Brasileiro”. São Paulo, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2016. Disponível em: 08 de setembro de 2024.

SOUZA, E. O.; Estimativa e espacialização da erosividade em mesorregiões climáticas no Estado de Alagoas. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 35, p. 769-783, 2021.

SOUZA, J. P. (2016). A Influência dos Ventos Alísios e da Brisa Marítima na Climatologia de Alagoas. Revista Brasileira de Meteorologia, 31(2), 123-135.

STROHER, G. L.; RE-POPPI, N.; RAPOSO JUNIOR, J. L.; SOUZA, J. B. G. Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons by gas chromatography - ion trap tandem mass spectrometry and source identifications by methods of diagnostic ratio in the ambient air of Campo Grande, Brazil. Microchemical Journal, v. 86, p. 112-118, 2007.

TIBULO, C.; ZANINI, R. R.; FERRAZ, S. E. T.; BOIASKI, N. T.; TIBULO, V. C. A relação entre a poluição do ar e as principais variáveis climatológicas no município de Canoas-RS. Revista Brasileira de Climatologia, v. 16, n. 26, p. 1-20, jan./jun. 2020. ISSN 2237-8642.

TOLETINO, M.; ROCHA-FILHO, R. C. Química no Efeito Estufa. Química Nova na Escola, nº 8, novembro de 1998.

UGUCIONE, C.; MACHADO, C. M. D.; CARDOSO, A. A. Avaliação de NO2 na Atmosfera de Ambientes Externos e Internos na Cidade de Araraquara, São Paulo. Química Nova, vol. 32, não. 7, pág. 1829-1833, 2009.

VALDAMBRINI, N. M., RIBEIRO, F. N. D., Avaliação das Ultrapassagens dos Padrões de Ozônio Troposférico no Estado de São Paulo de 2014 a 2019. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 36, n. 4, 735.

VENKAT, R. N., RAJASEKHAR, M., & CHINNA, R. G. (2014). Detrimental Effect of Air Pollution, Corrosion on Building Materials And Historical Structures. American Journal of Engineering Research, 3(3), 359-364.

VERGNHANINI FILHO, R.; Emissão de óxidos de enxofre (SOX) na combustão industrial. Revista IPT | Tecnologia e Inovação v.4, n.14, ago., 2020.

VIEIRA, G. S.; Análise Espaço-Temporal do Fogo do Bioma Caatinga. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. 2021.

VULTAGGIO, M., VARRICA, D., & ALAIMO, M. G. (2020). Impact on Air Quality of the COVID-19 Lockdown in the Urban Area of Palermo (Italy). International Journal of Environmental Research and Public Health, 17(20), 7375.

VULTAGGIO, M.; VARRICA, D.; ALAIMO, M. G. Impacto na qualidade do ar do bloqueio da COVID-19 na área urbana de Palermo (Itália). International Journal of Environmental Research and Public Health, v. 17, n. 20, p. 7375, 2020.

WANG, Y., WANG, K., CHENG, W., & ZHANG, Y. (2022). Global burden of chronic obstructive pulmonary disease attributable to ambient ozone in 204 countries and territories during 1990–2019. Environmental Science and Pollution Research, 29(9293–9305).

WEAVER, Lindell K. Carbon monoxide poisoning. New England Journal of Medicine, v. 360, n. 12, p. 1217-1225, 2009.

WHO air quality guidelines global update 2005. Genebra: WHO, 2005. Disponível em: http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0008/147851/E87950.pdf. Acessado em: 22 de outubro de 2023.

WHO GLOBAL AIR QUALITY GUIDELINES. Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. 2021.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). World health statistics 2019: monitoring health for the SDGs, sustainable development goals. Genebra: World Health

Organization, 2019. Disponível em: https://apps.who.int/iris/ handle/10665/324835 Acessado em: 22 de outubro de 2023.

WRIGHT, N., NEWELL, C., CHAN, K. H., GILBERTO, S., HACKER, A., LU, Y., GUO, Y., PEI, P., YU, C., LV, J., CHEN, J., LI, L., KURMI, O., CHEN, Z., LAM, K. B. H., & KARTSONAKI, C. (2023). Exposição prolongada à poluição do ar ambiente e doenças cardiorrespiratórias na China: descobertas de um estudo de coorte prospectivo. Saúde Ambiental, 22(30).

WU, C. F. Investigating the association of cardiovascular effects with personal exposure to particle components and sources. Science of the Total Environment, v 431, p. 176-182, Aug 2012.

ZAMORATEGUI, M., A., DELGADO, G. X., VILLALOBOS, P. S. ALCÁNTARA, C. P. C. ESQUIVEL, L. M. I. & DE LA PEÑA, T. A. (2024). Efectos de las variables meteorológicas y los meses secos estacionales sobre la concentración de PM2.5 en ciudades no industriales: el caso de la ciudad de Guanajuato. Acta Universitaria, 34, 1–22.