

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA - CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE SAÚDE E SERVIÇO
CURSO DE MESTRADO PROFISSIONAL EM CLIMA E AMBIENTE**

ANA PAULA MARCON HANADA

A poluição atmosférica em Santa Catarina: estudo de 2008 a 2022



FLORIANÓPOLIS, 2024.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA - CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE SAÚDE E SERVIÇO
CURSO DE MESTRADO PROFISSIONAL EM CLIMA E AMBIENTE**

ANA PAULA MARCON HANADA

A poluição atmosférica em Santa Catarina: estudo de 2008 a 2022

Dissertação submetida ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre Profissional em Clima e Ambiente.

Orientador: Prof. Dirceu Luis Herdies.
Doutor em Meteorologia.

Coorientador: Prof. Mário Francisco Leal de Quadro.
Doutor em Meteorologia.

FLORIANÓPOLIS, 2024.

CDD 551.5
H233p

Hanada, Ana Paula Marcon

A poluição atmosférica em Santa Catarina: estudo de 2008 a 2022 [DIS] / Ana Paula Marcon Hanada; orientação de Dirceu Luis Herdies; coorientação de Mário Francisco Leal de Quadro – Florianópolis, 2024.

1 v.: il.

Dissertação de Mestrado (Clima e Ambiente) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Inclui referências.

1. Poluição do ar. 2. Santa Catarina. 3. Índice de qualidade do ar. 4. Trajetória de partículas. 5. Meteorologia da poluição do ar. I. Herdies, Dirceu Luis. II. Quadro, Mário Francisco Leal de. III. Título.

Sistema de Bibliotecas Integradas do IFSC

Biblioteca Dr. Hercílio Luz – Campus Florianópolis

Catalogado por: Ana Paula F. Rodrigues - CRB 14/1117



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CLIMA E AMBIENTE

Aluno (a): **ANA PAULA MARCON HANADA**

Título:	A poluição atmosférica em Santa Catarina: estudo de 2008 a 2022
----------------	---

**Aprovado (a) pela Banca Examinadora em
cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de Mestre em Clima e Ambiente**

Dr(a). DIRCEU LUIS HERDIES

Documento assinado digitalmente
gov.br DIRCEU LUIS HERDIES
Data: 26/09/2024 16:30:16-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Orientador(a) / Presidente / IFSC / Florianópolis – SC
Participação: (X) Presencial () Videoconferência
(x) **Aprovado** () **Reprovado**

Dr(a). ADRIANO VITOR

Documento assinado digitalmente
gov.br ADRIANO VITOR
Data: 01/10/2024 15:15:18-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Avaliador(a) Interno / IFSC / Florianópolis - SC
Participação: (X) Presencial () Videoconferência
(x) **Aprovado** () **Reprovado**

Dr(a). MICHEL NOBRE MUZA

Documento assinado digitalmente
gov.br MICHEL NOBRE MUZA
Data: 02/10/2024 07:19:11-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Avaliador(a) Interno / IFSC / Florianópolis - SC
Participação: () Presencial (X) Videoconferência
(x) **Aprovado** () **Reprovado**

Dr(a). DEBORA SOUZA ALVIM RODRIGUES

Documento assinado digitalmente
gov.br DEBORA SOUZA ALVIM
Data: 02/10/2024 09:48:52-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Avaliador(a) Externo / USP/EEL / Lorena - SP
Participação: () Presencial (X) Videoconferência
(x) **Aprovado** () **Reprovado**

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

(x) unanimidade

Florianópolis, 20 de setembro de 2024.

Para meu pai Claudelino (1941-2010) e minha mãe Sibila (comemorando seu
octogésimo aniversário em 2024).
Dedico este trabalho e minha vida aos Senhores.
Irei honrá-los por toda minha existência.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, ao Deus Altíssimo, que fez tudo isso que nos cerca e aqui eu tentei entender e explicar os fenômenos que Ele criou. Obrigada, Pai!

Expresso minha gratidão ao meu marido, Eduardo Toshikazu Hanada, cujo apoio e ouvido atento foram fundamentais na elaboração deste trabalho. あいしてる!

Agradeço e reconheço o papel fundamental dos meus pais, que cultivaram em mim um sentimento de ilimitação, mesmo com recursos limitados.

Expresso minha sincera gratidão ao meu orientador, Prof. Dirceu, pela assistência, explicando os conceitos e dando muitas sugestões valiosas.

Agradeço meu coorientador, Prof. Mário, na utilização do *Climate Data Operator* e do *GrADS*, bem como pelo suporte fornecido na compreensão de conceitos além da minha *expertise*. Enfatizo seu altruísmo, acolhimento e habilidade didática.

Agradeço à Prof. Débora Alvim da USP, cujas contribuições durante e após a Qualificação foram de grande importância e proporcionaram avanços significativos no cronograma.

Agradeço ao Prof. Michel Muza, que além de auxiliar com os *scripts* iniciais, ofereceu críticas construtivas de maneira discreta após minha apresentação na Jornada Científica de 2023, evitando qualquer constrangimento. Isso me tocou.

Expresso meu reconhecimento ao Prof. Adriano Vitor, pela contribuição no delineamento estatístico da pesquisa e por acreditar na relevância deste estudo.

Agradeço também aos demais professores do Programa de Mestrado do IFSC, aos colegas, bem como a todos os funcionários envolvidos no programa, pela dedicação e apoio oferecidos ao longo desta jornada.

Deixo aqui meu agradecimento ao IFSC, IMA, IBGE, DETRAN, INPE/CPTEC, ECMWF e à NASA, instituições cujo suporte foi fundamental. Sem os dados fornecidos por essas instituições, nada seria possível.

Agradeço ao Instituto do Meio Ambiente de Santa Catarina (IMA), meu local de trabalho, pela concessão de afastamento de dois dias semanais ao longo de 24 meses, viabilizando minha dedicação à pesquisa. Expresso também minha gratidão aos colegas do IMA pela parceria e pelo suporte prestado ao longo desta jornada.

Por fim, gostaria de mandar um recado ao leitor que, em momentos futuros, dedicar-se-á à leitura desta dissertação. Que esta obra possa ser percebida como uma fonte de reflexão propícia para a modificação, implementação e estímulo ao avanço científico e tecnológico. Se este trabalho for útil de alguma forma, minha missão está cumprida.

“Pensem que todas as maravilhas, objetos de seus estudos, são a obra de muitas gerações, uma obra coletiva que exige de todos um esforço entusiasta e um labor difícil e impreterível. Tudo isto, nas mãos de vocês, se torna uma herança. Vocês a recebem, respeitam-na, aumentam-na e, mais tarde, irão transmití-la fielmente à sua descendência. Deste modo somos mortais imortais, porque criamos juntos obras que nos sobrevivem.”

(Albert Einstein)

RESUMO

O estudo investigou a poluição atmosférica em Santa Catarina ao longo de 15 anos (2008-2022), com foco nos poluentes das Diretrizes Globais de Qualidade do Ar da OMS. A análise baseou-se em dados de licenciamento ambiental, reanálises e sensores de satélite, abordando 51 atividades potencialmente poluidoras e 1.398 empresas, resultando na identificação de 15 áreas críticas. As tendências das séries históricas foram avaliadas pelo teste de *Mann-Kendall* e um *Ranking* foi criado para priorizar áreas mais afetadas. Foi constatada uma relação entre a concentração de NO_2 e indústrias, enquanto os particulados e SO_2 apresentaram padrões de dispersão influenciados por condições atmosféricas. Foi revelado aumento de *Black Carbon* e carbono orgânico, e queda de SO_4 e O_3 . A pesquisa apresentou uma climatologia sazonal e mensal, evidenciando variações significativas na concentração dos poluentes, sugerindo a necessidade de políticas adaptadas para o controle da poluição em diferentes regiões e períodos do ano. A concentração de grande parte dos poluentes é maior na Primavera, que pode estar relacionada a fatores sazonais específicos, como mudanças nas condições meteorológicas, aumento de atividades agrícolas e industriais, além de variações nos padrões de transporte atmosférico. Durante o Inverno, observou-se que os níveis de SO_2 e NO_2 são mais elevados, podendo ser atribuído ao aumento das emissões de fontes estacionárias, que são mais utilizados em meses mais frios, além das condições atmosféricas que dificultam a dispersão. A climatologia mensal dos poluentes revela variações significativas nas concentrações ao longo do ano. Em Janeiro, há menores níveis de *Black Carbon* e NO_2 , devido a condições favoráveis à dispersão, enquanto Maio apresenta as menores concentrações de SO_4 , $MP_{2,5}$, CO e O_3 , provavelmente influenciadas pelas condições climáticas do Outono. Em Junho, a baixa presença de carbono orgânico e sal marinho contrasta com o aumento de SO_2 , e em Julho, observa-se um pico de NO_2 , associado a atividades industriais e agrícolas. Setembro se destaca com as maiores concentrações de diversos poluentes, resultado de fatores antropogênicos e condições atmosféricas desfavoráveis. Novembro e Dezembro têm redução nos poluentes *Dust*, $MP_{2,5}$ e SO_2 , com Dezembro mostrando maior concentração de sal marinho. Foi observado um aumento significativo nos níveis de poluentes atmosféricos durante os períodos de 2010/2011 e 2021/2022, provavelmente influenciado pelo fenômeno climático *La Niña*. A avaliação dos escores de poluição atmosférica foi realizada em duas etapas: primeiro, atribuiu-se um escore individual para cada poluente em cada ponto de amostragem e, depois, calculado um escore final somando os escores individuais. O Ponto 5, na região de Joaçaba e Herval d'Oeste, apresentou o maior índice de poluição, seguido pelo Ponto 6, em Lages, e o Ponto 4, em Chapecó. Com base nesses resultados, esses locais foram indicados como prioritários para a instalação de estações de monitoramento da qualidade do ar em Santa Catarina. As observações sobre a dispersão e concentração de poluentes fornecem subsídios para o planejamento de medidas de mitigação da poluição do ar e a preservação da saúde pública.

Palavras-chave: Poluição do ar. Santa Catarina. Índice de qualidade do ar. Trajetória de partículas. Meteorologia da poluição do ar. Climatologia da poluição atmosférica.

ABSTRACT

The study investigated air pollution in Santa Catarina over 15 years (2008-2022), focusing on pollutants from the WHO Global Air Quality Guidelines. The analysis was based on environmental licensing data, reanalyses, and satellite sensors, addressing 51 potentially polluting activities and 1,398 companies, resulting in the identification of 15 critical areas. Trends in historical series were evaluated using the *Mann-Kendall* test, and a *Ranking* was created to prioritize the most affected areas. A relationship between NO_2 concentration and industries was found, while particulates and SO_2 showed dispersion patterns influenced by atmospheric conditions. An increase in *Black Carbon* and organic carbon was revealed, along with a decrease in SO_4 and O_3 . The research presented a seasonal and monthly climatology, highlighting significant variations in pollutant concentrations, suggesting the need for adapted policies to control pollution in different regions and periods of the year. The concentration of many pollutants is higher in Spring, which may be related to specific seasonal factors such as changes in meteorological conditions, increased agricultural and industrial activities, and variations in atmospheric transport patterns. During Winter, SO_2 and NO_2 levels are higher, possibly due to increased emissions from stationary sources, which are more utilized in colder months, as well as atmospheric conditions that hinder dispersion. The monthly climatology of pollutants reveals significant variations in concentrations throughout the year. In January, lower levels of *Black Carbon* and NO_2 occur due to favorable dispersion conditions, while May shows the lowest concentrations of SO_4 , $PM_{2.5}$, CO , and O_3 , likely influenced by Autumn's climatic conditions. In June, the low presence of organic carbon and sea salt contrasts with the increase of SO_2 , and in July, a peak of NO_2 is observed, associated with industrial and agricultural activities. September stands out with the highest concentrations of various pollutants, a result of anthropogenic factors and unfavorable atmospheric conditions. November and December show a reduction in *Dust*, $PM_{2.5}$, and SO_2 pollutants, with December showing a higher concentration of sea salt. A significant increase in atmospheric pollutant levels was observed during the 2010/2011 and 2021/2022 periods, likely influenced by the *La Niña* climatic phenomenon. The air pollution scores were evaluated in two stages: first, an individual score was assigned to each pollutant at each sampling point, then a final score was calculated by summing the individual scores. Point 5, in the region of Joaçaba and Herval d'Oeste, presented the highest pollution index, followed by Point 6, in Lages, and Point 4, in Chapecó. Based on these results, these locations were indicated as priorities for the installation of air quality monitoring stations in Santa Catarina. Observations on pollutant dispersion and concentration provide support for planning air pollution mitigation measures and preserving public health.

Keywords: Air pollution. Santa Catarina. Air quality index. Particle trajectory. Air pollution meteorology. Atmospheric pollution climatology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Recorte de Jornal “Wilmington News-Journal” de 06/12/1930: “64 vidas ceifadas por névoa venenosa na Bélgica”	32
Figura 2 – Cidade de Donora, Pensilvânia em Outubro de 1948	33
Figura 3 – Fábrica de Arame em Donora, Pensilvânia em 1910	34
Figura 4 – Foto da Praça Trafalgar durante a Grande Névoa de 1952 em Londres	35
Figura 5 – Escala espacial e temporal de variabilidade para os constituintes atmosféricos.	44
Figura 6 – Camadas da Atmosfera	56
Figura 7 – Variação diurna da camada limite planetária em condições de tempo bom	58
Figura 8 – Mapa de localização da área de estudo	71
Figura 9 – Comparativo entre dados de temperatura a 2 metros, no período de 2008 a 2022 obtidos do SAMeT e do ERA5. Unidade: °C	75
Figura 10 – Fluxograma para cálculo do Índice de Qualidade de Ar	77
Figura 11 – Exemplo de diagrama de rosa dos ventos	79
Figura 12 – Mapa de Calor de Kernel, indicando em tons de vermelho as densidades de empresas com potencial de emissões poluentes	84
Figura 13 – Valores médios sazonais para Precipitação no período de 2008 a 2022, através de dados MERGE. Unidade: mm	85
Figura 14 – Valores médios mensais para Precipitação, no período de 2008 a 2022, através de dados MERGE. Unidade: mm	86
Figura 15 – Valores médios sazonais para Temperatura a 2 metros no período de 2008 a 2022, através de dados SAMeT. Unidade: °C	87
Figura 16 – Valores médios mensais para Temperatura a 2 metros, no período de 2008 a 2022, através de dados SAMeT. Unidade: °C	88
Figura 17 – Valores médios sazonais para Vento a 10 metros, no período de 2008 a 2022, através de dados de Reanálise ERA5. Unidade: $m s^{-1}$	89
Figura 18 – Valores médios mensais para Vento a 10 metros, no período de 2008 a 2022, através de dados de Reanálise ERA5. Unidade: $m s^{-1}$	90
Figura 19 – Diagramas de rosa dos ventos	91
Figura 20 – Diagramas de rosa dos ventos, no período de 2008 a 2022, através de dados de Reanálise ERA5. Unidade: $m s^{-1}$	91
Figura 21 – Valores médios sazonais para Altura da Camada Limite no período de 2008 a 2022, através de dados de Reanálise ECMWF v5 (ERA5). Unidade: m	93

Figura 22 – Valores médios mensais para a Altura da Camada Limite, no período de 2008 a 2022, através de dados de Reanálise ECMWF v5 (ERA5). Unidade: °C	94
Figura 23 – Oceanic Niño Index	95
Figura 24 – Mapa Hipsométrico	96
Figura 25 – Valores médios sazonais para <i>Black Carbon</i> no período de 2008 a 2022, através da Reanálise MERRA-2. Unidade: $\mu g m^{-3}$	97
Figura 26 – Valores médios mensais para <i>Black Carbon</i> no período de 2008 a 2022, através da Reanálise MERRA-2. Unidade: $\mu g m^{-3}$	98
Figura 27 – Valores médios sazonais para <i>Dust</i> (Poeira) no período de 2008 a 2022, através da Reanálise MERRA-2. Unidade: $\mu g m^{-3}$	99
Figura 28 – <i>Dust</i> e Vento na América do Sul em SON no período de 2008 a 2022	100
Figura 29 – Valores médios mensais para <i>Dust</i> no período de 2008 a 2022, através da Reanálise MERRA-2. Unidade: $\mu g m^{-3}$	101
Figura 30 – Valores médios sazonais para <i>Dust MP_{2,5}</i> (Poeira) no período de 2008 a 2022, através da Reanálise MERRA-2. Unidade: $\mu g m^{-3}$	102
Figura 31 – Valores médios mensais para <i>Dust MP_{2,5}</i> no período de 2008 a 2022, através da Reanálise MERRA-2. Unidade: $\mu g m^{-3}$	103
Figura 32 – Valores médios sazonais para Particulado - Carbono Orgânico no período de 2008 a 2022, através da Reanálise MERRA-2. Unidade: $\mu g m^{-3}$	104
Figura 33 – Valores médios sazonais para Particulado - Carbono Orgânico na América do Sul, no período de 2008 a 2022, através da Reanálise MERRA-2. Unidade: $\mu g m^{-3}$	105
Figura 34 – Valores médios mensais para Particulado - Carbono Orgânico no período de 2008 a 2022, através da Reanálise MERRA-2. Unidade: $\mu g m^{-3}$	106
Figura 35 – Valores médios sazonais para Particulado - Sulfato no período de 2008 a 2022, através da Reanálise MERRA-2. Unidade: $\mu g m^{-3}$	107
Figura 36 – Valores médios sazonais para Vento a 900 hPa no período de 2008 a 2022, através da Reanálise ERA5. Unidade: $m s^{-1}$	108
Figura 37 – A topografia da região (a), em m, os vetores de vento (b) na estação da primavera (SON) em $m s^{-1}$, a concentração do poluente SO_4 (c) na primavera (SON), em $\mu g m^{-3}$, e em (d) são apresentadas as componentes do vetor vento e concentração do poluente com a mesma faixa de cores apresentadas em (c)	109
Figura 38 – Valores médios mensais para o Particulado <i>Sulfato</i> (SO_4) no período de 2008 a 2022, através da Reanálise MERRA-2. Unidade: $\mu g m^{-3}$	110

Figura 39 – Valores médios sazonais para Particulado - Sal Marinho no período de 2008 a 2022, através da Reanálise MERRA-2. Unidade: $\mu g m^{-3}$	111
Figura 40 – Valores médios mensais para o Particulado <i>Sal Marinho</i> no período de 2008 a 2022, através da Reanálise MERRA-2. Unidade: $\mu g m^{-3}$	112
Figura 41 – Valores médios sazonais para material particulado fino - $MP_{2,5}$ no período de 2008 a 2022, através da Reanálise MERRA-2. Unidade: $\mu g m^{-3}$	113
Figura 42 – Valores médios mensais para $MP_{2,5}$ no período de 2008 a 2022, através da Reanálise MERRA-2. Unidade: $\mu g m^{-3}$	114
Figura 43 – Concentração do Poluente $MP_{2,5}$ e a Relação com o Índice de Qualidade do Ar	115
Figura 44 – Valores médios sazonais para Dióxido de Enxofre (SO_2) no período 2008 a 2022, através da Reanálise MERRA-2. Unidade: $\mu g m^{-3}$	116
Figura 45 – Rosa dos ventos para o município de Itaiópolis, 2008 a 2022	116
Figura 46 – Concentração do Poluente SO_2 e a relação com o Índice de Qualidade do Ar	117
Figura 47 – Precipitação para o mês de junho de 2016, onde ocorreu o pico do poluente	118
Figura 48 – Trajetória para trás das parcelas de ar nas últimas 12 horas, chegando em Itaiópolis nos dias 14, 19, 22 e 24 de junho/2016	119
Figura 49 – Valores médios mensais para <i>Dióxido de Enxofre</i> no período de 2008 a 2022, através da Reanálise MERRA-2. Unidade: $\mu g m^{-3}$	120
Figura 50 – Valores médios sazonais para Monóxido de Carbono no período de 2008 a 2022. Comparativo entre MOPPIT e Reanálise MERRA-2. Unidade: ppm ($\times 10^{-2}$)	122
Figura 51 – Valores médios mensais para <i>Monóxido de Carbono</i> - CO, no período de 2008 a 2022, através de dados de reanálise MERRA-2. Unidade: ppm $\times 10^{-2}$	123
Figura 52 – Valores médios mensais para <i>Monóxido de Carbono</i> - CO, no período de 2008 a 2022, através de dados de MOPPIT. Unidade: ppm $\times 10^{-2}$	124
Figura 53 – Valores médios sazonais para Dióxido de Nitrogênio no período de 2008 a 2022, através de dados OMI. Unidade: $\mu g m^{-2}(\times 10^2)$	125
Figura 54 – Valores médios mensais para <i>Dióxido de Nitrogênio</i> , no período de 2008 a 2022, através de dados OMI. Unidade: $\mu g m^{-2}(\times 10^2)$	126
Figura 55 – Valores médios sazonais para Ozônio no período de 2008 a 2022, através de dados de Reanálise MERRA-2. Unidade: $kg kg^{-1}$, 875 hPa	127
Figura 56 – Valores médios mensais para <i>Ozônio</i> , no período de 2008 a 2022, através de dados de Reanálise MERRA-2. Unidade: $kg kg^{-1}$, 875 hPa	128

Figura 57 – Gráfico da série histórica modificada do Ponto 1 do poluente <i>Black Carbon</i> , no período de 2008 a 2022	129
Figura 58 – Gráfico da série histórica modificada do Ponto 3 do poluente <i>Dust</i> , no período de 2008 a 2022	131
Figura 59 – Gráfico da série histórica modificada do Ponto 7 do poluente <i>Dust</i> , no período de 2008 a 2022	131
Figura 60 – Gráfico da série histórica modificada do Ponto 9 do poluente <i>Dust</i> $MP_{2,5}$, no período de 2008 a 2022	133
Figura 61 – Gráfico da série histórica modificada do Ponto 7 do poluente <i>Dust</i> $MP_{2,5}$, no período de 2008 a 2022	134
Figura 62 – Gráfico da série histórica modificada do Ponto 4 do poluente Carbono Orgânico, no período de 2008 a 2022	136
Figura 63 – Gráfico da série histórica modificada do Ponto 4 do poluente Sulfato, no período de 2008 a 2022	137
Figura 64 – Gráfico da série histórica modificada do Ponto 5 do poluente Sulfato, no período de 2008 a 2022	138
Figura 65 – Gráfico da série histórica modificada do Ponto 1 do poluente Sal Marinho, no período de 2008 a 2022	139
Figura 66 – Gráfico da série histórica modificada do Ponto 13 do poluente Sal Marinho, no período de 2008 a 2022	140
Figura 67 – Gráfico da série histórica modificada do Ponto 4 do poluente particulado fino $MP_{2,5}$, no período de 2008 a 2022	142
Figura 68 – Gráfico da série histórica modificada do Ponto 15 do poluente Sal Marinho, no período de 2008 a 2022	142
Figura 69 – Gráfico da série histórica modificada do Ponto 7 do poluente SO_2 , no período de 2008 a 2022	144
Figura 70 – Gráfico da série histórica modificada do Ponto 12 do poluente SO_2 , no período de 2008 a 2022	144
Figura 71 – Gráfico da série histórica modificada do Ponto 2 do poluente CO , no período de 2008 a 2022	146
Figura 72 – Gráfico da série histórica modificada do Ponto 15 do poluente CO , no período de 2008 a 2022	146
Figura 73 – Gráfico da série histórica modificada do Ponto 1 do poluente NO_2 , no período de 2008 a 2022	148
Figura 74 – Gráfico da série histórica modificada do Ponto 10 do poluente NO_2 , no período de 2008 a 2022	148
Figura 75 – Gráfico da série histórica modificada do Ponto 4 do poluente O_3 , no período de 2008 a 2022	150
Figura 76 – Escores finais	158

Figura 77 – Valores médios sazonais para <i>Dust</i> (Poeira) para o período 2008 - 2022, na América do Sul, através da Reanálise MERRA-2. Unidade: $\mu g m^{-3}$.	183
Figura 78 – Valores médios mensais para <i>Dust</i> no período de 2008 a 2022, na América do Sul, através da Reanálise MERRA-2. Unidade: $\mu g m^{-3}$.	184
Figura 79 – Valores médios mensais para Carbono Orgânico no período de 2008 a 2022, na América do Sul, através da Reanálise MERRA-2. Unidade: $\mu g m^{-3}$.	185
Figura 80 – Gráficos de concentração do Poluente PM 2,5 e a Relação com o Índice de Qualidade do Ar	186
Figura 81 – Concentração do Poluente SO ₂ e a Relação com o Índice de Qualidade do Ar	189
Figura 82 – Séries históricas de Black Carbon	192
Figura 83 – Séries históricas de <i>Dust</i> (Poeira)	195
Figura 84 – Séries históricas de <i>Dust</i> (Poeira) $MP_{2,5}$	198
Figura 85 – Séries históricas de Carbono Orgânico	201
Figura 86 – Séries históricas de Sulfato - SO ₄	204
Figura 87 – Séries históricas de Sal Marinho	207
Figura 88 – Séries históricas de $MP_{2,5}$	210
Figura 89 – Séries históricas de Dióxido de Enxofre - SO ₂	213
Figura 90 – Séries históricas de Monóxido de Carbono - CO (MOPPIT)	216
Figura 91 – Séries históricas de Monóxido de Carbono - CO (MERRA-2)	219
Figura 92 – Séries históricas de Dióxido de Nitrogênio - NO ₂	222
Figura 93 – Séries históricas de Ozônio - O ₃	225

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Maiores cidades de Santa Catarina conforme o Censo do IBGE de 2022 em termos de população e a quantidade de veículos	25
Quadro 2 – População do Estado em 2021 - Número de municípios por faixa populacional	25
Quadro 3 – Focos Ativos de Queimadas no Estado de Santa Catarina	26
Quadro 4 – Padrões de Qualidade do Ar no Brasil	39
Quadro 5 – Níveis de qualidade do ar recomendados e metas provisórias . . .	40
Quadro 6 – Características dos poluentes	45
Quadro 7 – Estrutura do Índice de Qualidade do Ar	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Poluentes e fontes de obtenção de dados	72
Tabela 2 – Elementos meteorológicos e fonte de obtenção de dados	74
Tabela 3 – Análise de tendência <i>Mann-Kendall</i> do poluente <i>Black Carbon</i>	130
Tabela 4 – Análise de tendência <i>Mann-Kendall</i> do poluente <i>Dust</i>	132
Tabela 5 – Análise de tendência <i>Mann-Kendall</i> do poluente <i>Dust MP_{2,5}</i>	135
Tabela 6 – Análise de tendência <i>Mann-Kendall</i> do poluente Carbono Orgânico	136
Tabela 7 – Análise de tendência <i>Mann-Kendall</i> do poluente Sulfato	138
Tabela 8 – Análise de tendência <i>Mann-Kendall</i> do poluente Sal Marinho	141
Tabela 9 – Análise de tendência <i>Mann-Kendall</i> do poluente <i>MP_{2,5}</i>	143
Tabela 10 – Análise de tendência <i>Mann-Kendall</i> do poluente <i>SO₂</i>	145
Tabela 11 – Análise de tendência <i>Mann-Kendall</i> do poluente Monóxido de Carbono (MERRA-2)	147
Tabela 12 – Análise de tendência <i>Mann-Kendall</i> do poluente <i>NO₂</i>	149
Tabela 13 – Análise de tendência <i>Mann-Kendall</i> do poluente Ozônio em 875 hPa (MERRA-2)	150
Tabela 14 – Escore do poluente <i>Black Carbon</i>	151
Tabela 15 – Escore do poluente <i>Dust</i>	152
Tabela 16 – Escore do poluente <i>Dust MP_{2,5}</i>	153
Tabela 17 – Escore do poluente Carbono Orgânico	154
Tabela 18 – Escore do poluente Sal Marinho	154
Tabela 19 – Escore do poluente <i>MP_{2,5}</i>	155
Tabela 20 – Escore do poluente <i>SO₂</i>	156
Tabela 21 – Escore do poluente <i>CO</i>	156
Tabela 22 – Escore do poluente <i>NO₂</i>	156
Tabela 23 – Escore final dos poluentes atmosféricos	157

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CO	Monóxido de Carbono
MP ₁₀	Partículas com diâmetro aerodinâmico menor ou igual 10 μm
MP _{2,5}	Partículas com diâmetro aerodinâmico menor ou igual a 2,5 μm
NO	Monóxido de Nitrogênio
NO ₂	Dióxido de Nitrogênio
NO _x	Óxidos de Nitrogênio
SO ₂	Dióxido de Enxofre
ASAS	Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CLP	Camada Limite Planetária
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CONSEMA	Conselho Estadual do Meio Ambiente
COV	Composto Orgânico Volátil
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
DJF	Dezembro, Janeiro e Fevereiro (Verão no Hemisfério Sul)
ECMWF	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i> (Centro Europeu de Previsões Meteorológicas a Médio Prazo)
ENOS	<i>El Niño</i> Oscilação Sul
ERA5	ECMWF Reanalysis 5
GES-DISC	<i>Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center</i> (Goddard dados de Ciências da Terra e Centro de Serviços de informação)
GIOVANNI	<i>GES-DISC Interactive Online Visualization and Analysis Interface</i> (GES-DISC interativo on-line Interface de Visualização e Análise)
GIS	<i>Geographic Information System</i> (Sistema de Informações Geográficas - SIG)

GMAO	<i>Global Modeling and Assimilation Office</i> (Escritório Global de Modelagem e Assimilação)
GrADS	<i>Grid Analysis and Display System</i> (Sistema de Análise e Visualização de Grad)
HYSPLIT	<i>Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory</i> (Trajetória Híbrida Integrada de Partícula Única Lagrangiana)
IFSC	Instituto Federal de Santa Catarina
IMA	Instituto do Meio Ambiente de Santa Catarina
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IQAr	Índice de Qualidade do Ar
JJA	Junho, Julho e Agosto (Inverno no Hemisfério Sul)
LAO	Licença Ambiental de Operação
MAM	Março, Abril e Maio (Outono no Hemisfério Sul)
MERRA-2	<i>Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2</i> (Análise Retrospectiva da Era Moderna para Pesquisa e Aplicações, Versão 2)
MKT	<i>Mann-Kendall Test</i> (Teste de Mann-Kendall)
MOPPIT	<i>Measurement of Pollution in the Troposphere</i> (Medição da poluição na troposfera)
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration's</i> (Administração Nacional Oceânica e Atmosférica)
ONI	<i>Oceanic Niño Index</i> (Índice Niño Oceânico)
Ren. LAO	Renovação de Licença Ambiental de Operação
SAMeT	<i>South American Mapping of Temperature</i> (Mapeamento Sul Americano de Temperatura)
SON	Setembro, Outubro e Novembro (Primavera no Hemisfério Sul)
SinFAT	Sistema de Informações Ambientais do IMA
TSM	<i>Temperatura da superfície do mar</i>
UTM	<i>Universal Transversa de Mercator</i>

WHO	<i>World Health Organization</i> (Organização Mundial da Saúde - OMS)
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ppb	Partes por bilhão
ppmv	Partes por milhão em volume
ppt	Partes por trilhão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	Justificativa	27
1.2	Definição do Problema	27
1.3	Objetivos	27
1.3.1	Objetivo Geral	27
1.3.2	Objetivos Específicos	28
1.4	Estrutura do Trabalho	28
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	29
2.1	Histórico da Poluição do Ar	29
2.1.1	Antes da Revolução Industrial	29
2.1.2	Revolução Industrial	30
2.1.3	Período de 1900 a 1925	31
2.1.4	Período de 1925 a 1950	32
2.1.5	Período de 1950 a 1980	35
2.1.6	Período de 1980 aos tempos atuais	36
2.2	Organização Mundial da Saúde	37
2.2.1	O papel da OMS na Saúde Pública	38
2.2.2	Diretrizes globais de qualidade do ar	39
2.2.3	Padrões de Qualidade do Ar	39
2.3	Química e Física da Atmosfera	41
2.3.1	Principais Poluentes Atmosféricos	44
2.3.1.1	<i>Dióxido de Enxofre</i>	45
2.3.1.2	<i>Monóxido de Carbono</i>	48
2.3.1.3	<i>Material Particulado</i>	49
2.3.1.4	<i>Ozônio</i>	52
2.3.1.5	<i>Óxidos de Nitrogênio</i>	53
2.4	Princípios de Meteorologia da Poluição do Ar	55
2.4.1	Atmosfera	55
2.4.2	Camada Limite Planetária	57
2.4.3	Meteorologia e poluição do ar	60
2.4.4	Aspectos Climáticos para Santa Catarina	62
2.4.5	Meteorologia da Área de Estudo	62
2.4.5.1	<i>Aspectos Meteorológicos da poluição do ar no Estado de Santa Catarina</i>	64
2.4.6	Microescala	66
2.4.7	Mesoescala	67
2.4.8	Escalas de poluentes atmosféricos	67
2.5	Dispersão e trajetória de parcelas de ar	68
3	METODOLOGIA	71
3.1	Área de Estudo	71
3.2	Mapeamento de áreas mais suscetíveis à poluição atmosférica	71
3.3	Obtenção de dados históricos de poluentes	72
3.4	Obtenção de dados históricos de elementos meteorológicos	74
3.5	Índice de Qualidade do Ar	76
3.6	Dispersão e trajetória de parcelas de ar	77
3.6.1	HYSPLIT	78

3.6.2	Diagrama de Rosa dos Ventos	78
3.7	Tratamento dos Dados	79
3.7.1	Série temporal modificada	80
3.7.2	Média móvel	80
3.7.3	Teste de Normalidade	81
3.7.4	Análise de tendência - Teste de Mann-Kendall	81
3.7.5	Determinação do ESCORE dos poluentes atmosféricos	81
4	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	83
4.1	Análise e discussão dos resultados	83
4.1.1	Mapeamento das áreas mais suscetíveis à poluição atmosférica com emissão local	83
4.1.2	Variáveis Meteorológicas	85
4.1.2.1	<i>Precipitação</i>	85
4.1.2.2	<i>Temperatura a 2 metros</i>	87
4.1.2.3	<i>Vento</i>	88
4.1.2.4	<i>Altura da Camada Limite Planetária</i>	93
4.1.3	Variável Climática	94
4.1.3.1	<i>Oceanic Niño Index</i>	94
4.1.4	Mapa Hipsométrico	95
4.1.5	Composição troposférica de poluentes	96
4.1.5.1	<i>Particulados</i>	96
4.1.5.2	<i>Material particulado fino</i>	112
4.1.5.3	<i>Dióxido de Enxofre</i>	115
4.1.5.4	<i>Monóxido de Carbono</i>	120
4.1.5.5	<i>Dióxido de Nitrogênio</i>	125
4.1.5.6	<i>Ozônio</i>	127
4.1.6	Análise de tendências	129
4.1.6.1	<i>Black Carbon</i>	129
4.1.6.2	<i>Dust</i>	130
4.1.6.3	<i>Dust MP_{2,5}</i>	132
4.1.6.4	<i>Carbono Orgânico</i>	135
4.1.6.5	<i>Sulfato - SO₄</i>	137
4.1.6.6	<i>Sal Marinho</i>	139
4.1.6.7	<i>MP_{2,5}</i>	141
4.1.6.8	<i>Dióxido de Enxofre</i>	143
4.1.6.9	<i>Monóxido de Carbono</i>	145
4.1.6.10	<i>Dióxido de Nitrogênio</i>	147
4.1.6.11	<i>Ozônio</i>	149
4.1.7	Escores de poluição atmosférica	151
4.1.7.1	<i>Escore do poluente Black Carbon</i>	151
4.1.7.2	<i>Escore do poluente Dust</i>	152
4.1.7.3	<i>Escore do poluente Dust MP_{2,5}</i>	152
4.1.7.4	<i>Escore do poluente Carbono Orgânico</i>	153
4.1.7.5	<i>Escore do poluente Sulfato</i>	154
4.1.7.6	<i>Escore do poluente Sal Marinho</i>	154
4.1.7.7	<i>Escore do poluente MP_{2,5}</i>	155
4.1.7.8	<i>Escore do poluente Dióxido de Enxofre</i>	155
4.1.7.9	<i>Escore do poluente Monóxido de Carbono</i>	156

4.1.7.10	<i>Escore do poluente Dióxido de Nitrogênio</i>	156
4.1.7.11	<i>Escore do poluente Ozônio</i>	157
4.1.7.12	<i>Escore final</i>	157
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	159
6	FUTUROS TRABALHOS	164
6.1	Sugestões para trabalhos futuros	164
7	PRODUTO TÉCNICO TECNOLÓGICO - PTT	166
	Referências	167
	APÊNDICES	175
	APÊNDICE A – OBTENÇÃO DE DADOS DE PARTICULADOS E DIÓXIDO DE ENXOFRE	176
	APÊNDICE B – OBTENÇÃO DE DADOS DE OZÔNIO	177
	APÊNDICE C – OBTENÇÃO DE DADOS DE DIÓXIDO DE NITROGÊNIO	178
	APÊNDICE D – OBTENÇÃO DE DADOS DE MONÓXIDO DE CARBONO	179
D.1	MERRA-2	179
D.2	MOPPIT	180
	APÊNDICE E – OBTENÇÃO DE DADOS DE PRECIPITAÇÃO	181
	APÊNDICE F – OBTENÇÃO DE DADOS DE VENTO A 10 METROS E ALTURA DA CAMADA LIMITE	182
	APÊNDICE G – MAPAS PARA DUST (POEIRA) PARA O PERÍODO 2008 - 2022, ATRAVÉS DA REANÁLISE MERRA-2	183
	APÊNDICE H – MAPAS MENSIS PARA CARBONO ORGÂNICO NO PERÍODO DE 2008 A 2022, ATRAVÉS DA REANÁLISE MERRA-2	185
	APÊNDICE I – GRÁFICOS DE CONCENTRAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO FINO E IQAR	186
	APÊNDICE J – GRÁFICOS DE CONCENTRAÇÃO DO SO₂ RELACIONANDO COM O ÍNDICE DE QUALIDADE DO AR (IQAR), PARA OS 15 PONTOS	189
	APÊNDICE K – GRÁFICOS DE SÉRIES HISTÓRICAS DE BLACK CARBON, PARA OS 15 PONTOS	192
	APÊNDICE L – GRÁFICOS DE SÉRIES HISTÓRICAS DE DUST, PARA OS 15 PONTOS	195
	APÊNDICE M – GRÁFICOS DE SÉRIES HISTÓRICAS DE DUST MP 2,5, PARA OS 15 PONTOS	198
	APÊNDICE N – GRÁFICOS DE SÉRIES HISTÓRICAS DE CARBONO ORGÂNICO, PARA OS 15 PONTOS	201
	APÊNDICE O – GRÁFICOS DE SÉRIES HISTÓRICAS DE SULFATO - SO₄, PARA OS 15 PONTOS	204

APÊNDICE P – GRÁFICOS DE SÉRIES HISTÓRICAS DE SAL MARINHO, PARA OS 15 PONTOS	207
APÊNDICE Q – GRÁFICOS DE SÉRIES HISTÓRICAS DE PARTICULADO FINO MP 2,5, PARA OS 15 PONTOS . .	210
APÊNDICE R – GRÁFICOS DE SÉRIES HISTÓRICAS DE DIÓXIDO DE ENXOFRE - SO ₂ , PARA OS 15 PONTOS . . .	213
APÊNDICE S – GRÁFICOS DE SÉRIES HISTÓRICAS DE MONÓXIDO DE CARBONO - CO (MOPPIT), PARA OS 15 PONTOS	216
APÊNDICE T – GRÁFICOS DE SÉRIES HISTÓRICAS DE MONÓXIDO DE CARBONO (MERRA-2), PARA OS 15 PONTOS	219
APÊNDICE U – GRÁFICOS DE SÉRIES HISTÓRICAS DE DIÓXIDO DE NITROGÊNIO - NO ₂ , PARA OS 15 PONTOS .	222
APÊNDICE V – GRÁFICOS DE SÉRIES HISTÓRICAS DE OZÔNIO - O ₃ , PARA OS 15 PONTOS	225
APÊNDICE W – COMO CONVERTER A CONCENTRAÇÃO DE NO ₂ DE MOL/CM ² PARA UG/M ²	228
ANEXOS	229
ANEXO A – RESOLUÇÃO CONSEMA 98/2017 - ATIVIDADES NÍVEL G DE POLUIÇÃO DO AR	230

1 INTRODUÇÃO

O ar puro é fundamental para a saúde. Há muitas evidências para afirmar como a poluição do ar afeta diferentes aspectos da saúde mesmo em concentrações baixas. A exposição à poluição do ar causa 9 milhões de mortes por ano e a perda de anos de vida saudáveis (Fuller et al., 2022). A carga de doenças atribuíveis à poluição do ar está no mesmo nível de outros grandes riscos à saúde global, como dietas não saudáveis e tabagismo (WHO, 2021).

A qualidade do ar nas cidades é resultado de uma complexa interação entre as condições ambientais naturais e antropogênicas. A poluição do ar é um grave problema ambiental – especialmente nos países em desenvolvimento (Mayer, 1999; Tan et al., 2021). A dinâmica da atmosfera tem um efeito direto nas condições meteorológicas e, conseqüentemente, sobre o Clima e a existência humana. Emissões de poluentes atmosféricos afetam a saúde pública, o ecossistema e resultam em mudanças climáticas (Lazaridis, 2011).

Elementos climáticos como temperatura, precipitação, vento e umidade, modificam a poluição do ar, afetando a intensidade, o transporte e a dispersão de poluentes na atmosfera (Balogun et al., 2021). Uma vez que existe um prognóstico para um aumento da produção industrial e crescimento econômico em geral, as emissões de poluentes na atmosfera conseqüentemente irão aumentar. Por conseguinte, há uma necessidade urgente de estudar as características da poluição atmosférica, dinâmica e o seu transporte em várias escalas espaciais e temporais (Lazaridis, 2011).

Dentre os principais poluidores do ar destacam-se os Compostos Orgânicos Voláteis – COV (Lu et al., 2022). Os COV são todos os compostos que possuem carbono na composição e temperatura de ebulição variando de 50 e 260 °C (Pitiriciu & Tansel, 2021). São considerados poluentes perigosos, sendo que alguns deles são tóxicos e carcinogênicos. A inalação destes compostos pode produzir efeitos adversos e diretos na saúde humana, principalmente a exposição em concentrações elevadas e por um longo período (Lu et al., 2022; Pitiriciu & Tansel, 2021)¹.

As indústrias são importantes para o desenvolvimento das cidades e para a geração de empregos, porém são lançadoras de poluentes na atmosfera. No Estado de Santa Catarina, todas as empresas que desenvolvem atividades potencialmente poluidoras, seja a poluição da água, do ar e/ou do solo, devem ser submetidas a um processo de licenciamento ambiental conforme a Resolução CONAMA n° 237/1997 (BRASIL, 1997). No âmbito estadual catarinense a Resolução CONSEMA n° 98/2017 lista as atividades que são licenciáveis (SANTA CATARINA, 2017). Tal resolução detalha as atividades e seu respectivo potencial poluidor/degradador considerado. Nesta

¹ Alguns exemplos de COV: benzeno, formaldeído, tolueno, xileno, tricloroetileno e alcoóis (Derwent, 1995)

pesquisa será dado enfoque nas atividades cujo potencial poluidor do ar é “G” (Grande).

O Instituto do Meio Ambiente (IMA) é o órgão ambiental estadual de Santa Catarina, que visa implementar políticas públicas para proteger o Meio Ambiente, assegurar o uso adequado dos recursos naturais, a conservação e a recuperação dos ecossistemas, contribuindo para a sustentabilidade e qualidade ambiental (IMA, 2022). O IMA utiliza o Sistema de Informações Ambientais (SinFAT) para o licenciamento ambiental, onde os empreendedores fazem o requerimento de licenças e inserem documentos técnicos para análise.

Para compreender melhor onde estão localizadas as atividades poluidoras, é necessário fazer um mapeamento. A rede de monitoramento da qualidade do ar no Sistema de Informações Geográficas (SIG) no IMA é bastante precária, há somente 3 (três) estações de monitoramento, sendo duas no município de Tubarão e uma em Capivari de Baixo, todas pertencentes a uma empresa privada. O IMA possui um banco de dados com todos os empreendimentos com potencial para poluir o ar, disponível no SinFAT.

O SIG é um conjunto de sistemas que armazena, processa, analisa e pode representar diversas informações sobre o espaço geográfico, que pode gerar produtos como: mapas temáticos, imagens de satélite, gráficos e tabelas. Esses produtos são importantes para análise de fenômenos como a poluição e podem servir de parâmetro para o planejamento de ações nos órgãos públicos e privados.

A concentração de poluentes atmosféricos tende a ser mais elevada em áreas urbanas com uma densa presença de veículos automotores. A queima de combustíveis fósseis pelos veículos resulta na emissão desses poluentes. Nesse contexto, o Quadro 1 exibe a quantidade de veículos nos dez maiores municípios de Santa Catarina, estabelecendo também uma relação com a quantidade total de veículos nessas localidades. As cidades de Blumenau, Chapecó e Criciúma estão com uma relação veículo por habitante acima da média para o Estado.

Quadro 1 – Maiores cidades de Santa Catarina conforme o Censo do IBGE de 2022 em termos de população e a quantidade de veículos

Posição	Município	População (hab)	Qtde Veículos	Relação Veículo/Hab
1°	Joinville	616.323	466.516	0,76
2°	Florianópolis	537.211	393.413	0,73
3°	Blumenau	361.261	285.981	0,79
4°	São José	270.295	189.123	0,70
5°	Itajaí	264.054	205.313	0,78
6°	Chapecó	254.781	210.001	0,83
7°	Palhoça	222.598	144.193	0,65
8°	Criciúma	214.493	172.864	0,81
9°	Jaraguá do Sul	182.660	134.166	0,74
10°	Lages	164.981	128.161	0,78
-	Santa Catarina	7.610.361	5.966.771	0,78

Fonte: IBGE (2022) e DETRAN-SC (2024)

É importante compreender também a distribuição da densidade demográfica no Estado de Santa Catarina. Assim, o Quadro 2 demonstra a segmentação populacional por faixas de número de habitantes. Constata-se que a grande maioria dos municípios possui uma população inferior a 50 mil habitantes.

Quadro 2 – População do Estado em 2021 - Número de municípios por faixa populacional

Até 50.000 habitantes: 263 municípios
De 50.000 a 100.000 habitantes: 18 municípios
De 100.000 a 200.000 habitantes: 6 municípios
De 200.000 a 300.000 habitantes: 5 municípios
De 300.000 a 400.000 habitantes: 1 município
Acima de 400.000 habitantes: 2 municípios
Total do Estado: 295 municípios com 7.610.361 habitantes
Região Metropolitana de Florianópolis: 9 municípios com 1.174.811 habitantes
Florianópolis (capital): 537.211 habitantes

Fonte: IBGE (2022)

Além de fatores como densidade veicular e demográfica, é imperativo considerar o impacto das queimadas em áreas vegetadas, especialmente durante períodos de estiagem, que favorecem a ocorrência de incêndios florestais. Esses incêndios são uma fonte significativa de poluentes atmosféricos. A coleta de dados sobre focos de

incêndio é crucial devido à sua expressiva contribuição para a emissão de poluentes. O Quadro 3 apresenta esses números, destacando a importância da análise de dados ao longo de 15 anos (2008 a 2022), com registros mensais, para uma compreensão da sazonalidade das queimadas. No período analisado, o mês de agosto se destaca como o de maior incidência de focos, seguido por setembro e julho.

Quadro 3 – Focos Ativos de Queimadas no Estado de Santa Catarina

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
2008	37	59	32	59	217	76	438	585	399	78	132	133	2.245
2009	40	18	65	139	102	77	76	1.133	82	286	67	36	2.121
2010	6	19	25	36	3	40	171	1.111	377	191	118	66	2.163
2011	20	1	18	21	85	121	81	350	772	151	100	52	1.772
2012	25	34	111	57	160	111	102	718	274	63	120	45	1.820
2013	27	11	30	105	98	81	215	454	370	116	80	76	1.663
2014	51	25	17	35	40	3	83	521	202	123	45	35	1.180
2015	18	15	31	36	70	101	46	382	160	21	8	18	906
2016	64	2	20	33	36	104	610	795	677	56	144	20	2.561
2017	46	27	20	28	35	66	461	558	491	40	164	69	2.005
2018	9	48	22	150	77	52	161	574	126	74	53	71	1.417
2019	41	10	22	12	3	104	189	939	272	68	63	81	1.804
2020	35	36	132	308	286	102	89	977	203	172	69	16	2.425
2021	5	63	68	199	181	26	481	843	271	20	108	86	2.351
2022	42	80	30	76	87	40	230	425	69	81	172	28	1.360
Total	466	448	643	1.294	1.480	1.140	3.433	10.365	4.745	1.540	1.443	832	27.793

Fonte: INPE (2024)

No Brasil, o mapeamento/monitoramento da qualidade do ar é bastante precário, de 26 (vinte e seis) unidades federativas, apenas 12 (doze) possuem estações de monitoramento e informações de forma pública (IEMA, 2022). O monitoramento da qualidade do ar com o uso de estações físicas demanda investimento de alto custo em equipamentos tecnológicos e recursos humanos para operação e manutenção. Na Região Sul do Brasil, o Estado do Paraná dispõe de 8 (oito) estações e o Rio Grande do Sul de 5 (cinco) estações, já o Estado de Santa Catarina, que é objeto desta pesquisa, possui 3 (três) estações. O Estado de São Paulo é referência nacional de monitoramento da qualidade do ar, com 61 (sessenta e uma) estações de monitoramento que integram o Sistema QUALAR, desenvolvido pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB, cujos dados são apresentados em tempo real (CETESB, 2022).

1.1 Justificativa

Uma vez que existe um prognóstico para um aumento da produção industrial e crescimento econômico em geral, as emissões de poluentes atmosféricos irão aumentar. Por conseguinte, há uma necessidade urgente de estudar as características da poluição atmosférica, dinâmica e o seu transporte na atmosfera em várias escalas espaciais e temporais. A variabilidade espacial e temporal dos poluentes atmosféricos é um tema importante de estudo, considerando que o transporte a longa distância de poluentes atmosféricos contribui significativamente para os níveis de poluição do ar (Lazaridis, 2011).

Poluentes como o ozônio e o *Black Carbon* (Carbono Negro) contribuem tanto para a poluição do ar quanto para as mudanças climáticas. Essa sobreposição de efeitos adversos aponta que ganhos no controle desses poluentes, conhecidos como poluentes climáticos de vida curta (PCVC), geram benefícios em termos de qualidade do ar, bem como para a mitigação das mudanças climáticas (Simoni et al., 2021).

As atividades humanas alteraram profundamente as emissões de aerossóis para a atmosfera principalmente por meio da combustão de combustíveis fósseis, mas também por meio da agricultura, mudanças no uso da terra e alteração de processos naturais como incêndios florestais (Lenzi & Favero, 2011).

As emissões antropogênicas de algumas espécies importantes de aerossol, como o *Black Carbon* e o dióxido de enxofre (que forma o aerossol de sulfato), excedem as emissões naturais, resultando em aumentos substanciais na massa de partículas de aerossol e nas concentrações numéricas em grandes partes do planeta, com implicações para a energia radiativa da Terra (Carslaw, 2022).

1.2 Definição do Problema

Existe relação entre a distribuição geográfica de empresas identificadas como potenciais fontes de poluição e os níveis de poluição atmosférica observados no Estado de Santa Catarina? Onde estão os pontos mais críticos em termos de poluição do ar em Santa Catarina?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Investigar o aumento da poluição atmosférica no Estado de Santa Catarina, englobando os poluentes das Diretrizes Globais da Qualidade do Ar da Organização

Mundial da Saúde (OMS) de 2021, sendo: Material Particulado ($MP_{2,5}$ e MP_{10}), Ozônio (O_3), Dióxido de Nitrogênio (NO_2), Dióxido de Enxofre (SO_2) e Monóxido de Carbono (CO).

1.3.2 Objetivos Específicos

- i. Avaliar a tendência de concentração de poluentes ao longo de 15 anos (de 2008 até 2022);
- ii. Analisar em que períodos do ano as variações ocorrem (sazonalidade);
- iii. Estabelecer possível relação de concentrações de poluentes com eventos de *El Niño* e *La Niña*;
- iv. Identificar quais áreas são mais propensas à poluição;
- v. Analisar a trajetória e a dispersão dos poluentes;
- vi. Indicar quais locais devem possuir uma estação de monitoramento; e
- vii. Identificar quais os poluentes e suas principais fontes no Estado de Santa Catarina.

1.4 Estrutura do Trabalho

Além deste capítulo introdutório, a pesquisa está estruturada da seguinte forma: no Capítulo 2, apresenta-se a revisão bibliográfica, abrangendo o histórico da poluição do ar, a atuação da Organização Mundial da Saúde, aspectos de Química e Física da Atmosfera e os Princípios da Meteorologia aplicados à poluição do ar. O Capítulo 3 descreve a metodologia adotada. No Capítulo 4, são apresentados e discutidos os resultados obtidos. O Capítulo 5 apresenta as considerações finais, com uma síntese das principais conclusões. No Capítulo 6, são sugeridos os trabalhos futuros, indicando possíveis direções para pesquisas posteriores. Por fim, o Capítulo 7 descreve o Produto Técnico Tecnológico (PTT) desenvolvido a partir do estudo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica engloba uma análise do histórico da poluição do ar, desde seus princípios iniciais, a criação da Organização Mundial da Saúde e os tempos atuais. São considerados os aspectos fundamentais relacionados à química e física da atmosfera, aprofundando-se em seguida nos princípios de meteorologia aplicados ao estudo da poluição do ar, exploração da trajetória das partículas como último elemento, visando à coesão e interconexão de todo o conteúdo apresentado.

2.1 Histórico da Poluição do Ar

2.1.1 Antes da Revolução Industrial

Tanto Brimblecombe (2002) como Theodore (2008), afirmam que a poluição do ar existe há muito tempo, contribuída por fenômenos naturais e atividades humanas.

O período anterior à Revolução Industrial (1760 – 1840) foi marcado por desafios ambientais significativos, especialmente no que diz respeito à poluição do ar. As tribos antigas eram nômades, em parte para evitar os odores e a poluição gerados pelos dejetos animais, vegetais e humanos. A introdução do fogo trouxe alívio temporário, mas também resultou em combustão incompleta, enchendo o ar com fumaça e poluentes. A invenção da chaminé ajudou a melhorar a situação, mas a queima de madeira e carvão continuou a ser uma fonte importante de poluição atmosférica (Boubel et al., 1994).

Relatos do século I d. C descrevem a poluição do ar em Roma como pesada e insalubre devido às chaminés enfumaçadas. Com uma população superior a um milhão, o consumo de enormes quantidades de madeira resultava na fuligem que escurecia os templos e afetava a saúde de pessoas sensíveis (Boubel et al., 1994; Brimblecombe, 2002).

A queima de carvão e madeira causou desconforto e problemas de saúde em várias regiões, levando até mesmo a proibições Reais, como a proibição da queima de carvão em Londres durante o reinado de Elizabeth I. Antes da Revolução Industrial, as principais indústrias que contribuíam para a poluição atmosférica eram a metalurgia, cerâmica e processamento de produtos animais. A produção desses materiais envolvia a queima de combustíveis e produtos químicos que liberavam poluentes no ar (Boubel et al., 1994).

Os padrões de uso de combustíveis, especialmente a transição da madeira para o carvão, provocaram preocupação com a poluição do ar urbana no passado (Brimblecombe, 2002).

No século XVII, Honoratus Fabri abordou a questão da água impura em

seu “Tratado de Ciências Físicas e Meteorológicas”, destacando vários tipos de chuva contaminada, incluindo chuva com cal avermelhada e chuva corrosiva danosa à agricultura. Posteriormente, em 1749, Hermannus Boerhaave expandiu esse estudo ao publicar um Tratado que abordava a poluição do ar, a limpeza atmosférica e a chuva ácida. Boerhaave observou detalhadamente os efeitos da chuva ácida e dos nevoeiros secos, causados também pela atividade vulcânica, ressaltando os danos significativos causados à vegetação e à saúde pública (Brimblecombe, 2002).

Entre os séculos XIII e XVIII, o uso de carvão do mar¹ e carvão vegetal aumentou na Inglaterra. O carvão foi usado não apenas em fornos de cal e forjas, mas também em fornos de vidro, fornos de tijolos, cervejarias e aquecimento doméstico. Um dos primeiros escritores sobre poluição do ar foi John Evelyn (1620-1706), que escreveu “*Fumifugium, or The Inconveniencie of the Aer and the Smoake of London Dissipated*”² em 1661. Ele explicou como a fumaça em Londres era responsável pela sujeira de igrejas, palácios, roupas, móveis, pinturas, chuva, orvalho, água e plantas. Ele culpou “Cervejeiros, Tingidores, Calheiros, Sal e Fazedores de sabão” pelos problemas (Jacobson, 2002).

2.1.2 Revolução Industrial

A Revolução Industrial, iniciada no século XVIII com o aproveitamento do vapor para energia, culminou com a criação do motor alternativo de Watt em 1784. Durante a maior parte do século XIX, o carvão foi o principal combustível para motores a vapor e turbinas. Isso resultou em sérios problemas de poluição do ar devido à fumaça e cinzas das caldeiras de usinas, locomotivas e navios, bem como lareiras domésticas e fornos (Boubel et al., 1994).

O final do século XVIII e o século XIX testemunharam uma enorme industrialização em toda a Europa. O desenvolvimento da máquina a vapor e a intensa urbanização criaram problemas muito específicos (Brimblecombe, 2002).

De acordo com Boubel et al. (1994), na Grã-Bretanha foram feitos esforços para enfrentar o problema da poluição do ar, com a nomeação de comitês parlamentares desde 1819. No entanto, muitas recomendações não foram seguidas. Em 1845, uma lei exigiu que locomotivas consumissem sua própria fumaça, e medidas semelhantes foram estendidas a outras fontes de poluição. Nos Estados Unidos, a redução da

¹ “Carvão marinho” ou “carvão do mar” são termos que geralmente se referem a depósitos de carvão encontrados abaixo do leito do oceano. Esses depósitos podem se formar quando material orgânico, como plantas e árvores, se acumulam em áreas aquáticas, como pântanos ou lagos, ao longo de milhões de anos. Com o tempo, a pressão e o calor transformam esse material em carvão. Fonte: (Jacobson, 2002)

² Tradução: “Fumifugium, ou A Inconveniência do Ar e da Fumaça de Londres Dissipada”. Literalmente, “Fumifugium” pode ser traduzido como “fuga da fumaça” em latim. É uma combinação das palavras “fumu” (fumaça) e “fugere” (fugir). Assim, “fumifugium” refere-se à ideia de evitar ou fugir da fumaça.

fumaça era uma responsabilidade municipal, e os regulamentos foram introduzidos principalmente na década de 1880, visando fontes industriais e de transporte. No final do século XIX, a poluição do ar atingiu níveis críticos em áreas industriais ao redor do mundo. Desenvolvimentos tecnológicos, como fogareiros mecânicos, purificadores de gases ácidos e sistemas de coleta de poeira, surgiram para mitigar o problema, introduzindo métodos de controle físico e químico da poluição atmosférica.

Conforme Brimblecombe (2002), na Inglaterra os administradores civis perceberam que suas leis existentes não eram suficientes para enfrentar a poluição causada pela industrialização crescente. Ao longo do século XIX, surgiram muitas leis sanitárias visando a saúde das populações urbanas, mas muitas vezes eram fracas e mal aplicadas. A pressão sobre a indústria para reduzir a poluição resultou em avanços tecnológicos, como sistemas automatizados de alimentação de caldeiras. Embora a fuligem das cidades tenha diminuído, novas fontes móveis de poluição logo surgiram.

Nas palavras de Jacobson (2002), no século XIX, a máquina a vapor foi usada não apenas na Grã-Bretanha, mas também em muitos outros países, fornecendo uma nova fonte de energia e poluição nesses países. A máquina a vapor desempenhou um grande papel em um aumento global de cem vezes na combustão de carvão entre 1800 e 1900. Indústrias centradas na combustão de carvão surgiram nos Estados Unidos, Bélgica, Alemanha, Rússia, Japão, Índia, África do Sul e Austrália, entre outras nações.

2.1.3 Período de 1900 a 1925

Segundo Boubel et al. (1994), no período de 1900 a 1925, houve significativas mudanças tecnológicas na produção e controle da poluição atmosférica. Entretanto, não houve alterações significativas na legislação, regulamentos ou atitudes públicas em relação ao problema. À medida que cidades e fábricas cresciam, a gravidade da poluição aumentava. Uma grande mudança tecnológica foi a substituição da máquina a vapor pelo motor elétrico, transferindo as emissões de fumaça e cinzas das fábricas para centrais elétricas. Houve também uma transição na queima de carvão, de queima manual para queima pulverizada, petróleo e gás, cada uma com suas próprias emissões. Locomotivas a vapor foram substituídas por locomotivas elétricas em áreas urbanas, reduzindo a poluição na fonte. A substituição do carvão pelo petróleo em diversas aplicações também reduziu as emissões de cinzas. O aumento exponencial de veículos automotores foi a mudança mais significativa desse período.

Como mencionado por Brimblecombe (2002), o século XX viu um declínio gradual no uso do carvão nas cidades da Europa e da América do Norte. Isso foi substituído por óleo, gás ou eletricidade (geralmente gerada fora da área urbana). Essas mudanças levaram ao surgimento de um novo tipo de poluição do ar — a

neblina fotoquímica. Isso ocorre quando compostos orgânicos voláteis (principalmente de combustíveis líquidos), luz solar e óxidos de nitrogênio interagem. O ozônio é o composto mais característico encontrado nessas neblinas.

2.1.4 Período de 1925 a 1950

Boubel et al. (1994) argumentam que nesse período surgiram problemas e soluções fundamentais para a poluição do ar. Episódios marcantes incluíram a poluição no Vale Meuse, na Bélgica, em 1930 (Figura 1) que resultou em 64 mortes, em Donora, Pensilvânia, em 1948 (Figura 2) 20 mortes, e em Poza Rica, México, em 1950.

Figura 1 – Recorte de Jornal “Wilmington News-Journal” de 06/12/1930: “64 vidas ceifadas por névoa venenosa na Bélgica”



Fonte: Arquivos de Wilmington News-Journal

Figura 2 – Cidade de Donora, Pensilvânia em Outubro de 1948

Fonte: Foto de Alfred Eisenstaedt/The LIFE Picture Collection/Getty Images

A fábrica de arame de Donora, mostrada na Figura 3, fazia parte de um vasto complexo de fábricas que produziam produtos como arame farpado, pregos, reforço de concreto, cádmio, ácido sulfúrico e chumbo não refinado. Em 1948, quando vapores como esses ficaram presos pela inversão climática de cinco dias, as usinas eram todas propriedade da US Steel (Gorney, 2020).

Figura 3 – Fábrica de Arame em Donora, Pensilvânia em 1910

Fonte: Gorney (2020)

A poluição atmosférica também se tornou evidente em Los Angeles na década de 1940. Os primeiros estudos em grande escala sobre poluição do ar foram realizados em locais como Salt Lake City, Utah, Nova York e Leicester, Inglaterra. Na Califórnia, a pesquisa sobre poluição do ar foi impulsionada pela criação da Fundação Técnica de Meteorologia da Poluição Atmosférica, inicialmente focada na defesa contra agentes de guerra. Houve avanços significativos na toxicologia, preparando o terreno para uma explosão científica e tecnológica no estudo da poluição atmosférica na segunda metade do século XX. Uma mudança tecnológica importante foi a construção de gasodutos de gás natural, que rapidamente substituíram carvão e petróleo como combustíveis para aquecimento doméstico em áreas onde foram instalados, resultando em uma notável melhoria na qualidade do ar. A transição para locomotivas a diesel também começou, reduzindo a necessidade de eletrificação das ferrovias. O uso de ônibus e automóveis aumentou continuamente durante esse período. Apesar desses desenvolvimentos, nenhuma legislação ou regulamentação nacional significativa sobre poluição do ar foi adotada globalmente durante esse período. No entanto, a Califórnia se destacou ao aprovar a primeira lei estadual sobre poluição do ar em 1947 (Boubel et al., 1994).

2.1.5 Período de 1950 a 1980

Tanto Theodore (2008) como Boubel et al. (1994), mencionaram o grave desastre de poluição atmosférica em Londres em 1952, conhecida como a “Grande Névoa de 1952” que matou cerca de 12.000 pessoas, levando a um reconhecimento crescente do problema, resultando na aprovação da “Lei do Ar Limpo” em 1956, no Reino Unido, com mudanças significativas nos meios de aquecimento das casas. Houve um esforço bem-sucedido para substituir o carvão por combustíveis mais limpos e sistemas de aquecimento central ou elétrico, resultando em uma redução significativa na concentração de fumaça no ar britânico.

Figura 4 – Foto da Praça Trafalgar durante a Grande Névoa de 1952 em Londres



Fonte: Polivka (2018)

O movimento ambiental moderno ganhou impulso na década de 1960, com Rachel Carson chamando a atenção para os perigos da degradação ambiental em seu livro “Primavera Silenciosa”. Isso culminou com a criação da Agência de Proteção Ambiental (EPA) em 1970 nos Estados Unidos (Theodore, 2008).

De acordo com Boubel et al. (1994), houve um crescimento significativo na atividade de pesquisa sobre poluição atmosférica tanto na Europa quanto nos Estados Unidos, com várias conferências internacionais e nacionais realizadas para discutir questões relacionadas à poluição do ar. A formação da União Internacional de Associações de Prevenção da Poluição Atmosférica (IUAPPA) em 1964 e a realização de congressos internacionais subsequentes destacaram ainda mais a importância

global do controle da poluição do ar. O interesse tecnológico durante esse período concentrou-se no controle da poluição automotiva, remoção de óxido de enxofre dos gases de combustão e dessulfurização de combustíveis, bem como no controle de óxidos de nitrogênio produzidos em processos de combustão. A meteorologia da poluição atmosférica avançou, levando ao desenvolvimento de modelos matemáticos e sistemas de monitoramento da qualidade do ar em todo o mundo.

2.1.6 Período de 1980 aos tempos atuais

Nas décadas de 1970 e 1980, ocorreu uma mudança significativa na abordagem ambiental, marcada pelo surgimento da abordagem ecológica total. Isso se refletiu na criação de departamentos ou ministérios do meio ambiente em governos de todo o mundo. Nos Estados Unidos, isso se manifestou na formação da Agência Federal de Proteção Ambiental (*Environmental Protection Agency - EPA*), além de agências estaduais e municipais encarregadas da proteção do ar, água, gestão de resíduos, controle de ruído e regulação de pesticidas (Lazarus, 2004; Walter, 2023). Essa abordagem abrangente também foi adotada pela indústria, com a responsabilidade por questões ambientais sendo centralizada em coordenadores de proteção ambiental. Mudanças semelhantes foram observadas na pesquisa e na educação, com um foco renovado em questões ambientais. Os controles de poluição foram integrados às fontes de poluição, como automóveis, usinas elétricas e fábricas, desde a fase de construção original. Pela primeira vez, houve uma atenção especial para problemas como o efeito estufa do dióxido de carbono, o esgotamento potencial da camada de ozônio por fluorocarbonetos, a poluição de longa distância, a Prevenção de Deterioração Significativa (PSD) e a deposição ácida (Boubel et al., 1994).

Na década de 1990, nos Estados Unidos, a mudança mais significativa foi a aprovação das Emendas à Lei do Ar Limpo em 05 de novembro de 1990, considerada a revisão mais abrangente e complexa desde a lei original de 1972. Essas emendas ampliaram consideravelmente o escopo e a complexidade da legislação ambiental. Nesse período, também surgiram duas crises ambientais globais amplamente reconhecidas: as mudanças climáticas globais e a destruição da camada de ozônio estratosférico (Boubel et al., 1994). As mudanças climáticas foram atribuídas tanto ao aquecimento causado pela acumulação de gases de efeito estufa quanto ao arrefecimento causado por partículas e sulfatos na atmosfera. A destruição da camada de ozônio, principalmente devido à liberação de clorofluorocarbonos (CFCs), representava uma ameaça iminente à saúde humana e ao meio ambiente. O Protocolo de Montreal, assinado em julho de 1987, foi um marco internacional que estabeleceu metas para a redução da produção de substâncias que depletam a camada de ozônio, com um prazo inicialmente estabelecido para o ano 2000, mas posteriormente antecipado para 1996 devido a descobertas alarmantes sobre os níveis de monóxido de cloro na atmosfera.

A década de 1990 foi marcada por uma crescente conscientização e preocupação com essas questões ambientais globais, culminando na Cúpula da Terra realizada no Rio de Janeiro em junho de 1992. Embora não tenha resolvido os problemas, destacou a magnitude das preocupações e divergências entre as nações em relação ao meio ambiente (Lazarus, 2004).

Boubel et al. (1994) argumentam que os futuros desafios da poluição atmosférica são impulsionados pelo aumento do uso de combustíveis fósseis e nucleares, à medida que a população global cresce. No entanto, há perspectivas de pausa parcial oferecidas por fontes de energia renovável, como solar, fotovoltaica, geotérmica, eólica, hidrogênio, biomassa e oceânica. Ainda assim, decisões ambientais críticas nas próximas décadas envolverão escolhas entre combustíveis fósseis, energia nuclear e o esgotamento das reservas para as necessidades atuais, levantando questões sobre conservação *versus* utilização. Além disso, desafios relacionados ao transporte, processamento e reciclagem de resíduos, prioridades nacionais, economia global, emprego *versus* qualidade ambiental e liberdades pessoais surgirão. Essas escolhas demandarão a participação de cidadãos bem informados e líderes visionários.

2.2 Organização Mundial da Saúde

Em abril de 1945, durante a Conferência para a criação da Organização das Nações Unidas (ONU), realizada em San Francisco (EUA), representantes do Brasil e da China propuseram a criação de uma organização internacional de saúde e a convocação de uma conferência para enquadrar sua constituição. Em 15 de fevereiro de 1946, o Conselho Econômico e Social da ONU encarregou o Secretário-Geral de convocar tal conferência. Um Comitê Técnico Preparatório reuniu-se em Paris de 18 de março a 5 de abril de 1946 e elaborou propostas para a Constituição que foram apresentadas à Conferência Internacional de Saúde em New York entre 19 de junho e 22 de julho de 1946. Com base nessas propostas, a Conferência elaborou e adotou a Constituição da Organização Mundial da Saúde (em inglês: *World Health Organization* - *WHO*), assinada em 22 de julho de 1946 por representantes de 51 membros da ONU e de 10 outras nações (WHO, 2023).

A *United Nations Conference on the Human Environment*³, conhecida como Conferência de Estocolmo, foi o primeiro encontro significativo de líderes de estado promovido pela ONU para abordar questões relacionadas à degradação ambiental. Realizada em junho de 1972 em Estocolmo, Suécia, a conferência é amplamente reconhecida como um marco nas tentativas de melhorar a relação entre a humanidade e o meio ambiente. Além disso, é creditada por inaugurar a busca pelo equilíbrio

³ United Nations Conference on the Human Environment: Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano.

entre desenvolvimento econômico e a redução da degradação ambiental, abrangendo áreas como poluição urbana e rural, desmatamento, entre outras, um conceito que posteriormente evoluiria para a noção de desenvolvimento sustentável (UNEP, 1972).

O projeto “Histórias de Saúde Global” foi estabelecido dentro da sede da OMS no final de 2004 e ampliado para os escritórios regionais a partir de 2009. Uma atividade oficial da OMS, sua missão se baseia no princípio de que a compreensão da história da saúde, especialmente durante os últimos 60 anos, ajuda a comunidade de saúde pública global a responder aos desafios atuais e ajuda a moldar um futuro mais saudável para todos, especialmente os mais necessitados (WHO, 2023; Nagtzaam & Brady, 2023).

Formando uma parte importante do projeto, os Seminários sobre Histórias de Saúde Global são organizados com parceiros da OMS em todo o mundo, na sede da OMS, nos escritórios regionais e nacionais, bem como com os estados membros da OMS e parceiros universitários. Desde 2005, os seminários têm sido generosamente apoiados pelo Wellcome Trust⁴ (WHO, 2023).

2.2.1 O papel da OMS na Saúde Pública

De acordo com WHO (2021), a OMS tenta cumprir os seus objetivos através das seguintes funções essenciais:

- i. liderança em questões críticas para a saúde e envolvimento em parcerias onde a ação comum é importante;
- ii. determinar a agenda de pesquisa e estimular a geração, difusão e utilização de conhecimentos valiosos;
- iii. estabelecimento de normas e promover e acompanhar a sua aplicação prática;
- iv. desenvolver opções políticas éticas e científicas de base;
- v. prestar apoio técnico, catalisando mudanças e capacitação institucional sustentável;
- vi. acompanhar a situação de saúde e avaliação das tendências de saúde; e
- vii. colaborar com os serviços de coleta de lixo.

⁴ O Wellcome Trust é uma instituição filantrópica de apoio à pesquisa com sede em Londres, no Reino Unido. Foi criada em 1936 com legados do magnata farmacêutico Sir Henry Wellcome com o objetivo de financiar pesquisas para melhorar a saúde humana e animal. Fonte: (Wellcome, 2024)

2.2.2 Diretrizes globais de qualidade do ar

Desde 1987, a OMS publica periodicamente diretrizes de qualidade do ar baseadas na saúde para ajudar os governos e a sociedade civil a reduzir a exposição humana à poluição do ar e seus efeitos adversos.

As diretrizes de qualidade do ar da OMS foram publicadas pela última vez em 2021 através do documento intitulado “*WHO global air quality guidelines - Particulate matter $MP_{2.5}$ and MP_{10} , ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*” (WHO et al., 2021). O documento fornece níveis de orientação baseados em saúde para os principais poluentes atmosféricos prejudiciais à saúde, incluindo material particulado (MP)⁵, ozônio (O_3), dióxido de nitrogênio (NO_2), dióxido de enxofre (SO_2) e monóxido de carbono (CO). A atualização global de 2021 tem impacto significativo nas políticas de redução da poluição em todo o mundo. Sua publicação resulta em um quadro de referência universal.

Essas diretrizes estimulam as autoridades e a sociedade civil a aumentar os esforços para controlar e estudar as exposições prejudiciais à poluição do ar (Pérez Velasco & Jarosińska, 2022; Yin et al., 2022; Khomenko et al., 2021).

2.2.3 Padrões de Qualidade do Ar

Os padrões de qualidade do ar nacionais foram estabelecidos pelo IBAMA – Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e aprovados pelo CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente, por meio da Resolução CONAMA nº 03/1990, os quais foram recentemente substituídos pela Resolução CONAMA nº 491/2018.

Quadro 4 – Padrões de Qualidade do Ar no Brasil

Poluente	Período de Referência	Padrões Intermediários			Padrão Final	
		PI-1	PI-2	PI-3	PF	
		$\mu g m^{-3}$	$\mu g m^{-3}$	$\mu g m^{-3}$	$\mu g m^{-3}$	ppm
$MP_{2.5}$	24 horas	60	50	37	25	-
	Anual	20	17	15	10	-
SO_2	24 horas	125	50	30	20	-
	Anual	40	30	20	-	-
NO_2	1 hora	260	240	220	200	-
	Anual	60	50	45	40	-
O_3	8 horas	140	130	120	100	-
CO	8 horas	-	-	-	-	9

Fonte: Adaptado de BRASIL (2018)

⁵ MP são materiais particulados, sendo o $MP_{2.5}$ (partículas com diâmetro aerodinâmico de $\leq 2,5 \mu m$) e MP_{10} (partículas com diâmetro aerodinâmico de $\leq 10 \mu m$)

A Organização Mundial da Saúde estabeleceu padrões de qualidade do ar, conforme descrito no Quadro 5, e emitiu recomendações sobre os níveis aceitáveis para seis poluentes distintos. Essas recomendações incluem metas provisórias, baseadas em evidências que relacionam cada nível de qualidade do ar a reduções no risco para a saúde associadas ao cumprimento progressivo de metas intermediárias. Para definir os níveis recomendados, foram consideradas apenas evidências que demonstram alta ou moderada certeza sobre a relação entre um determinado poluente e efeitos específicos na saúde. Todas as recomendações são classificadas como fortes, seguindo uma abordagem adaptada da Avaliação, Desenvolvimento e Avaliação de Classificação de Recomendações.

Quadro 5 – Níveis de qualidade do ar recomendados e metas provisórias

Poluente	Tempo Médio	Meta Provisória				Nível Qualidade do Ar
		1	2	3	4	
$MP_{2,5}$, $\mu g m^{-3}$	Anual	35	25	15	10	5
	24 horas	75	50	37,5	25	15
MP_{10} , $\mu g m^{-3}$	Anual	70	50	30	20	15
	24 horas	150	100	75	50	45
O_3 , $\mu g m^{-3}$	Alta temporada	100	70	-	-	60
	8 horas	160	120	-	-	100
NO_2 , $\mu g m^{-3}$	Anual	40	30	20	-	10
	24 horas	120	50	-	-	25
SO_2 , $\mu g m^{-3}$	24 horas	125	50	-	-	40
CO , $\mu g m^{-3}$	24 horas	7	-	-	-	4

Fonte: WHO (2021)

Com base na comparação das duas tabelas, pode-se considerar as seguintes observações:

- $MP_{2,5}$ (24 horas): O padrão final do Brasil ($25 \mu g m^{-3}$) é mais alto que o nível de qualidade do ar da OMS ($15 \mu g m^{-3}$). As metas provisórias do Brasil são mais altas nas etapas iniciais, mas convergem para o padrão final, que ainda é superior à recomendação final da OMS.
- $MP_{2,5}$ (Anual): O padrão final do Brasil ($10 \mu g m^{-3}$) é duas vezes maior que o nível de qualidade do ar da OMS ($5 \mu g m^{-3}$).
- SO_2 (24 horas): O padrão final do Brasil ($20 \mu g m^{-3}$) é metade do nível de qualidade do ar da OMS ($40 \mu g m^{-3}$).
- NO_2 (Anual): O padrão final do Brasil ($40 \mu g m^{-3}$) é quatro vezes maior que o nível de qualidade do ar da OMS ($10 \mu g m^{-3}$).

- v. O_3 (8 horas): Tanto Brasil quanto OMS estabelecem $100 \mu g m^{-3}$ como padrão final.
- vi. CO : O padrão final brasileiro para 8 horas é expresso em *ppm* (9 *ppm*), enquanto a OMS usa $\mu g m^{-3}$ ($10 \mu g m^{-3}$ para 24 horas).

De maneira geral, os padrões de qualidade do ar estabelecidos pelo Brasil tendem a ser mais elevados (menos rigorosos) em comparação aos níveis de qualidade do ar recomendados pela OMS. Isso sugere que as diretrizes da OMS são mais conservadoras, possivelmente refletindo uma maior preocupação com a saúde pública. As metas provisórias do Brasil indicam uma trajetória progressiva de melhoria, mas os padrões finais ainda são, em alguns casos, menos rigorosos do que os níveis de qualidade do ar recomendados pela OMS.

2.3 Química e Física da Atmosfera

A Terra é uma enorme esfera coberta de água, rocha e solo, e é cercada por uma mistura de gases. A gravidade da Terra mantém esse manto de ar – a atmosfera – no lugar. Sem gravidade, esses gases seriam levados para o espaço. O ar puro ou “limpo”, encontrado em poucos (se houver) lugares na Terra, é composto de Nitrogênio (78,1%), Oxigênio (20,9%), Argônio (0,9%) e outros componentes (0,1%). Os outros componentes incluem Dióxido de Carbono (330 ppmv), Neônio (18 ppmv), Hélio (5 ppmv), Metano (1,5 ppmv) e quantidades muito pequenas (menos de 1,0 ppmv) de outros gases. O ar também pode incluir gotículas de água, cristais de gelo e poeira, mas não são considerados parte da composição do ar. Além disso, o teor de nitrogênio e oxigênio do ar quase sempre se refere à composição do ar seco ao nível do solo (Theodore, 2008; Seinfeld & Pandis, 2006).

De acordo com Boubel et al. (1994), a atmosfera serve como meio através do qual os poluentes atmosféricos são transportados e dispersos. Enquanto estão sendo transportados, os poluentes podem sofrer reações químicas e, além da remoção por transformações químicas, podem ser removidos por processos físicos como sedimentação gravitacional, impactação e remoção por via úmida (precipitação).

Toda a energia que impulsiona a atmosfera é derivada do Sol. A energia recebida do sol é a radiação eletromagnética de energia radiante. Embora esta energia seja, em parte, fornecida à atmosfera, ela é recebida principalmente na superfície da Terra e redistribuída por vários processos (Barry & Chorley, 2010). A gravidade da Terra impede que a fina camada de gases que constituem a atmosfera escape. A combinação do aquecimento solar e da rotação da Terra causa forças de pressão interna na atmosfera, resultando em numerosos movimentos atmosféricos. A intensidade da radiação solar, a distância entre a Terra e o Sol, a massa e o diâmetro da Terra e a existência e composição da atmosfera combinam-se para tornar a Terra habitável. Não

se esperaria que esta combinação específica de condições ocorresse com frequência em todo o universo (Boubel et al., 1994).

Quando uma substância líquida ou sólida é emitida para o ar como material particulado, suas propriedades e efeitos podem ser alterados. À medida que uma substância é quebrada em partículas cada vez menores, mais de sua área de superfície é exposta ao ar. Nessas circunstâncias, a substância – qualquer que seja sua composição química – tende a se combinar física ou quimicamente com outras partículas ou gases na atmosfera. As combinações resultantes são frequentemente imprevisíveis. Partículas de aerossol muito pequenas que variam de 1,0 a 150 nm (nanômetros) podem atuar como núcleos de condensação para facilitar a condensação do vapor de água, promovendo assim a formação de neblina e névoa no solo. Partículas com menos de 2 ou 3 µm de tamanho – cerca de metade (em peso) das partículas suspensas no ar urbano – podem penetrar nas membranas mucosas e atrair e transportar substâncias químicas nocivas, como o dióxido de enxofre. Em virtude da área de superfície aumentada das pequenas partículas de aerossol, e como resultado da adsorção de moléculas de gás ou outras atividades semelhantes que são capazes de facilitar reações químicas, os aerossóis tendem a exibir uma atividade de superfície muito aumentada (Theodore, 2008).

De acordo com Seinfeld & Pandis (2006), praticamente todos os elementos da tabela periódica são encontrados na atmosfera, no entanto, ao classificar as espécies atmosféricas de acordo com a composição química, é conveniente usar um pequeno número de agrupamentos principais, como:

- i. Compostos contendo enxofre;
- ii. Compostos contendo nitrogênio;
- iii. Compostos contendo carbono; e
- iv. Compostos contendo halogênio ⁶.

Essas categorias não são exclusivas; muitos compostos contendo enxofre, por exemplo, também incluem átomos de carbono. E especialmente todos os halogênios atmosféricos envolvem um esqueleto de átomos de carbono (Seinfeld & Pandis, 2006).

Uma condição de “poluição do ar” pode ser definida como uma situação na qual substâncias resultantes de atividades antropogênicas estão presentes em condições suficientemente altas acima de seus níveis ambientais normais para produzir um efeito mensurável em humanos, animais, vegetação ou materiais. Esta definição pode incluir qualquer substância, seja nociva ou benigna; no entanto, a implicação é que os efeitos são indesejáveis (Seinfeld & Pandis, 2006).

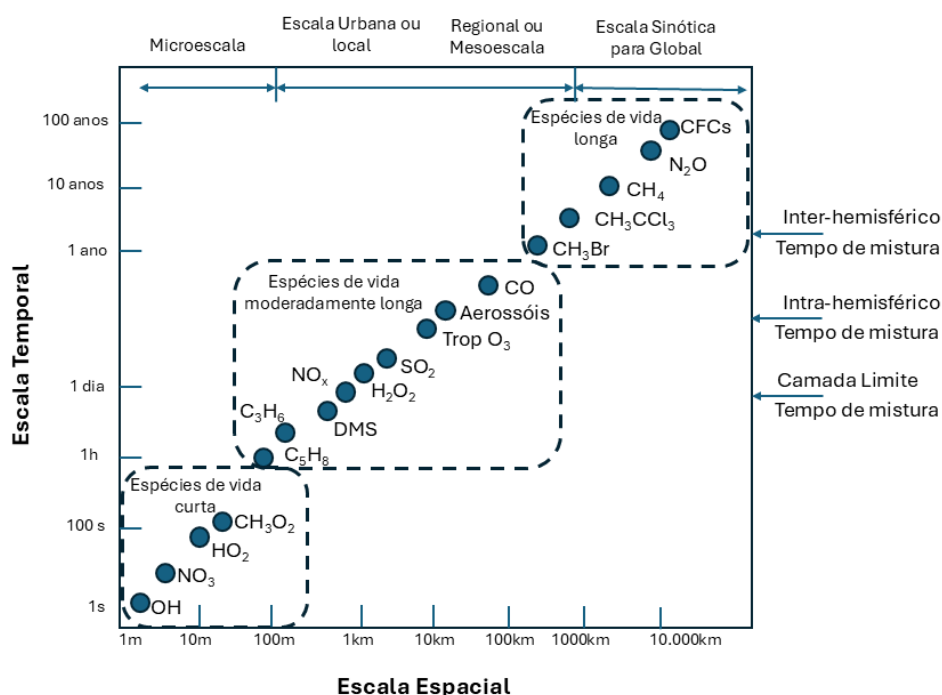
⁶ Os halogênios pertencem ao grupo 17 da tabela periódica, formado pelos seguintes elementos: Flúor (F), Cloro (Cl), Bromo (Br), Iodo (I), Astato (At) e Tenesso (Ts); este último, radioativo e pouco comum.

Os poluentes atmosféricos podem ser divididos em duas grandes categorias: fontes naturais e fontes antropogênicas (sintético) (Theodore, 2008). As fontes naturais de poluentes do ar incluem:

- i. Poeira levantada pelo vento;
- ii. Cinzas e gases vulcânicos;
- iii. Ozônio de raios e da camadas de ozônio;
- iv. Ésteres e terpenos da vegetação;
- v. Fumaça, gases e cinzas volantes de incêndios florestais;
- vi. Pólenes e outros aerolérgeos;
- vii. Gases e odores de decomposições naturais; e
- viii. Radioatividade natural.

De acordo com Boubel et al. (1994), existem dois tipos diferentes de problemas de poluição do ar nas áreas urbanas. Uma delas é a liberação de poluentes primários (aqueles liberados diretamente das fontes). Exemplos: CO, SO₂ e NO. A outra é a formação de poluentes secundários (aqueles que se formam através de reações químicas dos poluentes primários). Exemplos: O₃ e NO₂.

Nas palavras de Seinfeld & Pandis (1998) a atmosfera é um sistema dinâmico, com seus constituintes gasosos sendo continuamente trocados com a vegetação, os oceanos e os organismos biológicos. Os gases são produzidos por processos químicos dentro da própria atmosfera, pela atividade biológica, exalação vulcânica, decaimento radioativo e atividades industriais humanas (antropogênicas). Os gases são removidos da atmosfera por reações químicas na atmosfera, pela atividade biológica, por processos físicos (como formação de partículas), e por deposição e absorção pelos oceanos e pela Terra. O tempo médio de vida de uma molécula de gás introduzida na atmosfera pode variar de segundos a milhões de anos, dependendo da eficácia dos processos de remoção (Figura 5).

Figura 5 – Escala espacial e temporal de variabilidade para os constituintes atmosféricos.

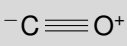
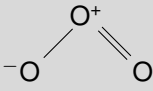
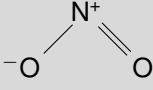
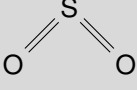
Fonte: Adaptado de Seinfeld & Pandis (1998)

De acordo com Gheleri (2003) o termo Composto Orgânico Volátil (COV) é utilizado para denominar os compostos orgânicos voláteis na atmosfera, que são quaisquer compostos que contenham carbono e hidrogênio que participem de reações fotoquímicas na atmosfera, excluindo o ácido carbônico, os carbonatos metálicos e de amônio. Os COV podem ser classificados como compostos orgânicos não metano (COVNM), na qual se incluem os compostos orgânicos com enxofre, oxigenados, halogenados e os hidrocarbonetos. Outra definição para os COV é que estes compostos estão presentes na atmosfera, como gases, mas que, em condições normais de temperatura e pressão seriam líquidos ou sólidos. Um COV é, por definição, um composto orgânico que a pressão de vapor a 20 °C é inferior a 760 torr (101,3 kPa) e superiores a 1 torr (0,13 kPa). Os COV são predominantemente emitidos na atmosfera pela frota veicular (combustão de combustíveis e perdas evaporativas) e por processos industriais, mas também são gerados por processos metabólicos de vegetais (Derwent, 1995; Seinfeld & Pandis, 1998; Gheleri, 2003; Carpenter et al., 2023).

2.3.1 Principais Poluentes Atmosféricos

O tópico apresenta as características primárias dos poluentes abordados nesta pesquisa. O Quadro 6 ilustra as propriedades físico-químicas por meio do identificador *CAS Common Chemistry*. Não foram incluídos os particulados porque eles podem se apresentar de diversas formas e composições químicas.

Quadro 6 – Características dos poluentes

Estrutura	Nome comum	Fórmula	Peso molecular (g mol ⁻¹)	Ponto de Fusão (°C)	Ponto de Ebulição (°C)	CAS
	Monóxido de carbono	CO	28,01	-205,0	-191,5	630-08-0
	Ozônio	O ₃	48,00	-192,7	-111,9	10028-15-6
	Dióxido de Nitrogênio	NO ₂	46,0055	-9,3	21,15	10102-44-0
	Dióxido de Enxofre	SO ₂	64,066	-75,5	-10,05	7446-09-5

Fonte: CAS Common Chemistry (2024) e Jacobson (2012)

2.3.1.1 Dióxido de Enxofre

Historicamente, o dióxido de enxofre (SO₂) e os particulados derivados da combustão de combustíveis fósseis têm sido os principais componentes da poluição atmosférica em muitas partes do mundo. Os problemas mais graves foram registrados em grandes áreas urbanas onde o carvão tem sido utilizado para aquecimento doméstico ou para combustão mal controlada em instalações industriais (WHO, 2021).

O SO₂ é um gás incolor que apresenta um sabor acima de 0,3 ppmv e odor forte acima de 0,5 ppmv. O SO₂ é um precursor do ácido sulfúrico H₂SO₄, um componente de partícula de aerossol que afeta a deposição ácida, clima global e a camada de ozônio global (Jacobson, 2012).

O dióxido de enxofre pode surgir de fontes que queimam carvão ou petróleo pesado, acompanhadas ou não por concentrações substanciais de particulados (WHO, 2021; Jacobson, 2012).

É derivado da combustão de combustíveis fósseis contendo enxofre e é um importante poluente atmosférico em muitas partes do mundo. A oxidação do dióxido de enxofre, especialmente na superfície das partículas na presença de catalisadores metálicos, leva à formação de ácidos sulfurosos e sulfúricos. A neutralização, pela amônia, leva para a produção de bissulfatos e sulfatos (WHO, 2021).

O dióxido de enxofre é um gás incolor facilmente solúvel em água. O ácido

sulfúrico é um ácido forte formado a partir da reação do trióxido de enxofre (SO_3) com água. O ácido sulfúrico é fortemente higroscópico. Como material puro, é um líquido incolor com ponto de ebulição de 330 °C. O bissulfato de amônio (NH_4HSO_4), que também é um ácido forte, mas menos ácido que o ácido sulfúrico como material puro, é um sólido cristalino com ponto de fusão de 147 °C. A formação de gotículas muito pequenas de ácido sulfúrico ocorre por nucleação. Muitos vapores são capazes de condensar na superfície de núcleos muito finos existentes e levar ao crescimento de partículas compostas (WHO, 2021).

Conforme WHO (2021), os fatores de conversão são:

- a 20 °C e 1013 hPa, 1 ppm = 2660 $\mu g m^{-3}$ e 1 $mg m^{-3}$ = 0,3759 ppm.

O dióxido de enxofre (SO_2) possui um cheiro forte e irritante. Ele é formado a partir da queima de combustíveis fósseis contendo enxofre, como carvão e petróleo, e é um subproduto comum de muitos processos industriais (Lenzi & Favero, 2011).

O SO_2 é um poluente atmosférico que pode causar problemas de saúde respiratória em humanos e animais quando em altas concentrações. Ele reage com a umidade na atmosfera para formar ácido sulfúrico (H_2SO_4), que é um dos componentes do fenômeno conhecido como chuva ácida (WHO, 2021).

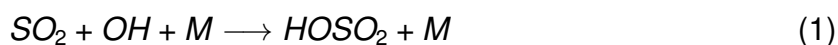
Espécies reativas são dióxido de enxofre (SO_2) e enxofre reduzido (H_2S , DMS). O enxofre atmosférico é quase inteiramente antropogênico na origem: 90% de combustão da queima de carvão e petróleo, e grande parte do restante da fundição de cobre. As principais fontes são o dióxido de enxofre (80–100 $\times 10^9$ kg S/ano), sulfeto de hidrogênio (H_2S) (20–40 $\times 10^9$ g S/ano) e sulfeto de dimetila (DMS) (35–55 $\times 10^9$ kg S/ano). O DMS é produzido principalmente por produtividade biológica perto da superfície do oceano. As emissões de SO_2 aumentaram cerca de 50% entre 1940 e 1980, mas diminuiu na década de 1990. A China é a maior fonte de emissões embora os EUA tenham o maior rendimento por contribuição per capita. Liberações de atividade vulcânica aproximadamente 109 kg S/ano como dióxido de enxofre. A vida útil do SO_2 e do H_2S na atmosfera é apenas cerca de um dia, na atmosfera o enxofre ocorre principalmente como enxofre carbonílico (COS), que tem uma vida útil de cerca de um ano. A conversão do gás H_2S em partículas de enxofre é uma importante fonte de aerossóis atmosféricos. Apesar da sua curta vida útil, o dióxido de enxofre é facilmente transportado por longas distâncias. É removido da atmosfera quando a condensação núcleos de SO_2 são precipitados como chuva ácida contendo ácido sulfúrico (H_2SO_4). A acidez da deposição de nevoeiro pode ser mais grave porque até 90% das gotículas de neblina poderão ser depositados (Barry & Chorley, 2010).

O dióxido de enxofre é eventualmente oxidado na atmosfera para formar compostos de sulfato. O processo de oxidação inclui vias homogêneas e heterogêneas. Os radicais livres produzidos a partir da degradação de hidrocarbonetos podem reagir

e reagem com o SO , na fase gasosa. Tanto OH quanto HO_2 oxidam SO_2 em intermediários reativos como HSO e SO . Esses intermediários combinam-se rapidamente com o vapor de água na atmosfera para formar o aerossol de ácido sulfúrico. Este tipo de processo depende das condições atmosféricas. Nas áreas urbanas com problemas de *smog* fotoquímico existentes, a oxidação homogênea do SO_2 pelos radicais livres é provavelmente dominante durante o dia (Boubel et al., 1994).

De acordo com Finlayson-Pitts & James N. Pitts (2000), do ponto de vista termodinâmico, o dióxido de enxofre tem uma forte tendência a reagir com o oxigênio do ar, conforme demonstrado nas Equações seguintes:

O SO_2 reagindo com o radical hidroxila (OH) conforme Equação 1.



Sendo M o catalisador. Aqui, o radical OH (hidroxila) reage com o dióxido de enxofre (SO_2) para formar $HOSO_2$.

Na sequência o $HOSO_2$ reage com oxigênio conforme Equação 2.



O $HOSO_2$ reage com o oxigênio (O_2) e o catalisador M para produzir HOO e trióxido de enxofre (SO_3).

Em seguida ocorre a formação do ácido sulfúrico conforme Equação 3.

O trióxido de enxofre (SO_3) reage com água (H_2O) para formar ácido sulfúrico.



A sequência descrita se alinha com a cinética e a termodinâmica dessas reações, onde a formação de intermediários como o $HOSO_2$ e o SO_3 facilita a transformação do SO_2 em ácido sulfúrico. Em atmosferas com altas concentrações de SO_2 , como nas proximidades de fontes industriais, essas reações contribuem significativamente para a poluição ácida (Seinfeld & Pandis, 2006).

2.3.1.2 Monóxido de Carbono

De acordo com Seinfeld & Pandis (1998) o Monóxido de Carbono (CO) é o mais simples dos poluentes atmosféricos.

É um gás incolor, inodoro e altamente tóxico que é produzido pela queima incompleta de materiais contendo carbono, como combustíveis fósseis (como gás natural, carvão e petróleo), madeira, plásticos e outros materiais orgânicos (Lenzi & Favero, 2011; WHO, 2021; Finlayson-Pitts & James N. Pitts, 2000).

O CO é um intermediário geral na oxidação de COV em CO_2 . É emitido diretamente pela combustão incompleta, com emissões particularmente grandes de fogos abertos onde o processo de combustão é descontrolado e ineficiente (Brasseur & Jacob, 2017). O CO tem uma vida média de dois meses contra a oxidação pela hidroxila (OH), seu principal sumidouro (Brasseur & Jacob, 2017; Seinfeld & Pandis, 1998).

O peso molecular do CO é semelhante ao do ar que é 29 g mol^{-1} . Mistura-se livremente com o ar em qualquer proporção e move-se com o ar através do transporte a granel. É combustível, pode servir como fonte de combustível e pode formar misturas explosivas com o ar. Reage vigorosamente com oxigênio, acetileno, cloro, flúor e óxido nitroso. O CO não é detectável por humanos, seja pela visão, paladar ou olfato. É apenas ligeiramente solúvel em água, soro sanguíneo e plasma; no corpo humano, reage com a hemoglobina para formar a carboxiemoglobina ($COHb$) (WHO, 2021).

O monóxido de carbono (CO) é um gás de relevância tanto ambiental quanto de saúde pública, pois participa da química atmosférica e contribui para a poluição. As principais fontes antropogênicas de CO incluem processos de combustão, como aqueles relacionados à geração de energia, aquecimento, transporte veicular e queima de biomassa, além da oxidação de metano e compostos orgânicos voláteis (COVs). Já suas fontes naturais incluem atividades vulcânicas, descargas elétricas e emissões de gás natural (Rozante et al., 2017).

Na troposfera, o CO é oxidado pelo radical hidroxila (OH), que reage com metano (CH_4), hidrocarbonetos (HC), alcenos e isopreno, além de compostos terpenos, formando intermediários importantes na química atmosférica. O principal sumidouro de CO é sua reação com OH , enquanto a deposição seca e o fluxo estratosférico são considerados sumidouros menores.

As reações de oxidação do monóxido de carbono ocorrem conforme as Equações 4 e 5 (Rozante et al., 2017).





Na Equação 4, o radical OH oxida o CO , produzindo dióxido de carbono (CO_2) e hidrogênio (H). O hidrogênio então reage com oxigênio molecular (O_2) e um terceiro corpo M (catalisador), formando o radical hidroperoxila (HO_2) conforme Equação 5.

A oxidação do metano (por OH) é uma fonte importante de CO , assim como processos tecnológicos (combustão e processos industriais), queima de biomassa e oxidação de hidrocarbonetos não metano. As incertezas em cada uma dessas fontes estimadas são grandes. Estima-se que cerca de dois terços do CO provenham de atividades antropogênicas, incluindo a oxidação de metano derivado antropogenicamente (Seinfeld & Pandis, 1998).

De acordo com Brasseur & Jacob (2017), as concentrações são mais altas nas regiões tropicais durante a estação de queimadas e também são relativamente altas sobre os continentes de latitude média do Norte. A vida útil do CO é suficientemente longa para permitir o transporte em escalas intercontinentais, tornando o CO um rastreador útil para transporte de longo alcance de plumas de combustão.

As razões de mistura do CO na troposfera variam de 40 a 200 ppb. Medidas indicam que há mais CO no Hemisfério Norte do que no Hemisfério Sul; os valores máximos são encontrados próximo à superfície nas latitudes médias do Norte. Em geral, a razão de mistura do CO diminui com a altitude no Hemisfério Norte, para um valor médio na troposfera livre de cerca de 120 ppb perto de $45^\circ N$. No Hemisfério Sul, o CO tende a ser mais uniformemente misturado verticalmente, com uma razão de mistura de cerca de 60 ppb perto de $45^\circ S$. Variações sazonais foram estabelecidas em cerca de $\pm 40\%$ em relação à média no Hemisfério Norte e $\pm 20\%$ em relação à média no Hemisfério Sul (Seinfeld & Pandis, 1998).

2.3.1.3 Material Particulado

O Material Particulado (MP) Corresponde a mistura de partículas sólidas e líquidas presentes no ar, pequenas o suficiente para não se depositarem na superfície da Terra sob a influência da gravidade, classificadas pelo diâmetro aerodinâmico: menores ou iguais a $2,5 \mu m$ ($MP_{2,5}$) ou $10 \mu m$ (MP_{10}) (WHO, 2021; Theodore, 2008).

Estudos sobre os efeitos da exposição crônica à poluição do ar identificaram o material particulado fino como o principal fator nos efeitos de encurtamento da vida do ar poluído (Brasseur & Jacob, 2017).

O MP em ambientes urbanos e não urbanos é uma mistura complexa com componentes de diversas características químicas e físicas. A investigação sobre MP e

a interpretação dos resultados da investigação sobre exposição e risco são complicadas pela heterogeneidade e pela possibilidade do potencial das partículas causarem lesões variar com o tamanho e outras características físicas, composição química e fonte(s). Diferentes características do *MP* podem ser relevantes para diferentes efeitos na saúde. Os resultados de pesquisas mais recentes continuam a destacar esta complexidade e a natureza dinâmica dos *MPs* transportados pelo ar, uma vez que são formadas primária ou secundariamente e então continua a sofrer transformações químicas e físicas na atmosfera (WHO, 2021; Mendonça & Danni-Oliveira, 2007).

De acordo com Finlayson-Pitts & James N. Pitts (2000), as partículas, ou *MPs* podem ser sólidos ou líquidos, com diâmetros entre 0,002 e 100 μm . A extremidade inferior da faixa de tamanho não está claramente definida porque não existe um critério aceito pelo qual um aglomerado de moléculas se torna uma partícula. A extremidade superior corresponde ao tamanho de garoa fina ou areia muito fina; essas partículas são tão grandes que caem rapidamente da atmosfera e, portanto, não permanecem suspensas por períodos significativos de tempo. Existem, é claro, partículas maiores produzidas na atmosfera (por exemplo, gotas de chuva, ~1 mm, e granizo, ~1-20 mm), mas sua rápida precipitação impede, para todos os efeitos práticos, a sua inclusão na definição de partículas atmosféricas. As partículas mais importantes em relação a química e física atmosférica estão na faixa de 0,002 e 10 μm .

Aerossóis são suspensões estáveis de partículas sólidas ou líquidas em um gás. Podem ser partículas emitidas diretamente ou formadas por reações químicas na atmosfera. São classificadas em primárias (emitidas diretamente) e secundárias (formadas por reações). Suas propriedades, como tamanho, massa e composição, são importantes para entender seu papel na saúde, visibilidade e clima. Embora muitas partículas sejam irregulares, seu tamanho é expresso em diâmetros equivalentes. (Finlayson-Pitts & James N. Pitts, 2000).

De acordo com Brimblecombe (2002), o material particulado primário, incluindo emissões antropogênicas (especialmente significativas no contexto atual), é emitido diretamente para a atmosfera a partir de uma fonte. As principais fontes de material particulado primário são:

- i. Veículos a gasolina e a diesel, sendo este último a fonte da maioria da fumaça preta;
- ii. Emissões controladas de chaminés; e
- iii. Emissões fugitivas. Estas são diversas e não controladas, e incluem a ressuspensão de solo pelo vento e perturbação mecânica; a ressuspensão de poeira superficial de estradas e superfícies urbanas pelo vento, movimentos de veículos e outras perturbações locais do ar; e emissões de atividades como exploração de pedreiras, construção de estradas e

edifícios, e o carregamento e descarregamento de materiais poeirentos.

Ainda nas palavras de Brimblecombe (2002), partículas secundárias resultam da reação de dois gases ou vapores, formando uma substância que se condensa sobre um núcleo. As principais fontes são a oxidação atmosférica de gotículas de dióxido de enxofre para ácido sulfúrico e a oxidação de vapor de dióxido de nitrogênio para ácido nítrico. O vapor de ácido clorídrico (incineração de resíduos e combustão de carvão são fontes principais) também está presente na atmosfera, e tanto este quanto o vapor de ácido nítrico reagem reversivelmente com amônia (em grande parte associada a fontes agrícolas) para formar sais de amônio. O ácido sulfúrico reage de forma irreversível em duas etapas para formar tanto sulfato de hidrogênio de amônio quanto sulfato de amônio. Tais sais de amônio são formados continuamente pela oxidação de dióxido de enxofre e de nitrogênio, sempre que houver amônia suficiente para neutralização. Eles são, portanto, parte de um fenômeno de poluição em larga escala que afeta tanto áreas urbanas quanto rurais. A maioria das partículas na atmosfera do Reino Unido na faixa de acumulação consiste de sais de amônio.

Theodore (2008) utilizou várias definições para partículas: uma pequena massa discreta de matéria sólida ou líquida; uma partícula líquida fina ou sólida encontrada no ar ou nas emissões; qualquer matéria sólida ou líquida dispersa em um gás; ou, matéria sólida insolúvel dispersa em um líquido para produzir uma mistura heterogênea.

Partículas podem ser classificadas em duas categorias principais: (1) naturais e (2) antropogênicas (produzidas ou sintéticas). As fontes naturais incluem (mas não se limitam a):

- i. Poeira levantada pelo vento;
- ii. Cinzas vulcânicas e gases;
- iii. Fumaça e cinzas de incêndios florestais; e
- iv. Pólen e outros alérgenos aerotransportados.

Conforme Theodore (2008), quando uma substância líquida ou sólida é emitida para o ar como matéria particulada, suas propriedades e efeitos podem ser alterados. À medida que uma substância é fragmentada em partículas cada vez menores, mais área de superfície é exposta ao ar. Nessas circunstâncias, a substância - independentemente de sua composição química - tende a combinar fisicamente ou quimicamente com outras partículas ou gases na atmosfera. As combinações resultantes são frequentemente imprevisíveis. Partículas de aerossol muito pequenas (medindo de 0,001 a 0,1 μm , ou 1 a 100 nm) podem atuar como núcleos de condensação para facilitar a condensação do vapor d'água, promovendo assim a formação de nevoeiro e névoa no solo. Partículas com menos de 2 ou 3 mm de tamanho - cerca da metade

(em peso) das partículas suspensas no ar urbano - podem penetrar no muco, atrair e transportar produtos químicos prejudiciais, como dióxido de enxofre. Devido à maior área de superfície das pequenas partículas de aerossol e como resultado da adsorção de moléculas de gás ou outras propriedades capazes de facilitar reações químicas, os aerossóis tendem a exibir uma atividade de superfície muito maior.

De acordo com Seinfeld & Pandis (1998), uma vez que as partículas estão na atmosfera, seu tamanho, número e composição química são alterados por vários mecanismos até que, em última instância, sejam removidas por processos naturais. Alguns dos processos físicos e químicos que afetam o “envelhecimento” das partículas atmosféricas são mais eficazes em um regime de tamanho de partícula do que em outro. Apesar dos processos específicos que afetam o envelhecimento das partículas, o tempo de residência usual das partículas na baixa atmosfera não excede algumas semanas. Muito próximo ao solo, os principais mecanismos de remoção de partículas são a sedimentação e a deposição seca em superfícies; enquanto em altitudes acima de cerca de 100 metros, a limpeza por precipitação é o mecanismo predominante de remoção.

Os aerossóis na atmosfera têm vários efeitos ambientais importantes. Eles representam um risco à saúde respiratória em concentrações elevadas encontradas em ambientes urbanos. Eles dispersam e absorvem radiação visível, limitando a visibilidade. Eles afetam o clima da Terra tanto diretamente (por dispersão e absorção de radiação) quanto indiretamente (ao servirem como núcleos para a formação de nuvens). Eles fornecem locais para a química de superfície e a química em fase condensada ocorrerem na atmosfera (Jacob, 1999).

2.3.1.4 Ozônio

Conforme Seinfeld & Pandis (1998), o ozônio troposférico é considerado um poluente do ar, pois causa efeitos respiratórios em humanos e prejudica o crescimento das plantas. Parte do ozônio é transportada para a superfície da Terra a partir de seu reservatório natural na estratosfera, mas é produzida em quantidades muito maiores pela fotoquímica troposférica envolvendo compostos orgânicos voláteis e óxidos de nitrogênio, que têm fontes naturais como vegetação, incêndios florestais e raios, e fontes antropogênicas como a combustão de combustíveis fósseis e a queima de biomassa causada pelo homem.

O ozônio emergiu como um poluente do ar em Los Angeles nas décadas de 1940 e 1950, onde em algumas ocasiões os níveis de ozônio excediam 600 ppb em média de 1 hora e 300 ppb em média de 8 horas. A maioria dos países possui um padrão baseado em saúde para os níveis de ozônio. O ozônio pode ser transportado a grandes distâncias, de modo que seu nível em uma localização específica é a soma do

ozônio produzido localmente e o transportado de fontes de vento favorável. O ozônio transportado para uma área de fontes de vento favorável é o nível de ozônio na ausência de quaisquer fontes locais (Seinfeld & Pandis, 1998).

O Ozônio (O_3) é um poluente atmosférico em níveis baixos na troposfera, a camada mais baixa da atmosfera. O ozônio troposférico é um dos principais componentes do *smog* fotoquímico, um problema ambiental comum em muitas áreas urbanas. O ozônio é formado na troposfera quando os gases poluentes emitidos por veículos, fábricas e outras fontes reagem com a luz solar (Lenzi & Favero, 2011).

Um grande problema de muitas grandes áreas metropolitanas é a formação de ozônio a partir de reações fotoquímicas de óxidos de nitrogênio e várias espécies de hidrocarbonetos. Essas reações são catalisadas pela luz ultravioleta do Sol e, portanto, são chamadas de reações fotoquímicas (Boubel et al., 1994).

O ozônio e outros oxidantes fotoquímicos são poluentes que não são emitidos diretamente por fontes primárias. Em vez disso, eles abrangem um grupo de moléculas químicas formadas por meio de uma série de reações complexas na atmosfera impulsionadas pela energia transferida para as moléculas de dióxido de nitrogênio (NO_2) quando absorvem a luz da radiação solar. Os precursores que mais contribuem para a formação de espécies oxidantes em atmosferas poluídas são o dióxido de nitrogênio e os compostos orgânicos voláteis (COV) não metânicos, especialmente os insaturados. O metano é muito menos reativo do que os outros COV, mas está presente em concentrações muito mais altas, tendo aumentado em concentração nos últimos 100 anos devido ao seu uso crescente como combustível, e é liberado de campos de arroz e criação de gado. A fotoquímica envolvendo o metano é responsável por grande parte do aumento do ozônio sobre os oceanos e áreas terrestres remotas, de cerca de $30 \mu g m^{-3}$ para cerca de $75 \mu g m^{-3}$ (WHO, 2021).

2.3.1.5 Óxidos de Nitrogênio

Os óxidos de nitrogênio (NO_x) são compostos químicos formados a partir da combinação de Nitrogênio e Oxigênio. Os principais óxidos de nitrogênio são o óxido nítrico (NO), o dióxido de nitrogênio (NO_2) e o trióxido de dinitrogênio (N_2O_3), embora existam outros compostos menos comuns, como o tetraóxido de dinitrogênio (N_2O_4) e o pentóxido de dinitrogênio (N_2O_5) (Lenzi & Favero, 2011).

As espécies reativas de nitrogênio são o NO e o NO_2 . O NO_x refere-se a essas e outras espécies de nitrogênio ímpares com oxigênio. Sua significância primária é como um catalisador para a formação de ozônio troposférico. A queima de combustíveis fósseis (aproximadamente 40% para transporte e 60% para outros usos de energia) é a principal fonte de NO_x (principalmente NO). A queima de biomassa e a atividade de raios são outras fontes importantes. As emissões de NO_x aumentaram

cerca de 200% entre 1940 e 1980. A fonte total de NO_x é cerca de 40×10^9 kg de nitrogênio por ano. Cerca de 25% disso entra na estratosfera, onde sofre dissociação fotoquímica. O nitrogênio ímpar também é liberado como NH_x pela oxidação de amônia em fertilizantes e por animais domésticos (Barry & Chorley, 2010).

De acordo com WHO (2021) existem muitas espécies químicas de NO_x , mas a espécie poluente do ar de maior interesse do ponto de vista da saúde humana é o NO_2 . O NO_2 é um gás marrom avermelhado com um odor pungente característico. O NO produz espontaneamente o NO_2 quando exposto ao ar. O gás NO_2 é um oxidante forte e reage com a água para produzir ácido nítrico e óxido nítrico.

O NO_2 está sujeito a extensas transformações atmosféricas que levam à formação de oxidantes fortes que participam da conversão de NO_2 em HNO_3 e SO_2 em H_2SO_4 e subsequentes conversões em seus sais de neutralização de amônia. Assim, através da sequência de reações fotoquímicas iniciadas pela ativação do NO_2 induzida pela radiação solar, os novos poluentes gerados são uma importante fonte de partículas orgânicas de nitrato e sulfato atualmente medidas como MP_{10} ou $MP_{2,5}$. Por essas razões, o NO_2 é um precursor chave de uma série de poluentes secundários cujos efeitos na saúde humana estão bem documentados (WHO, 2021).

Fatores de conversão: a $20^\circ C$ e $1013 hPa$, $1 ppm = 1,914 mg m^{-3} = 0,523 ppm$ (WHO, 2021).

A química atmosférica dos NO_x é consideravelmente mais complexa do que a do SO_2 . O NO é o principal óxido formado durante a combustão de alta temperatura de combustíveis. O NO_2 é formado na atmosfera pela oxidação do NO (Brimblecombe, 2002).

Conforme Brasseur & Jacob (2017), os radicais de NO_x ($NO_x = NO + NO_2$) são de importância central para a química atmosférica. Eles são emitidos para a troposfera por combustão, raios e processos microbianos nos solos. A maior fonte é a combustão. Um combustor típico mistura combustível e ar a temperaturas de chama muito altas (cerca de $1700^\circ C$). Nessas temperaturas, o O_2 do ar se dissocia termicamente em átomos de oxigênio, que reagem com o NO_2 do ar para conduzir um ciclo catalítico para a formação de NO conhecido como “Mecanismo de Zel’dovich” conforme as Equações 6 e 7.

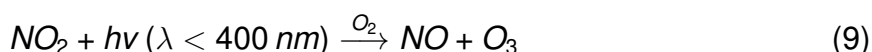


O NO_x gerado desta maneira é denominado NO_x térmico. O mecanismo Zel'dovich não é eficiente em baixas temperaturas de chama, como em fogos abertos, mas a produção de NO ainda ocorre nesses casos pela oxidação do nitrogênio presente no combustível.

O sumidouro dominante para o NO tanto na troposfera quanto na estratosfera é a reação com o ozônio para formar NO_2 (Equação 8).



Durante o dia, o NO_2 é fotolizado em uma escala de tempo de cerca de um minuto para retornar ao NO (Equação 9)⁷.



Essa equação explica uma importante fonte de ozônio troposférico.

2.4 Princípios de Meteorologia da Poluição do Ar

2.4.1 Atmosfera

O termo Atmosfera refere-se à cobertura gasosa da Terra e participa do movimento da Terra. A Terra está girando em torno de seu eixo com uma velocidade constante. A atmosfera também está girando junto com a Terra e tende a se mover em direção ao espaço vazio devido ao movimento centrífugo. Esta é a razão pela qual a atmosfera acima do equador é mais alta em comparação com a atmosfera acima dos polos (Lazaridis, 2011).

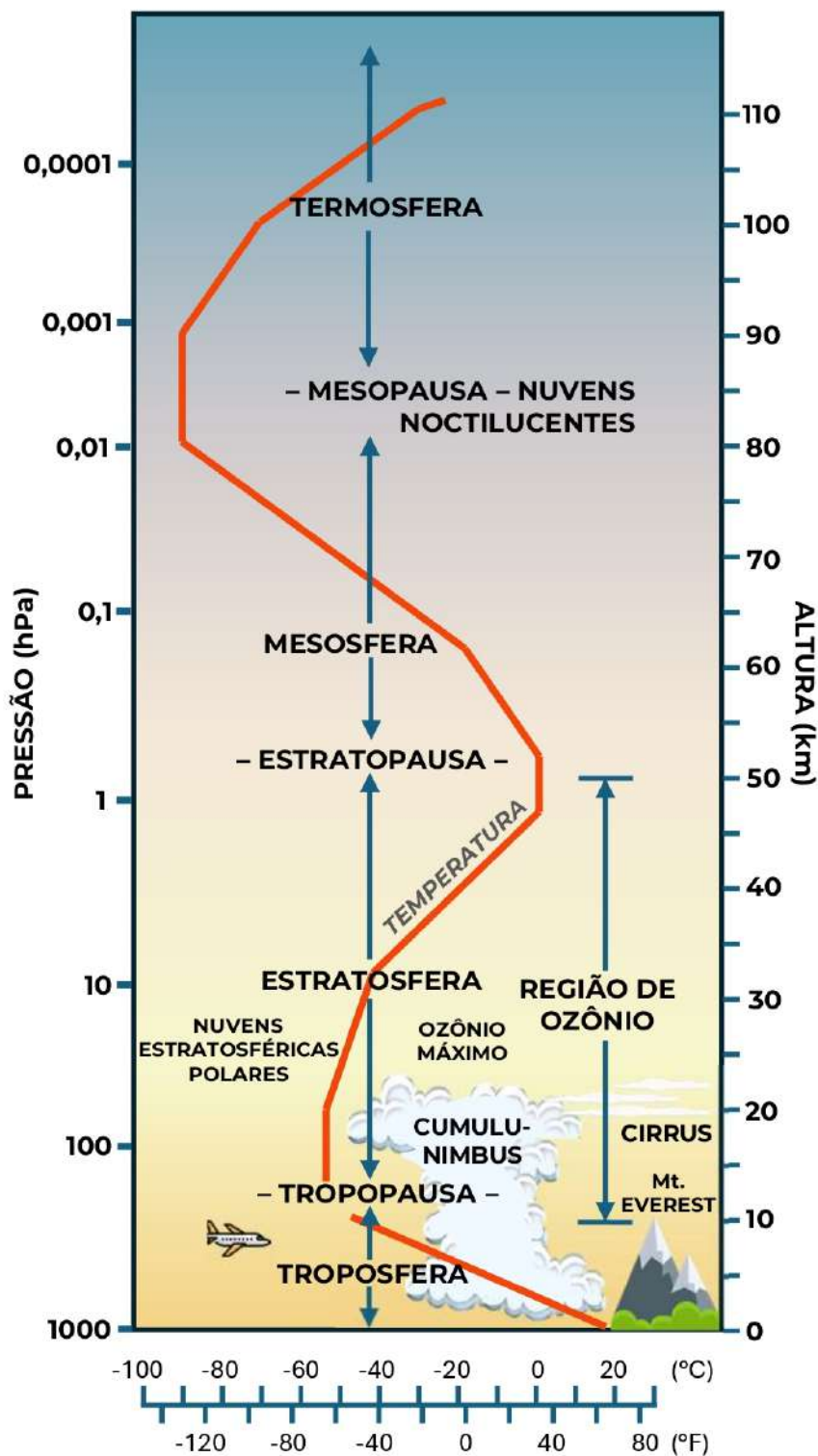
A atmosfera é invisível, inodora e possui várias propriedades que favorecem a sobrevivência de plantas e organismos vivos no planeta. A atmosfera contém uma grande quantidade de ar que permanece próxima à superfície da Terra devido à força da gravidade (Ayoade, 1998; Lazaridis, 2011).

De acordo com Seinfeld & Pandis (1998), em termos gerais, a atmosfera é dividida em regiões inferior e superior. A atmosfera inferior é geralmente considerada como se estendendo até o topo da estratosfera, a uma altitude de cerca de 50 km. O estudo da atmosfera inferior é conhecido como meteorologia; o estudo da atmosfera superior é chamado de aeronomia. A atmosfera da Terra é caracterizada por variações

⁷ A relação $h\nu$ descreve a energia do fóton que é absorvido pelo NO_2 , para que a reação ocorra. O comprimento de onda da luz, λ , é dado como menor que 400 nm (nanômetros), indicando que a luz é ultravioleta. Fonte: (Brasseur & Jacob, 2017)

de temperatura e pressão com a altura. A variação do perfil médio de temperatura com a altitude é a base para distinguir as camadas da atmosfera (Figura 6).

Figura 6 – Camadas da Atmosfera



Fonte: Adaptado de Barry & Chorley (2010)

A distribuição vertical generalizada de temperatura e pressão até cerca de

110 km. Destaque para a tropopausa e a zona de concentração máxima de ozônio possuem a camada quente acima. As altitudes típicas das nuvens estratosféricas polares e das nuvens noctilucentes são indicadas (Barry & Chorley, 2010).

A troposfera é a região da atmosfera da Terra para a qual compostos químicos são geralmente emitidos como resultado das atividades humanas (sendo uma exceção os gases de escape dos transportes supersônicos). A troposfera é um “processador” químico que resulta na degradação parcial ou completa de quase todos os compostos orgânicos emitidos na atmosfera, com exceção dos clorofluorocarbonetos (CFCs) e vários dos bromoclorofluorocarbonetos (halogênios). Os CFCs e halogênios são, portanto, transportados para a estratosfera e são fotolizados pela radiação ultravioleta de comprimento de onda curto à medida que sobem através da camada de ozônio estratosférico, produzindo átomos de cloro e bromo, os quais levam à depleção do ozônio estratosférico por meio dos ciclos catalíticos (Derwent, 1995).

Nas palavras de Jacobson (2002), as concentrações de gases e partículas de aerossol no ar são afetadas por ventos, temperaturas, perfis de temperatura, nuvens e umidade relativa. Esses elementos meteorológicos são influenciados por sistemas meteorológicos de grande e pequena escala. Grande escala, os sistemas climáticos são controlados por vastas regiões de alta e baixa pressão, enquanto sistemas meteorológicos de pequena escala são controlados pela temperatura do solo, umidade do solo e variações de pressão em pequena escala.

2.4.2 Camada Limite Planetária

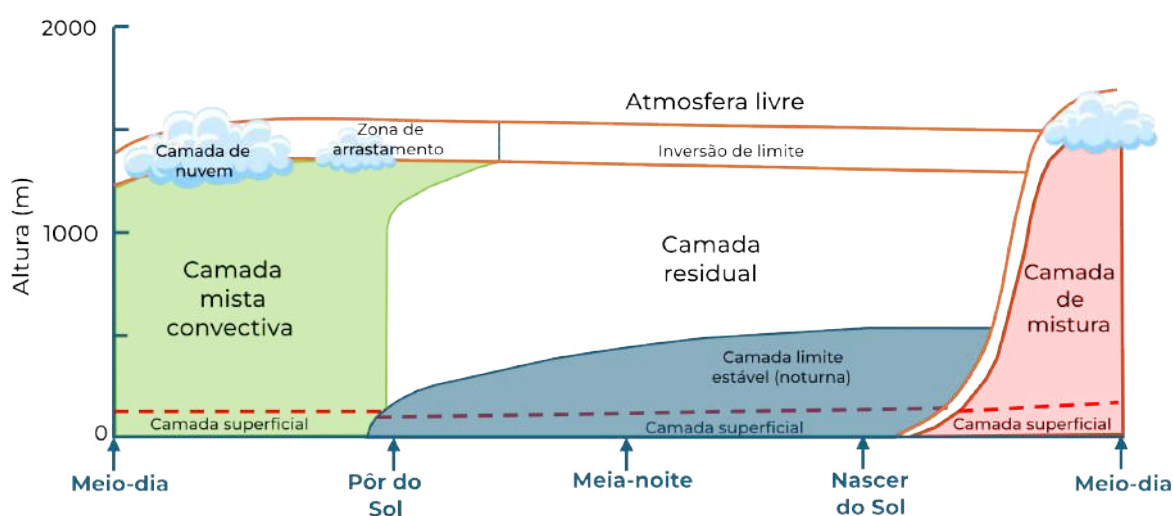
A Camada Limite Planetária (CLP) é a camada da atmosfera e subcamada da troposfera que interage com superfície em uma escala de tempo de um dia ou menos. Geralmente se estende de 1 a 3 km acima da superfície. O ar acima da CLP é chamado de troposfera livre. A troposfera livre tem um movimento geral de afundamento lento, equilibrando os poucos locais onde a convecção profunda ou elevação frontal injeta ar da CLP em grandes altitudes (Brasseur & Jacob, 2017).

De acordo com Schnelle (2003), a superfície da Terra exerce uma resistência sobre a atmosfera que resulta em um fluxo de ar semelhante ao que ocorre ao redor de uma esfera em um túnel de vento. Essa resistência influencia a velocidade do vento e a mistura de substâncias transportadas pela atmosfera até uma altura de até 2 km. Durante o dia, essa região é tipicamente turbulenta. À noite, com ventos fracos, a espessura da camada turbulenta pode ser tão baixa quanto algumas dezenas de metros. A CLP é uma região na qual a atmosfera experimenta efeitos da superfície através da troca vertical de momento, calor e massa na forma de umidade. A espessura da CLP é caracterizada pela espessura da região turbulenta próxima ao solo. Como as propriedades atmosféricas são bem misturadas pela turbulência dentro da camada, ela

é às vezes chamada de profundidade de mistura.

O aquecimento por compressão do ar em descida produz uma inversão de subsidência⁸ semi-permanente que encapsula a CLP e restringe acentuadamente a mistura entre a CLP e a troposfera livre. A dinâmica da CLP desempenha um papel importante na determinação do destino dos produtos químicos emitidos na superfície e das concentrações resultantes no ar superficial. A mistura vertical impulsionada pelo aquecimento solar da superfície pode gerar grandes ciclos diurnos de concentrações dentro da CLP (Figura 7). A ventilação da CLP para a troposfera livre é crucial para a dispersão global de produtos químicos. A mistura vertical dentro da CLP é impulsionada por redemoinhos turbulentos. Esses redemoinhos são gerados na superfície pela ação do vento em elementos de superfície ásperos (turbulência mecânica) e pela flutuabilidade (turbulência de flutuabilidade). Sobre a Terra, o aquecimento sensível da superfície durante o dia gera plumas flutuantes que podem se elevar até a base da inversão de subsidência. Por outro lado, o resfriamento noturno da superfície terrestre produz condições estáveis que amortecem a turbulência mecânica. (Brasseur & Jacob, 2017).

Figura 7 – Variação diurna da camada limite planetária em condições de tempo bom



Fonte: Adaptado de Lazaridis (2011)

Sobre os oceanos, a grande capacidade térmica do oceano minimiza esse ciclo diurno de aquecimento e resfriamento, e a variação da CLP é menos pronunciada comparativamente a regiões continentais. Há a evolução diurna da estrutura da CLP sobre a terra. Durante a noite, a turbulência mecânica geralmente mantém uma camada superficial rasa e bem misturada, tipicamente com 10-100 metros de profundidade, chamada de camada superficial. Acima dessa altitude, a atmosfera é estável devido ao

⁸ Subsidência: movimentos descendentes.

resfriamento da superfície; esta é a camada residual. Após o nascer do Sol, o aquecimento da superfície erode a camada residual estável de baixo para cima, produzindo uma camada mista instável que cresce ao longo da manhã até atingir eventualmente a profundidade total da CLP. Nuvens podem se desenvolver na parte superior; estas são as conhecidas *cumulus de bom tempo* e a camada correspondente é chamada de camada de nuvens convectivas. Essa camada tende a ter uma estabilidade moderada devido à liberação de calor latente da condensação das nuvens, resultando em alguma separação da camada mista. A profundidade da camada mista é chamada de profundidade de mistura. A supressão do aquecimento da superfície ao pôr do sol causa o rápido colapso da camada mista e as condições noturnas retornam (Brasseur & Jacob, 2017).

A variação diurna da estrutura da CLP tem importantes implicações para a evolução diurna das concentrações químicas no ar superficial. Um produto químico inerte continuamente emitido na superfície se acumulará no ar superficial ao longo da noite, levando a altas concentrações. Durante a manhã, a concentração diminuirá à medida que o crescimento da camada mista causa diluição. Por outro lado, um produto químico originário da troposfera livre e removido por deposição na superfície será esgotado no ar superficial ao longo da noite e reabastecido durante a manhã por arrasto de cima à medida que a camada mista cresce. O arrasto de ar da troposfera livre para a CLP e a ventilação do ar da CLP para a troposfera livre são processos importantes para a química atmosférica, conectando a superfície à atmosfera global. A ventilação geralmente ocorre por eventos meteorológicos, como sistemas frontais ou correntes ascendentes convectivas profundas que forçam o ar da camada limite para a troposfera livre. O arrasto, por outro lado, geralmente ocorre como um processo lento e constante envolvendo o afundamento em larga escala da atmosfera para compensar as correntes ascendentes convectivas. As velocidades típicas de arrasto descendente no topo da CLP são da ordem de $0,1 \text{ a } m s^{-1}$, e isso substitui o ar da CLP em uma escala de tempo de dias a uma semana (Brasseur & Jacob, 2017).

De acordo com Lazaridis (2011), a camada inferior da troposfera é afetada pela superfície da Terra. A altura desta camada é próxima a 1 km, mas varia ao longo do dia e também é afetada pelas condições meteorológicas. A camada inferior da troposfera, que é afetada diretamente pela superfície da Terra e reage às mudanças na superfície em intervalos de tempo não maiores que 1 hora, é chamada de camada limite. As mudanças que ocorrem dentro da camada limite são causadas pela turbulência, evaporação, transferência de calor, topografia e emissões de poluentes atmosféricos. O restante da troposfera também é afetado por mudanças na superfície da Terra, mas em uma escala de tempo maior.

A variação diária de temperatura próxima à superfície da Terra não é obser-

vada em elevações mais altas. Portanto, a variação diária de temperatura é uma das principais características para a determinação da camada limite planetária. A camada limite planetária é importante para a vida humana e isso pode ser concluído a partir dos vários fenômenos que ocorrem na camada limite. A vida se origina e se desenvolve dentro da camada limite, assim como os processos meteorológicos e as mudanças que afetam a vida humana e o meio ambiente. A absorção do calor do Sol e a poluição do ar afetam a saúde humana e os ecossistemas dentro desta camada. Dentro da camada limite também ocorrem a maioria das variações diárias da circulação atmosférica, que é afetada pela topografia da superfície terrestre. Devido à influência da superfície, o vento do ar é direcionado para áreas de baixa pressão, cruzando as linhas isobáricas, enquanto acima da camada limite ele é direcionado paralelamente às linhas isobáricas. A curvatura do ar em relação à altura dentro da camada limite é chamada de espiral de Ekman. A altura em que o vento deixa de girar é considerada o nível superior da camada limite. Acima dos oceanos, a altura da camada limite muda lentamente em relação à localização e ao tempo. Isso ocorre devido à mudança lenta da temperatura da superfície do mar, que tem um ciclo diário. A água possui uma grande capacidade térmica e pode absorver grandes quantidades de calor sem uma mudança considerável em sua temperatura (Lazaridis, 2011).

A base das nuvens baixas é considerada como o limite superior da camada limite. Portanto, acima de um sistema de baixa pressão onde as nuvens estão próximas ao solo, a altura da camada limite é baixa (Lazaridis, 2011).

Nas palavras de Stull (1988), a poluição está presa na CLP. Daí a importância dessa camada para esta pesquisa.

O controle e a gestão da qualidade do ar estão intimamente associados ao transporte e dispersão de poluentes atmosféricos, incluindo plumas industriais. Os processos de interesse incluem a mistura turbulenta na CLP, particularmente o papel da convecção, a fotoquímica e a deposição seca e úmida na superfície. Nesta área geral, a pesquisa sobre a turbulência atmosférica tem uma aplicação prática muito importante, e a meteorologia local, incluindo o papel das circulações de mesoescala (brisas marítimas, ventos de encosta, fluxos de vale) e o fenômeno de desacoplamento do fluxo de baixo nível e do fluxo superior de grande escala, também é de grande relevância (Garratt, 1992).

2.4.3 Meteorologia e poluição do ar

O movimento das massas de ar dentro da atmosfera é chamado de circulação atmosférica e é principalmente resultado das diferenças de temperatura entre os trópicos e os polos, ao mesmo tempo em que é afetado pela rotação da Terra. A conversão da radiação solar e terrestre em outras formas de energia dentro da atmos-

fera está ocorrendo (por exemplo, calor e energia cinética). Portanto, a atmosfera pode ser considerada como um meio de processos termodinâmicos e mecânicos complexos que são responsáveis por vários fenômenos. Esses fenômenos que ocorrem na atmosfera e são observados pelos humanos (diretamente ou indiretamente com a ajuda de instrumentos) são chamados de fenômenos meteorológicos (Lazaridis, 2011).

Foi demonstrado que a meteorologia exerce uma influência significativa nas concentrações ambientais dos hidrocarbonetos medidos. Esse impacto é especialmente relevante durante episódios de poluição atmosférica (Hester & Harrison, 1995). Elementos meteorológicos, como temperatura, umidade e direção do vento, podem alterar a dispersão e a deposição desses poluentes, contribuindo para o aumento das concentrações durante períodos críticos.

Maiores concentrações de poluentes são registrados em períodos secos, ventos calmos e predominância de um sistema de alta pressão sobre o continente (Carvalho et al., 2014).

Elementos macro e micrometeorológicos desempenham um papel importante na dispersão do monóxido de carbono (CO) emitido. Os elementos meteorológicos fundamentais envolvidos como velocidade do vento, direção do vento, dentre outros. Esses elementos são importantes para o transporte e difusão de todos os gases aéreos poluentes. No caso dos níveis de CO nas ruas das cidades, onde as pessoas estão muito próximas das fontes, os elementos micrometeorológicos tornam-se muito importantes. Isto se deve às características físicas das cidades (edifícios altos e outros obstáculos, como automóveis), que muitas vezes têm um efeito profundo na geração e características de turbulência e difusão em pequena escala. Como os automóveis geralmente estão em movimento, eles criam seu próprio pequeno campo, embora intenso, de turbulência mecânica induzida pelo veículo. A difusão resultante daí é muito importante na determinação de concentrações próximas de CO . Este efeito é intensificado quando a velocidade do vento é muito baixa (velocidade média do vento menor que $1,3 \text{ m s}^{-1}$). Quando a velocidade do vento for alta, o ar que flui sobre e ao redor dos edifícios criará turbulência e mistura adicionais que será sobreposto ao gerado pelos veículos. Este fenômeno também é responsável pelo fato de serem esperadas concentrações mais baixas com velocidades de vento mais elevadas. O desenvolvimento da turbulência depende da estabilidade geral da atmosfera (Rozante et al., 2017).

A variação temporal e espacial da concentração de CO depende das condições meteorológicas, bem como das emissões padrões. As condições meteorológicas são influenciadas por fenômenos de diferentes escalas, como a evolução diurna do Camada Limite Planetária (CLP), brisa marítima e frentes sinóticas. Os padrões de emissão são influenciados pelos dias comerciais e horário, vendas de veículos e combustíveis e uma variedade de políticas públicas, visando mobilidade, emissão, produção

de veículos, disponibilidade de tipos de combustível, dentre outros (Ribeiro et al., 2016).

A influência dos processos meteorológicos pode ser percebida pela variabilidade diurna e sazonal observada na série temporal de concentração do *CO* (Ribeiro et al., 2016).

As concentrações de gases e partículas de aerossol no ar são afetadas por ventos, temperaturas, perfis de temperatura, nuvens e umidade relativa. Esses parâmetros meteorológicos são influenciados por sistemas meteorológicos de grande e pequena escala. Grande escala os sistemas climáticos são controlados por vastas regiões de alta e baixa pressão, enquanto sistemas meteorológicos de pequena escala são controlados pela temperatura do solo, umidade do solo, e variações de pressão em pequena escala (Jacobson, 2012).

2.4.4 Aspectos Climáticos para Santa Catarina

2.4.5 Meteorologia da Área de Estudo

A região em análise é influenciada por diversos sistemas meteorológicos, como o aquecimento diferencial entre continente e oceano, os Jatos de Baixos Níveis que transportam umidade da Amazônia para as regiões Sudeste e Sul, e a umidade proveniente do Oceano Atlântico Sul pelo Anticiclone Subtropical Sul (ASAS). Esses fenômenos, entre outros, propiciam a formação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) Oliveira (2022). Consequentemente, a região em estudo torna-se mais susceptível ao transporte de contaminantes de longa distância originados de outros estados e países da América do Sul. Este conceito reveste-se de importância para a investigação do papel da poluição transfronteiriça na composição atmosférica da área em questão.

Para este estudo, são de interesse o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), as Frentes Frias (FFs) e os Jatos de Baixos Níveis (JBNs).

O ASAS desempenha um papel crucial na determinação das variações climáticas regionais, sendo o sistema mais influente na circulação atmosférica da América do Sul. Esse ciclone apresenta um caráter semi-permanente, atuando durante a maior parte do ano, e não deve ser confundido com os anticiclones transientes, que ocasionalmente ocorrem na América do Sul, mas possui um ciclo de vida de apenas alguns dias (Guerra, 2023).

O Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) é um sistema de alta pressão atmosférica que se forma sobre o Oceano Atlântico Sul, próximo à região subtropical. Ele é uma característica climática importante dessa região, influenciando as condições meteorológicas em áreas costeiras e até mesmo no interior de alguns continentes (Reboita et al., 2019).

Há dois tipos de anticiclones: os anticiclones relativamente estacionários e

os anticiclones móveis. Os estacionários são também conhecidos como anticiclones quentes, porque possuem um centro aquecido. A temperatura em toda a troposfera é excepcionalmente elevada e o calor de tais anticiclones é mantido através de subsidência dinâmica. Um anticiclone quente intensifica-se com a altitude. Por outro lado, um anticiclone frio se enfraquece com o aumento em elevação e é substituído nas alturas por baixa pressão. Os anticiclones móveis são anticiclones frios e caracterizados por ar excepcionalmente, têm curta duração e são pouco profundos, ao contrário dos anticiclones quentes, que são estáveis e de movimentação lenta (Ayoade, 1998). Os anticiclones frios formam-se em zonas de alta latitude, no ar polar continental ou ártico. Por outro lado, os anticiclones quentes ocorrem principalmente na zona subtropical, especialmente sobre os oceanos. Nossa preocupação maior é para com os anticiclones móveis, pois podem ser considerados como os constituintes dos sistemas meteorológicos (Ayoade, 1998).

Um anticiclone móvel é normalmente uma célula de alta pressão, o oposto dinâmico de uma depressão. Ao contrário de uma depressão, um anticiclone está geralmente associado a tempo bom e calmo, mas às vezes é afetado, particularmente no inverno, por nevoeiro ou por nuvens baixas stratocumulus. Tais condições de nebulosidade são às vezes chamadas de escuridão anticiclônica. Pode cair alguma precipitação, principalmente chuvisco, de tais nuvens. No verão, entretanto, o tempo em um anticiclone tende a ser seco, ensolarado e quente (Ayoade, 1998).

Os anticiclones são grandes sistemas meteorológicos, geralmente maiores que as depressões, e caracterizados por uma região central de ventos leves e de subsidência. Não há movimento ascendente pronunciado, necessário a formação de nuvens. Por isso, eles não causam tempo com tempestades, como o fazem as depressões (Ayoade, 1998).

O Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) influencia a precipitação ao longo do leste da América do Sul. Os anticiclones subtropicais são caracterizados por ondas de vento anticiclônicas, subsidência e divergência em níveis mais baixos da atmosfera (Reboita et al., 2019).

Os sistemas frontais representam a região de encontro entre duas massas de ar com características térmicas diferentes. Na presença de Frentes Frias, a massa de ar frio empurra a massa de ar quente para cima, devido à menor densidade desta última. Isso promove a formação de nuvens e precipitação. Após a passagem de uma frente fria por uma determinada área, a massa de ar frio que a segue se instala, fazendo com que as temperaturas diminuam, a precipitação cesse e o tempo se torne predominantemente ensolarado. Isso ocorre porque a massa de ar frio, sendo densa e seca, não favorece a formação de nuvens. Nessas condições, com o ar seco e ausência de nuvens, a temperatura noturna cai significativamente, pois a superfície terrestre

emite quase toda a radiação infravermelha para o espaço. Quando isso acontece, o vapor d'água presente no ar próximo à superfície pode condensar, formando orvalho, ou até mesmo congelar. Quando o congelamento ocorre sem a passagem da água pela fase líquida, ocorrem as geadas. Esses fenômenos meteorológicos são bastante comuns no sul do Brasil durante o outono e inverno (Reboita et al., 2012; Mendonça & Danni-Oliveira, 2007).

Uma característica importante da circulação de baixo nível sobre a América do Sul durante a estação quente e chuvosa é um fluxo de umidade para o Sul a Leste dos Andes, associado com a deflexão dos ventos alísios no sentido Norte-Sul. Este fluxo do norte é concentrado em uma região relativamente estreita com vento forte e velocidades em níveis baixos - um chamado jato de baixo nível (JBN) que transporta umidade da bacia amazônica em direção as regiões Sul do Brasil e Norte da Argentina. Durante o verão austral, a superfície baixa pressão localizada perto de 25 S e 65 W (o "Chaco baixo") se intensifica devido à radiação líquida positiva. A passagem de um vale de nível superior sobre a Argentina muitas vezes leva ao aprofundamento da baixa do Chaco e à intensificação do fluxo norte, favorecendo o transporte de ar tropical em direção ao Sul e a formação de ondas convectivas generalizadas (Marengo et al., 2002).

2.4.5.1 Aspectos Meteorológicos da poluição do ar no Estado de Santa Catarina

A meteorologia está intimamente ligada à qualidade do ar, determinando os níveis de concentração de poluentes primários emitidos localmente, à formação de poluentes secundários, seu transporte para outras áreas e sua remoção final da atmosfera (Seinfeld & Pandis, 2006; Boubel et al., 1994).

O ar em nossa atmosfera está continuamente em movimento, criando um complicado campo de fluxo tridimensional que varia em escalas de alguns metros (como ao redor de um prédio ou uma pequena colina) a milhares de quilômetros (uma grande tempestade) (Seinfeld & Pandis, 2006). Ao mesmo tempo, a temperatura e a umidade relativa são altamente variáveis; há nuvens se formando, evaporando, chovendo e nevando em diferentes altitudes.

De acordo com Jacobson (2002), as concentrações de gases e partículas de aerossóis são afetadas por ventos, temperaturas, perfis verticais de temperatura, nuvens e umidade relativa. Esses parâmetros meteorológicos são influenciados por sistemas climáticos de grande e pequena escala. Sistemas climáticos de grande escala são controlados por regiões de alta e baixa pressão em grande escala. Os sistemas climáticos de pequena escala são controlados pelas temperaturas do solo e variações de pressão em pequena escala.

Mesmo que as emissões antrópicas sejam a fonte da degradação da quali-

dade do ar, a meteorologia determina a magnitude dos problemas que serão causados por suas emissões, bem como onde e quando esses problemas ocorrerão (Seinfeld & Pandis, 2006).

A importância da meteorologia para a qualidade do ar fica clara quando se analisa a variabilidade das concentrações de poluentes e os consequentes dias limpos e “poluídos” numa zona com emissões mais ou menos constantes. A variabilidade é determinada pela meteorologia (Seinfeld & Pandis, 2006). Vários estudos demonstram o importante papel que o jato de baixo nível sul-americano desempenha no transporte de umidade da bacia amazônica para latitudes mais altas sobre o continente (Herdies et al., 2007).

A maior parte das emissões de gases e vapores por atividades antrópicas ou pela própria natureza entra na atmosfera no nível inferior da troposfera, a camada limite planetária (CLP), detalhada no item 2.4.2. Após sua emissão podem ser dispersos e diluídos rapidamente, resultando em baixas concentrações; em outros períodos podem estar concentrados em um volume relativamente pequeno levando a um episódio de poluição do ar. O grau de mistura de poluentes no primeiro quilômetro ou mais da atmosfera é determinado em grande parte por seu perfil de temperatura (variação da temperatura com a altitude) e pela velocidade do vento (Seinfeld & Pandis, 2006).

Em Santa Catarina, um dos estados com maior concentração industrial do Brasil, a indústria de cerâmica vermelha, composta principalmente por olarias, destaca-se como uma importante fonte de poluição atmosférica. O processo de fabricação de tijolos e telhas, típico dessas indústrias, envolve a queima de materiais como a madeira, resultando na emissão de poluentes significativos, entre eles o monóxido de carbono (CO), óxidos de enxofre (SOx), óxidos de nitrogênio (NOx) e material particulado (MP). Apesar de muitas olarias possuírem Equipamentos de Controle de Poluição Atmosférica (ECPA), apenas uma pequena parcela desses estabelecimentos mantém tais dispositivos ativos durante toda a queima nos fornos, resultando em emissões que frequentemente excedem os padrões de qualidade do ar estabelecidos pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) (Camara et al., 2015). A concentração dessas olarias em um espaço geográfico restrito e o uso de tecnologias defasadas contribuem para a degradação da qualidade do ar local, sugerindo a necessidade de regulamentações mais rígidas e de tecnologias mais eficientes para mitigação dos impactos atmosféricos.

Na troposfera, a temperatura normalmente diminui com o aumento da altitude devido à diminuição da pressão com a altura. Se a atmosfera estiver em seu estado de equilíbrio, uma parcela de ar não tem tendência a subir ou descer. A temperatura para este estado neutro diminui lentamente com a altura e é considerada o perfil de temperatura de referência para a atmosfera. A atmosfera está, no entanto, muito

raramente em um equilíbrio tão delicado; a influência do aquecimento da superfície e fenômenos em escalas maiores geralmente resultam em um perfil de temperatura diferente do perfil de referência. Se a temperatura atmosférica diminui mais rapidamente com a altura do que o perfil de referência, então a atmosfera é instável. Se uma parcela de ar for deslocada para cima ou para baixo, ela continuará se movendo nessa direção. Uma atmosfera instável é, portanto, caracterizada por fortes correntes verticais nas direções ascendente e descendente, levando a uma rápida mistura dos poluentes emitidos. Por outro lado, se a temperatura diminui mais lentamente com a altura do que o perfil de referência (ou até aumenta), a atmosfera é estável. Em atmosferas estáveis, as parcelas de ar são inibidas de movimentos ascendentes ou descendentes, resultando em uma mistura fraca de poluentes emitidos. Se a temperatura de uma camada atmosférica realmente aumenta com a altitude, ela é chamada de camada de inversão. Uma inversão ocorre quando o ar quente fica acima do ar frio, e essa condição é extremamente estável. Um tipo de atmosfera estável ocorre durante as noites com céu limpo e ventos fracos. Então o solo e o ar na atmosfera inferior podem se tornar mais frios do que o ar acima deles. Isso é conhecido como superfície (ou inversão de radiação) (Seinfeld & Pandis, 2006).

O ar ao nosso redor está continuamente em movimento, e circulações de todas as dimensões existem na atmosfera. Pequenos vórtices se formam dentro de vórtices maiores, que por sua vez ocorrem dentro de vórtices ainda maiores. Uma maneira de pensar sobre esses movimentos é aplicar o conceito de redemoinhos turbulentos: volumes relativamente pequenos de ar que estão girando, têm sua própria história de vida e se comportam de maneira diferente do fluxo maior em que existem. Pequenos redemoinhos turbulentos com dimensões de centímetros ou alguns metros podem ser vistos na fumaça de um incêndio ou de um cigarro. Esses vórtices coexistem com os de maiores dimensões até as maiores dimensões do movimento (centenas de metros ou mais na atmosfera), os chamados vórtices grandes. Essa turbulência atmosférica é responsável pela dispersão e transporte de material das fontes para o restante da atmosfera (Seinfeld & Pandis, 2006).

2.4.6 Microescala

Os efeitos meteorológicos de microescala são fenômenos que ocorrem em escalas da ordem de 1 km. Por exemplo, determinam a dispersão de uma pluma de uma chaminé industrial ou de uma rodovia em escalas de tempo da ordem de minutos a algumas horas (Seinfeld & Pandis, 2006).

Para poluentes que são relativamente não reativos, como o monóxido de carbono e as partículas, ou reativos relativamente lentos, como o dióxido de enxofre, as contribuições de fontes individuais somam-se para produzir concentrações elevadas.

Como a principal fonte de monóxido de carbono são os veículos motorizados, “pontos quentes” de alta concentração podem ocorrer especialmente perto de cruzamentos de múltiplas faixas. As emissões são especialmente elevadas provenientes de veículos parados e, se edifícios altos rodearem o cruzamento, o volume em que a poluição está contida é severamente restringido. A combinação desses fatores resulta em altas concentrações (Boubel et al., 1994).

De acordo com Lazaridis (2011), na microescala, a variação é de 2 mm a 2 km, observam-se processos atmosféricos em uma escala muito pequena, como as emissões de poluentes industriais e a formação de nuvens de pequena escala. Esses fenômenos podem incluir o transporte de poluentes locais e a interação entre partículas atmosféricas em uma área geograficamente limitada.

2.4.7 Mesoescala

Os fenômenos de mesoescala ocorrem ao longo de horas ou dias e influenciam o transporte e dispersão de poluentes para áreas que estão a centenas de quilômetros de suas fontes (Seinfeld & Pandis, 2006).

Na mesoscala, que abrange distâncias de 2 a 2.000 km, observam-se fenômenos atmosféricos de média escala, como a coalescência de nuvens para formar sistemas meteorológicos maiores, como tempestades e sistemas frontais. Além disso, nessa escala, pode-se observar a dispersão e concentração de poluentes atmosféricos em áreas urbanas, onde as emissões de poluentes são mais intensas e concentradas (Lazaridis, 2011).

Em meteorologia, a mesoescala refere-se a sistemas que são menores do que sistemas de escala sinótica, mas maiores do que sistemas de escala de tempestade. As dimensões horizontais desses sistemas geralmente variam de cerca de 50 milhas (aproximadamente 80 quilômetros) a várias centenas de milhas (algumas centenas de quilômetros). Exemplos de sistemas meteorológicos de mesoescala incluem linhas de instabilidade, complexos convectivos de mesoescala (MCCs) e sistemas convectivos de mesoescala (MCSs) (National Weather Service, 2024).

2.4.8 Escalas de poluentes atmosféricos

O termo “escala” de poluentes atmosféricos pode se aplicar tanto ao espaço quanto ao tempo. Ambos são importantes por várias razões e estão conectados pelo vento médio, que varre os poluentes sobre uma área específica em um determinado tempo enquanto os dispersa. Em sua monografia sobre “O Design de Redes de Monitoramento da Qualidade do Ar”, Munn (1981) apud Brimblecombe (2002) aborda diversos aspectos da poluição urbana que são relevantes para a presente discussão. Ao considerar a variabilidade no tempo e no espaço, ele define algumas escalas

características dos padrões espaciais de poluição do ar, que, em ordem de tamanho crescente, são:

- i. Microescala (0-100 m);
- ii. Escala de vizinhança (100-2000 m);
- iii. Escala urbana (5-50 km);
- iv. Escala regional (100-1000 km); e
- v. Escala continental, hemisférica e global.

2.5 Dispersão e trajetória de parcelas de ar

As moléculas lançadas ao ar seguem destinos diferentes. Algumas dessas moléculas podem ser removidas próximas ao ponto de emissão por meio de contato com gotículas no ar ou na superfície terrestre. Outras moléculas podem ser transportadas para altas altitudes na atmosfera e deslocadas por grandes distâncias antes de serem finalmente removidas (Seinfeld & Pandis, 2006).

De acordo com Lazaridis (2011), os poluentes atmosféricos dispersam-se na atmosfera e são transportados a longas distâncias das suas fontes. O meio em que os poluentes atmosféricos são transportados é a atmosfera, e a sua dinâmica determina a sua vida útil e o seu impacto no ambiente e nos seres humanos.

Partículas de aerossóis provenientes de incêndios florestais na Amazônia podem ser efetivamente transportadas para áreas urbanas no sudeste da América do Sul, afetando a qualidade do ar nessas regiões (Vara-Vela et al., 2021).

O transporte é o mecanismo que move a poluição de uma fonte para um receptor. O vento é o meio pelo qual a poluição é transportada. No entanto, durante o seu percurso, a pluma não permanece um tubo cilíndrico de poluição com o mesmo diâmetro do interior da chaminé de onde foi emitida (por exemplo). Em vez disso, à medida que percorre o caminho, redemoinhos turbulentos no ar e na pluma movem parcelas das bordas da pluma para o ar circundante e movem parcelas do ar circundante para a pluma. Se a velocidade do vento for maior que a velocidade de ejeção da chaminé, o vento estenderá a pluma até que a velocidade da pluma seja igual à velocidade do vento (Boubel et al., 1994).

Um dos principais objetivos do estudo do comportamento atmosférico é ser capaz de descrever matematicamente a distribuição espacial e temporal dos contaminantes liberados na atmosfera. Há duas formas básicas de descrever a difusão turbulenta (Lazaridis, 2011). A primeira é a abordagem Euleriana, na qual o comportamento das partículas é descrito em relação a um sistema de coordenadas fixo. A descrição Euleriana é a maneira comum de tratar fenômenos de transferência de calor e massa. A segunda abordagem é a Lagrangiana, na qual as mudanças de concentração

são descritas em relação ao fluido em movimento. As duas abordagens produzem diferentes tipos de relações matemáticas para as concentrações de partículas que podem, em última análise, estar relacionadas. Cada um dos dois modos de expressão é uma descrição válida da difusão turbulenta; a escolha de qual abordagem adotar em uma determinada situação dependerá das características específicas da situação (Seinfeld & Pandis, 2006).

Na abordagem Euleriana, o sistema é examinado em coordenadas fixas e é a abordagem mais popular para o exame de massa e calor na atmosfera. Na abordagem Lagrangiana, as mudanças de concentração são descritas em relação a um sistema de coordenadas não fixo, por exemplo, o ar (Lazaridis, 2011).

A média das histórias de vida de todas as moléculas de uma substância produz um tempo de vida médio ou tempo de residência médio para essa substância. Esse tempo de residência nos diz em média quanto tempo uma molécula representativa da substância permanecerá na atmosfera antes de ser removida. A atmosfera apresenta duas saídas definitivas: a precipitação e a própria superfície da Terra. Espécies liberadas no ar devem, mais cedo ou mais tarde, sair por uma dessas duas rotas (Seinfeld & Pandis, 2006).

As fontes de poluentes a distâncias de 5 a 50 km se dispersam a alturas bem acima das estruturas de superfície e se espalham por larguras relativamente grandes. A uma distância de 5 km, a maior parte do poluente de uma única fonte está contida em uma altura de cerca de 250 metros e uma largura de cerca de 1 km. A uma distância de 50 km, as alturas e larguras respectivas são de cerca de 600 metros e 8 km. Os poluentes então começam a se misturar uniformemente dentro da profundidade da camada limite de superfície. Além disso, os grandes números de fontes de poluentes provavelmente contidas no *fetch*⁹ a favor do vento nessas escalas, que contribuem para o nível total de poluição em um ponto por adição, produzem um nível de poluição mais difuso e mudando lentamente. Assim, há gradientes de concentração vertical e lateral negligenciáveis em todas as estruturas de superfície, exceto as muito grandes. Este é também o regime para o qual os tempos de residência de poluentes na atmosfera são suficientes para que ocorram processos químicos, por exemplo (Brimblecombe, 2002).

Dispersão em regiões de Escala Regional e Continental (100 km ou mais), as fontes de poluentes a estas distâncias permeiam uniformemente a camada limite de superfície, e assim alcançam alturas geralmente bem acima das estruturas de superfície, e mostram apenas pequenas variações sobre grandes áreas e longos períodos. Ao mesmo tempo, o nível de poluentes em um ponto é geralmente composto pela soma das

⁹ Em meteorologia e oceanografia, o “fetch” é a extensão ou área sobre a qual o vento sopra consistentemente em uma única direção, acumulando energia e transportando materiais, como poluentes. No contexto do texto, refere-se à área a favor do vento onde os poluentes são coletados e transportados, contribuindo para o nível de poluição em um ponto específico. Fonte: National Weather Service (2024)

contribuições de um número muito grande de fontes individuais. Nas distâncias mais longas destes regimes, até mesmo as variações diurnas nas emissões de poluentes são suavizadas e os níveis de poluentes variam principalmente com as mudanças no padrão climático ou padrões de uso a longo prazo. Os poluentes “a favor do vento” podem ter seguido trajetórias complexas de vento geradas pelo padrão climático. Estas também são as escalas em que ocorrem processos químicos atmosféricos de longo prazo, como a oxidação adicional de óxidos de nitrogênio e enxofre para nitrato e sulfato. Poluentes a essas distâncias constituem os verdadeiros níveis de concentração “de fundo” das áreas urbanas, uma vez que permeiam toda a área em um nível uniforme que muda apenas lentamente. Eles não podem ser controlados ou evitados dentro das escalas de uma área urbana (Brimblecombe, 2002).

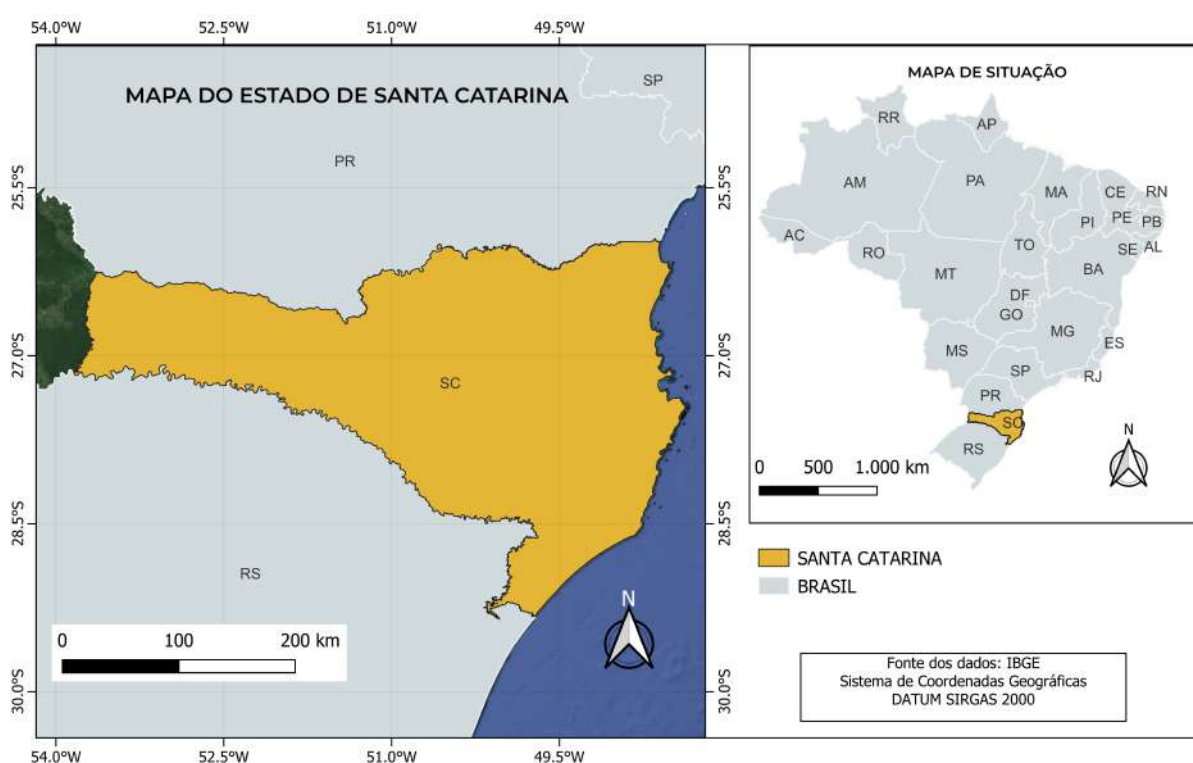
A dispersão do poluente depende da velocidade média do vento e da turbulência atmosférica. A dispersão de uma pluma proveniente de uma fonte contínua elevada aumenta com o aumento da rugosidade da superfície e com o aumento das correntes de ar convectivas ascendentes. Assim, um dia de verão claro produz as melhores condições meteorológicas para a dispersão, enquanto uma manhã de inverno fria com uma inversão forte resulta nas piores condições para a dispersão (Schnelle, 2003).

3 METODOLOGIA

3.1 Área de Estudo

O estudo concentra-se na análise dos poluentes do Estado de Santa Catarina, uma unidade federativa localizada na Região Sul do Brasil (Figura 8). O Estado é delimitado por uma área territorial de 95.730,69 km² e uma população estimada em cerca de 7.610.361 habitantes, conforme dados do Censo de 2022 realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022).

Figura 8 – Mapa de localização da área de estudo



3.2 Mapeamento de áreas mais suscetíveis à poluição atmosférica

Execução de um mapeamento das áreas potencialmente poluidoras, consistindo no levantamento das atividades e respectivos códigos da listagem da Resolução CONSEMA n° 98/2017 que estão identificadas como potencial poluidor G (grande) do ar. É gerada uma planilha com a lista de todas as atividades selecionadas.

Em seguida é realizado um levantamento das empresas cadastradas no Sistema de Informações Ambientais (SinFAT) do Instituto do Meio Ambiente (IMA) dessas atividades selecionadas, contendo número do processo de licenciamento, nome da empresa, código da atividade, e localização com coordenadas planas UTM Sistema Datum Sirgas 2000.

A coleta de dados é feita manualmente, selecionando os processos de licenciamento ambiental que estejam em fases de LAO (Licença Ambiental de Operação) e Ren. LAO (Renovação de LAO). É necessário fazer essa seleção para não coletar informações de empresas que não estão operando ou ainda que o processo de licenciamento tenha sido indeferido.

Com as coordenadas planas obtidas é utilizado um Sistema de Informações Geográficas (SIG) através do software QGIS®, construindo-se um mapa de calor do tipo Kernel, o qual estuda a concentração de fenômenos pontuais. O mapa destaca com uma cor mais intensa, onde houver maior concentração de ocorrências de empresas poluidoras e consequentemente maior risco de poluição atmosférica.

O resultado do mapa de calor identifica os pontos de maior concentração de empresas e, presumivelmente, maior poluição, além de locais com potencial para poluição. Esses dados subsidiaram a análise dos poluentes descritos no item 3.3.

3.3 Obtenção de dados históricos de poluentes

A obtenção de séries históricas dos principais poluentes descritos nas Diretrizes Globais da Qualidade do Ar da WHO (2021), sendo: $MP_{2,5}$, MP_{10} , O_3 , CO , NO_2 e SO_2 . A Tabela 1 lista os poluentes a serem analisados e as principais fontes de obtenção dos dados, podendo ser dados de reanálise ou sensores de satélites. Nos Apêndices deste trabalho estão listadas e detalhadas todas as fontes de obtenção de dados (reanálises).

Tabela 1 – Poluentes e fontes de obtenção de dados

Poluente	Fonte
$MP_{2,5}$	MERRA-2
MP_{10}	MERRA-2
O_3	MERRA-2
CO	MOPPIT e MERRA-2
NO_2	OMI
SO_2	MERRA-2

O MERRA-2 (*Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, version 2*) é um conjunto de dados de reanálise atmosférica desenvolvido pelo Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC) da NASA. Ele fornece informações detalhadas sobre as condições meteorológicas e climáticas globais desde 1980 até o presente (Gelaro et al., 2017).

Nas palavras de Claudino et al. (2021), a reanálise MERRA-2 é o estado da arte da reanálise atmosférica da era moderna dos satélites.

A reanálise consiste em utilizar um sistema de assimilação de dados constante para reprocessar observações meteorológicas de forma coerente, geralmente cobrindo um longo período do registro histórico de dados. Esse processo se apoia em um modelo de previsão para integrar diferentes observações de maneira fisicamente consistente, permitindo a criação de conjuntos de dados em grade para diversas variáveis, incluindo aquelas que são escassamente ou não diretamente observadas. Com a devida consideração das incertezas inerentes, os produtos de reanálise tornaram-se não apenas essenciais para a comunidade de pesquisa atmosférica, mas também são cada vez mais utilizados no monitoramento climático (Gelaro et al., 2017).

Os dados são obtidos a partir da Plataforma GIOVANNI - *GES-DISC Interactive Online Visualization and Analysis Interface* Global Modeling and Assimilation Office (GMAO), Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC) (2015).

Para o Monóxido de Carbono é possível obter os dados do MOPITT e do MERRA-2, e fazer um comparativo entre os dois. O MOPITT (sigla em inglês para "*Measurements Of Pollution In The Troposphere*") é um instrumento de sensoriamento remoto a bordo do satélite Terra da NASA que mede a concentração atmosférica de monóxido de carbono na troposfera (NASA, 2024).

O MOPITT é um dos primeiros sensores de satélite a usar a espectroscopia de correlação de gases. O sensor mede a radiação emitida e refletida pela Terra em três bandas espectrais. À medida que essa luz entra no sensor, ela passa por dois caminhos diferentes através de contêineres a bordo contendo monóxido de carbono. Os diferentes caminhos absorvem diferentes quantidades de energia, resultando em pequenas diferenças nos sinais que se correlacionam com a presença desses gases na atmosfera (Drummond & Worden, 2023).

A resolução espacial do MOPITT é de 22 km no nadir, e ele "vê" a Terra em faixas de 640 km de largura. Além disso, ele pode medir as concentrações de monóxido de carbono em camadas de 5 km ao longo de uma coluna vertical da atmosfera, ajudando os cientistas a rastrear o gás de volta às suas fontes (NASA, 2024).

O OMI (*Ozone Monitoring Instrument*) é um instrumento de sensoriamento remoto a bordo do satélite Aura da NASA, lançado em 2004. Ele foi projetado para medir a concentração de vários gases na atmosfera terrestre, incluindo ozônio, dióxido de enxofre, dióxido de nitrogênio, formaldeído e aerossóis (Levelt et al., 2006). Esse produto contém a Coluna Total de NO_2 e a Coluna Troposférica Total de NO_2 , para todas as condições atmosféricas, e para condições do céu onde a fração de nuvens é inferior a 30 por cento (Krotkov et al., 2019), sendo que a coluna troposférica é a que será utilizada nessa pesquisa.

A pesquisa engloba um período de 15 anos, de janeiro de 2008 até dezembro

de 2022. Compreende o estudo de cada poluente, tanto a climatologia sazonal das estações do ano (DJF, MAM, JJA e SON)¹ quanto a climatologia mensal. Os dados são médios mensais, ou seja, 12 dados por ano, totalizando 180 dados.

3.4 Obtenção de dados históricos de elementos meteorológicos

A obtenção de séries históricas dos principais elementos meteorológicos, tais como: temperatura média a 2 metros, precipitação média, ventos em diversos níveis de pressão e altura da camada limite planetária. A Tabela 2, lista os elementos analisados concomitantemente com os poluentes e as principais fontes de obtenção dos dados.

Tabela 2 – Elementos meteorológicos e fonte de obtenção de dados

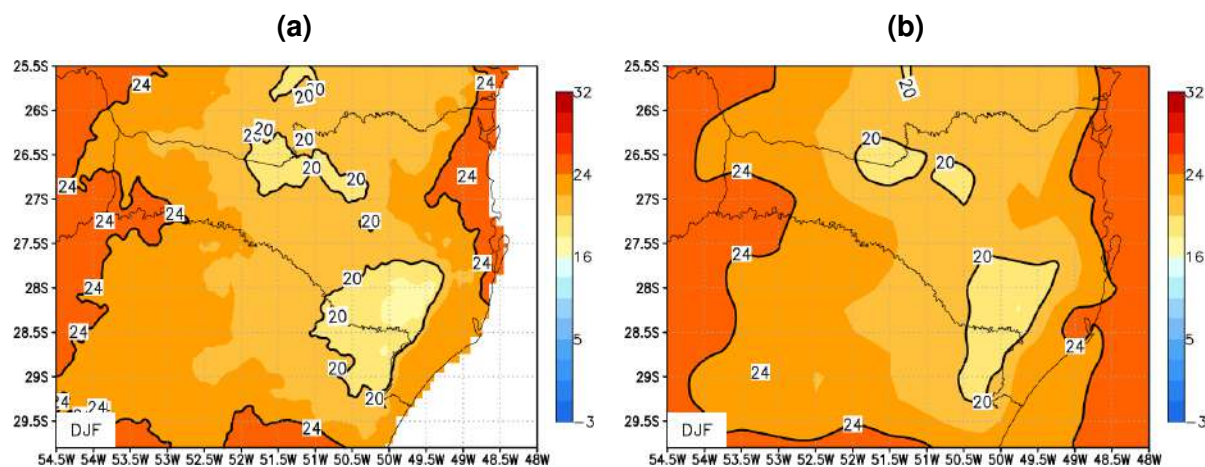
Elemento	Fonte
Temperatura a 2 m	SAMeT
Precipitação média	MERGE
Vento	ERA5
Altura da CLP	ERA5

O SAMeT (*South American Mapping of Temperature*) é um produto desenvolvido e disponível operacionalmente para a América do Sul através do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE). O produto combina dados observados com a reanálise ERA5, realizando uma correção no campo de temperatura utilizando uma taxa de variação estimada. A taxa de variação foi estimada para quatro regiões localizadas sobre a América do Sul e para as quatro estações do ano. A combinação de reanálise e observações, juntamente com a correção da taxa de variação, produziu campos de temperatura mais precisos do que os fornecidos pelo ERA5, especialmente em regiões com topografia mais acentuada (Rozante et al., 2021).

Nas Figuras 9a e 9b, SAMeT e ERA5, respectivamente, mostra o comparativo de climatologia de verão (DJF) de Temperatura a 2 metros. Destaca claramente a superioridade do SAMeT em termos de detalhamento em comparação com o ERA5, cujos os resultados parecem estar suavizados, justificando assim sua seleção para esta pesquisa.

¹ DJF: Dezembro, Janeiro e Fevereiro; MAM: Março, Abril e Maio; JJA: Junho, Julho e Agosto e SON: Setembro, Outubro e Novembro

Figura 9 – Comparativo entre dados de temperatura a 2 metros, no período de 2008 a 2022 obtidos do SAMeT e do ERA5. Unidade: °C



O MERGE é também um produto desenvolvido pelo CPTEC/INPE, ele ganhou esse nome “MERGE” porque significa combinar, mesclar ou unir dois ou mais conjuntos de dados, informações ou elementos em um único conjunto, muitas vezes integrando-os de forma coerente e consistente. No contexto desta pesquisa, refere-se à técnica de combinar estimativas de precipitação por satélite com observações de superfície sobre o continente sulamericano.

O MERGE é utilizado para integrar e aprimorar os dados de precipitação disponíveis, especialmente em regiões onde a rede de observações é escassa ou irregular. O MERGE visa superar as limitações associadas à baixa densidade de observações, permitindo uma avaliação mais confiável do desempenho dos modelos numéricos de previsão do tempo e do clima (Rozante et al., 2010). ERA5 é a quinta geração da reanálise atmosférica do clima global do ECMWF, cobrindo o período de janeiro de 1940 até o presente. O ERA5 é produzido pelo Serviço de Mudanças Climáticas Copernicus (C3S) no ECMWF.

O ERA5 fornece estimativas horárias de um grande número de variáveis atmosféricas, terrestres e oceânicas. Os dados abrangem a Terra em uma grade de 31 km e resolvem a atmosfera usando 137 níveis desde a superfície até uma altura de 80 km. O ERA5 inclui informações sobre incertezas para todas as variáveis em resoluções espaciais e temporais reduzidas. O ERA5 combina vastas quantidades de observações históricas em estimativas globais usando sistemas avançados de modelagem e assimilação de dados (ECMWF, 2024).

Assim como para os poluentes, a pesquisa engloba um período de 15 anos, de janeiro de 2008 até dezembro de 2022. Compreende os elementos meteorológicos na tentativa de explicar a concentração do poluente relacionado, tanto a climatologia sazonal das estações do ano (DJF, MAM, JJA e SON) quanto a climatologia mensal. Os dados são médios mensais, ou seja, 12 dados por ano, totalizando 180 dados.

3.5 Índice de Qualidade do Ar

O Índice de Qualidade do Ar (IQAr) foi criado visando facilitar a divulgação dos dados de monitoramento da qualidade do ar de curto prazo, conforme a Resolução CONAMA n° 491/2018, tornando mais fácil o entendimento dos resultados pela sociedade. Dispõe sobre os padrões de qualidade do ar, considerando como referência os valores guia de qualidade do ar recomendados pela Organização Mundial de Saúde (OMS) BRASIL (2018).

Para o cálculo do índice de qualidade do ar utiliza-se a Equação 10.

$$IQAr = I_{ini} + \frac{I_{fin} - I_{ini}}{C_{fin} - C_{ini}} \times (C - C_{ini}) \quad (10)$$

Onde:

I_{ini} = valor do índice que corresponde à concentração inicial da faixa.

I_{fin} = valor do índice que corresponde à concentração final da faixa.

C_{ini} = concentração inicial da faixa onde se localiza a concentração medida.

C_{fin} = concentração final da faixa onde se localiza a concentração medida.

C = concentração medida do poluente.

Os poluentes que fazem parte do índice são os seguintes:

- i. Material particulado (MP_{10});
- ii. Material particulado ($MP_{2,5}$);
- iii. Ozônio (O_3);
- iv. Monóxido de carbono (CO);
- v. Dióxido de nitrogênio (NO_2); e
- vi. Dióxido de enxofre (SO_2)

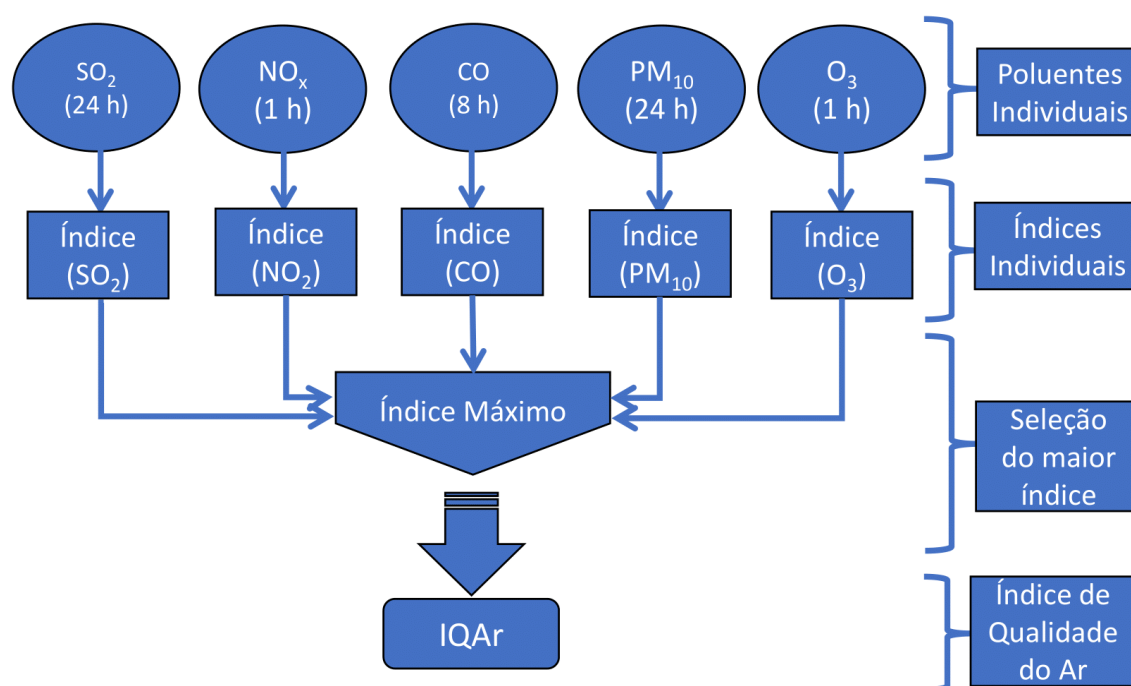
Para cada poluente medido é calculado um índice, que é um valor adimensional. Dependendo do índice obtido, o ar recebe uma qualificação, que consiste em uma nota para a qualidade do ar, além de uma cor, conforme apresentado na Quadro 7.

Quadro 7 – Estrutura do Índice de Qualidade do Ar

Qualidade do Ar	Índice	MP ₁₀ ($\mu\text{g.m}^{-3}$) 24h	MP _{2.5} ($\mu\text{g.m}^{-3}$) 24h	O ₃ ($\mu\text{g.m}^{-3}$) 8h	CO (ppm) 8h	NO ₂ ($\mu\text{g.m}^{-3}$) 1h	SO ₂ ($\mu\text{g.m}^{-3}$) 24h
N1 - Boa	0 - 40	0-50	0-25	0-100	0-9	0-200	0-20
N2 - Moderada	41 - 80	>50-100	>25-50	>100-130	>9-11	>200-240	>20-40
N3 - Ruim	81 - 120	>100-150	>50-75	>130-160	>11-13	>240-320	>40-365
N4 - Muito Ruim	121 - 200	>150-250	>75-125	>160-200	>13-15	>320-1130	>365-800
N5 - Péssima	201 - 400	>250-600	>125-300	>200-800	>15-50	>1130-3750	>800-2620

Fonte: Guia Técnico para o Monitoramento e Avaliação da Qualidade do Ar (Brasil. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Qualidade Ambiental, 2020)

Com os valores de índices de poluentes obtidos é possível identificar o índice global, conforme o Fluxograma da Figura 10.

Figura 10 – Fluxograma para cálculo do Índice de Qualidade de Ar

Fonte: Adaptado de Payus et al. (2022)

3.6 Dispersão e trajetória de parcelas de ar

Essa etapa é vinculada aos dados das etapas anteriores e é utilizado o modelo *HYSPLIT* (*Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory*) para estudar a trajetória das parcelas de ar em datas específicas. Disponível no *Air Resources Laboratory* (ARL) da *National Oceanic and Atmospheric Administration's* (NOAA).

Para uma análise mais completa, são empregados mapas de ventos climatológicos sazonais (por estações do ano) e mensais abrangendo o período de 15 anos (de 2008 a 2022).

Além disso, diagramas de rosa dos ventos são utilizados para verificar a frequência predominante de ventos durante o período de estudo.

3.6.1 HYSPLIT

O modelo *HYSPLIT* simula a dispersão e trajetória de substâncias transportadas e dispersas através da atmosfera, em escalas locais a globais (NOAA, 2022b).

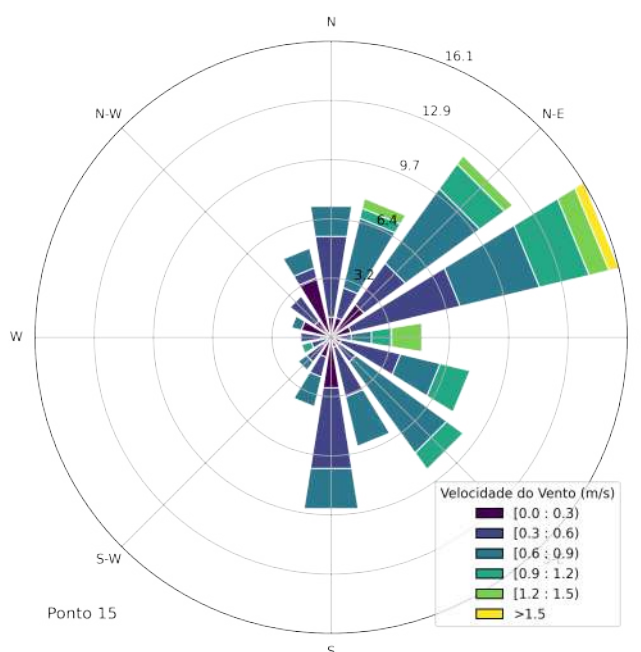
O *HYSPLIT* é um sistema completo para calcular trajetórias simples de parcelas de ar, bem como simulações complexas de transporte, dispersão, transformação química e deposição. O *HYSPLIT* é um dos modelos de transporte e dispersão atmosféricos mais amplamente utilizado na comunidade de ciências atmosféricas. Uma aplicação comum é uma análise de trajetória de retorno para determinar a origem das parcelas de ar e estabelecer relações fonte-receptor. O *HYSPLIT* também tem sido usado em uma variedade de simulações que descrevem o transporte atmosférico, dispersão e deposição de poluentes e materiais perigosos. Alguns exemplos das aplicações incluem rastreamento e previsão da liberação de material radioativo, fumaça de incêndios florestais, poeira levada pelo vento, poluentes de várias fontes de emissão fixas e móveis, alérgenos e cinzas vulcânicas (NOAA, 2022b).

O método de cálculo do modelo é um híbrido entre a abordagem Lagrangiana, usando um referencial móvel para os cálculos de advecção e difusão à medida que as trajetórias ou parcelas de ar se movem de sua localização inicial, e a metodologia Euleriana, que usa uma grade tridimensional fixa como um quadro de referência para calcular as concentrações de poluentes no ar (o nome do modelo, que não é mais um acrônimo, originalmente refletia essa abordagem computacional híbrida). O *HYSPLIT* evoluiu ao longo de mais de 30 anos, desde a estimativa de trajetórias simples simplificadas com base em observações de radiossonda até um sistema que contabiliza vários poluentes, dispersos e depositados em escalas locais a globais (NOAA, 2022b).

Para esse uso em específico é determinada e escolhida uma data onde ocorreu uma elevação alta do poluente para verificação de provável fonte.

3.6.2 Diagrama de Rosa dos Ventos

O Diagrama de Rosa dos Ventos é utilizado para uma determinada localidade ou área, mostrando a frequência e a intensidade do vento proveniente de várias direções (National Weather Service, 2024). O exemplo da Figura 11 mostra a maior frequência de ventos oriunda entre leste e nordeste, no centro do diagrama o vento é próximo a zero, denominado região de “calmaria”.

Figura 11 – Exemplo de diagrama de rosa dos ventos

3.7 Tratamento dos Dados

Nesta fase, conduz-se uma análise dos registros históricos adquiridos de conjuntos de dados de reanálises como MERRA-2, ERA5, MERGE, SAMeT, além de dados de sensores de satélite (OMI e MOPPIT), todos armazenados em arquivos com extensão NetCDF (.nc ou .nc4). A execução de algoritmos e métodos estatísticos tem como objetivo avaliar a flutuação temporal das concentrações de poluentes, determinando se houve aumento ou redução ao longo do período considerado.

Aplicações utilizadas:

- i. *Climate Data Operators* - CDO;
- ii. *Grid Analysis and Display System* - GrADS; e
- iii. *Python*.

O CDO (*Climate Data Operator*) é empregado para realizar operações como a aplicação de fatores multiplicativos quando os valores não estão na unidade padrão da Organização Mundial da Saúde (OMS), usualmente expressos em microgramas por metro cúbico ($\mu g m^{-3}$). Além disso, o CDO é utilizado para examinar informações dos dados, converter os dados em médias mensais quando os valores são fornecidos em base diária, entre outras operações. Ele também se mostra útil para a concatenação de arquivos anuais, extração das variáveis de interesse, e outras tarefas relacionadas ao tratamento de dados climáticos.

O *GrADS* (*Grid Analysis and Display System*) opera em conjunto com o *CDO*, sendo responsável pela geração de mapas. Nele é feito um recorte da área de interesse, definida por coordenadas geográficas decimais, como uma latitude inicial de $-29,8^\circ$, latitude final de $-25,5^\circ$, longitude inicial de $-25,5^\circ$ e longitude final de $-48,0^\circ$. Utilizando o *GrADS*, são calculadas as climatologias, que são as médias sazonais e mensais ao longo de um período de 15 anos.

Utilizando Python, são obtidas as séries temporais dos pontos destacados no Mapa de Calor de *Kernel*. As coordenadas geográficas são extraídas do centro da mancha produzida pelo mapa de calor, e com base nelas são derivadas as séries temporais correspondentes.

3.7.1 Série temporal modificada

A série temporal mencionada anteriormente, ao ser extraída diretamente dos pontos de dados, pode apresentar variações influenciadas por fatores sazonais. Por exemplo, durante o verão, os valores de poluentes como MP_{10} e $MP_{2,5}$ podem ser mais baixos devido a condições climáticas, como aumento da ventilação e precipitação, que ajudam a dispersar esses poluentes. Essa sazonalidade pode dificultar a aplicação de determinadas técnicas estatísticas que assumem a homogeneidade dos dados ao longo do tempo, levando a resultados que podem não refletir com precisão a verdadeira dinâmica da qualidade do ar. Portanto, é fundamental considerar essas variações sazonais ao analisar a série temporal para garantir a confiabilidade das conclusões e a eficácia das estratégias de gerenciamento da qualidade do ar.

Para mitigar o impacto da sazonalidade, é realizada a climatologia dos dados mensais, ou seja, a média de 15 janeiros, 15 fevereiros, 15 março, e assim por diante, e subtraído o grid correspondente de cada mês. Isso resulta na geração de um novo arquivo de dados contendo valores tanto negativos quanto positivos, representando a diferença entre os valores de todos os 180 meses e a climatologia mensal ao longo dos 15 anos. Em outras palavras, esse arquivo reflete apenas a variação dos dados (anomalia).

Dessa forma, a série temporal consistirá em 180 valores (15 anos multiplicados por 12 meses), permitindo a realização dos procedimentos exemplificados a seguir.

3.7.2 Média móvel

A média móvel é uma técnica estatística comum empregada em várias disciplinas. Sua utilidade reside na capacidade de suavizar flutuações abruptas ou ruídos nos dados, facilitando a identificação de tendências ou padrões de longo prazo.

Neste contexto, é calculada a média móvel de 3 meses na série temporal modificada de 180 valores.

3.7.3 Teste de Normalidade

Um teste de normalidade *Anderson-Darling* é conduzido, confirmando a não normalidade dos dados. Sendo assim necessário utilizar um teste estatístico não paramétrico.

3.7.4 Análise de tendência - Teste de Mann-Kendall

O teste de *Mann-Kendall* é realizado sobre a série de média móvel com um nível de significância de 0,05 (Mann, 1945).

3.7.5 Determinação do ESCORE dos poluentes atmosféricos

É utilizada a linguagem *Python* na seguinte sequência:

- i. Obtenção de Dados: Um arquivo CSV contendo as concentrações dos poluentes de todos os pontos selecionados no mapa de calor de kernel será carregado. Esse arquivo fornecerá os dados brutos necessários para a análise.
- ii. Normalização dos Dados: Os dados serão normalizados utilizando o *MinMaxScaler*. O *MinMaxScaler* é uma ferramenta de pré-processamento de dados fornecida pelo pacote *sklearn (Scikit-Learn)* em *Python*. Essa técnica de normalização ajusta os dados para que se situem dentro de um intervalo específico, neste caso, de 0 a 100. A normalização é necessária para garantir que todos os poluentes sejam comparáveis em uma mesma escala, eliminando a influência de diferentes unidades de medida ou magnitudes. Utilizando um range de 0 a 100, todos os valores dos poluentes serão transformados para este intervalo.
- iii. Cálculo com o Tau de *Kendall*: O tau de *Kendall*, previamente calculado, será utilizado para ponderar a média dos 180 dados de cada poluente em cada ponto. O tau de *Kendall* é uma medida de correlação não paramétrica que avalia a tendência de associação entre duas variáveis. Ele é importante porque determina a força da tendência entre as variáveis, independentemente de distribuições normais. Esta ponderação é crucial para refletir a influência relativa de cada poluente.
- iv. Geração de Escores Individuais: Um escore individual será gerado para cada ponto e para cada poluente. Se o escore resultante for negativo, ele será excluído das etapas subsequentes, pois valores negativos poderiam

distorcer o cálculo do escore final, introduzindo vieses indesejados na análise.

- v. **Cálculo do Escore Final e *Ranking*:** O escore final de cada ponto será a soma de todos os escores individuais dos poluentes válidos (não negativos). A partir desses escores finais, será gerado um ranking dos pontos, identificando assim as áreas mais poluídas. Esse ranking permitirá determinar quais locais são prioritários para a instalação de uma estação de monitoramento da qualidade do ar. O Escore final significa o índice de poluição considerando a expectativa da série histórica da poluição se tornar mais ascendente. O tau de *Kendall* determina a ascendência da série. Considera o cenário da poluição piorar no futuro. Já o cálculo da poluição média considera o recorte no presente momento, ou melhor, a média de 2008-2022.

A equação que define o escore final é apresentada na Equação 11.

$$\text{Escore Final} = \sum_{i=1}^{11} (\bar{C}_i \times \tau_i) \quad (11)$$

Onde:

$\bar{C}_i$ = a concentração média do poluente no ponto i .

τ_i = é o tau de Kendall específico para o poluente no ponto i .

A metodologia garante uma análise estruturada e suficiente dos dados de poluição, facilitando a identificação de áreas críticas que necessitam de intervenção.

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

4.1 Análise e discussão dos resultados

4.1.1 Mapeamento das áreas mais suscetíveis à poluição atmosférica com emissão local

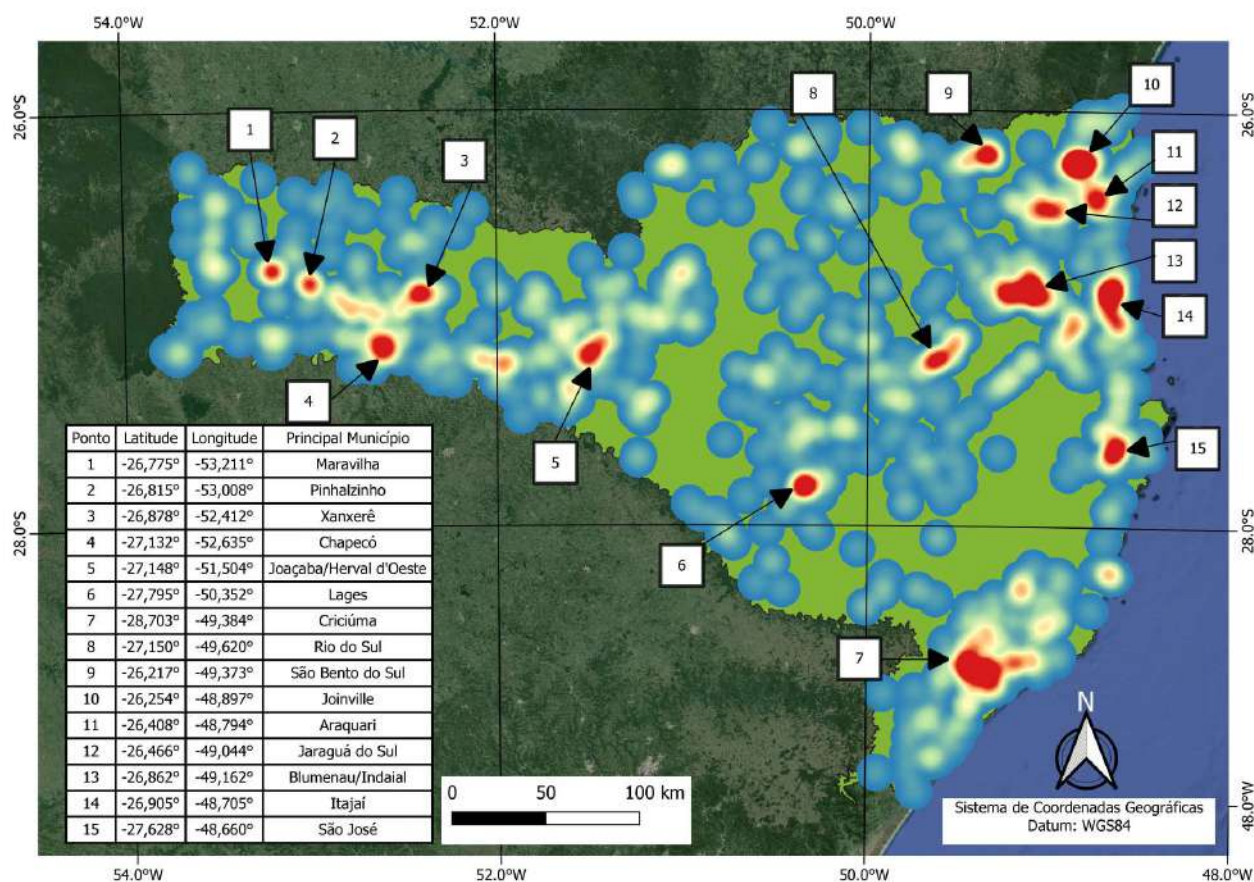
Foram relacionadas 51 (cinquenta e uma) atividades da Resolução CONSEMA 98/2017, dentre elas os códigos: 00.10.00, 00.10.01, 10.40.20 e assim por diante, até o código 71.90.02. Foram excluídas as atividades 47.10.10 e 71.40.02, por serem atividades potencialmente poluidoras móveis, assim não haveria pontos fixos para registrar.

A lista das atividades potencialmente poluidoras selecionadas está descrita detalhadamente no Anexo A.

Foram obtidos 1.398 cadastros de empresas em todo o Estado de Santa Catarina e criado um arquivo CSV (*Comma-separated values*) para armazenar os dados do número do processo, nome da empresa, e as coordenadas planas em UTM (*Universal Transversa de Mercator*).

Com as coordenadas planas foi gerado o Mapa de Calor de Kernel por meio do software QGIS®. A Figura 12 exibe o mapa resultante. As áreas destacadas em vermelho indicam locais com uma densidade elevada de empresas com potencial significativo de emissões atmosféricas, sugerindo um maior risco de poluição do ar nessas regiões.

Figura 12 – Mapa de Calor de Kernel, indicando em tons de vermelho as densidades de empresas com potencial de emissões poluentes



Elaboração: Autora

Há cerca de 15 (quinze) áreas de maior concentração, são elas:

- i. Oeste Catarinense: Região próxima a Maravilha [1], Pinhalzinho [2], Xanxerê [3], Chapecó [4], Joaçaba e Herval d'Oeste [5];
- ii. Serra Catarinense: Região próxima a Lages [6];
- iii. Sul Catarinense: Região próxima a Criciúma [7];
- iv. Vale do Itajaí: Região próxima a Rio do Sul [8], Blumenau, Indaial [13] e Itajaí [14];
- v. Norte Catarinense: Região próxima a São Bento do Sul [9], Joinville [10], Araquari [11] e Jaraguá do Sul [12]; e
- vi. Região metropolitana da capital: Região próxima a São José [15].

Esses quinze pontos são de suma importância nas etapas subsequentes deste estudo. Todas as referências feitas em gráficos, tabelas e no próprio texto aos “Pontos” se referem a estes locais específicos, permitindo a consulta a esta seção para verificar a localização de cada ponto, conforme necessário. A partir desses pontos, são coletadas as séries temporais dos poluentes atmosféricos.

4.1.2 Variáveis Meteorológicas

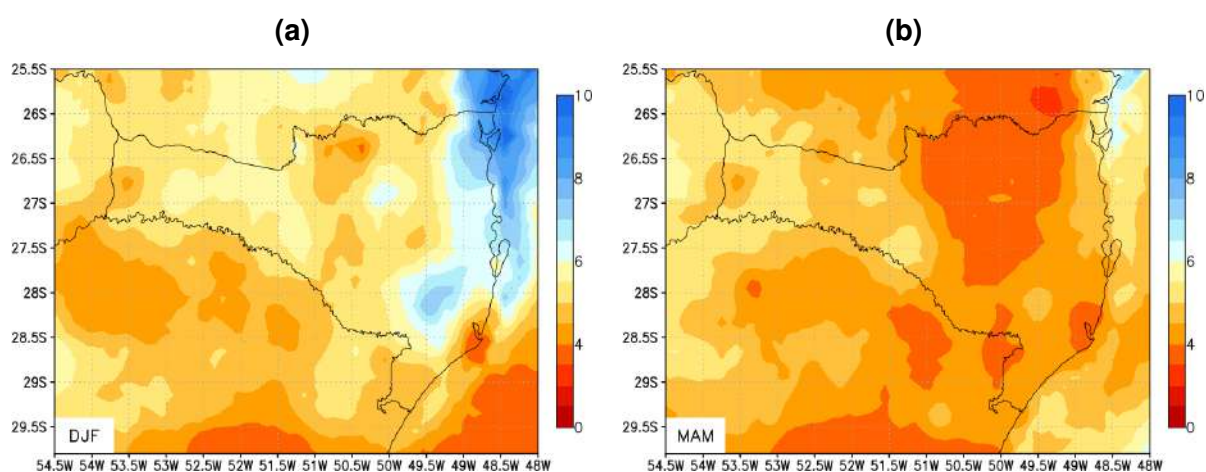
Os dados de precipitação, temperatura a 2 metros, ventos e altura da camada limite planetária são fornecidos como parte da análise, pois são variáveis meteorológicas que desempenham um papel significativo na interpretação do fenômeno da poluição do ar. Essas variáveis são apresentadas antes dos próprios dados de poluentes atmosféricos porque podem ser analisadas em conjunto com esses poluentes, oferecendo *insights* mais abrangentes sobre as condições ambientais que influenciam a qualidade do ar. Essa abordagem permite uma compreensão mais completa dos padrões de poluição e dos fatores ambientais associados.

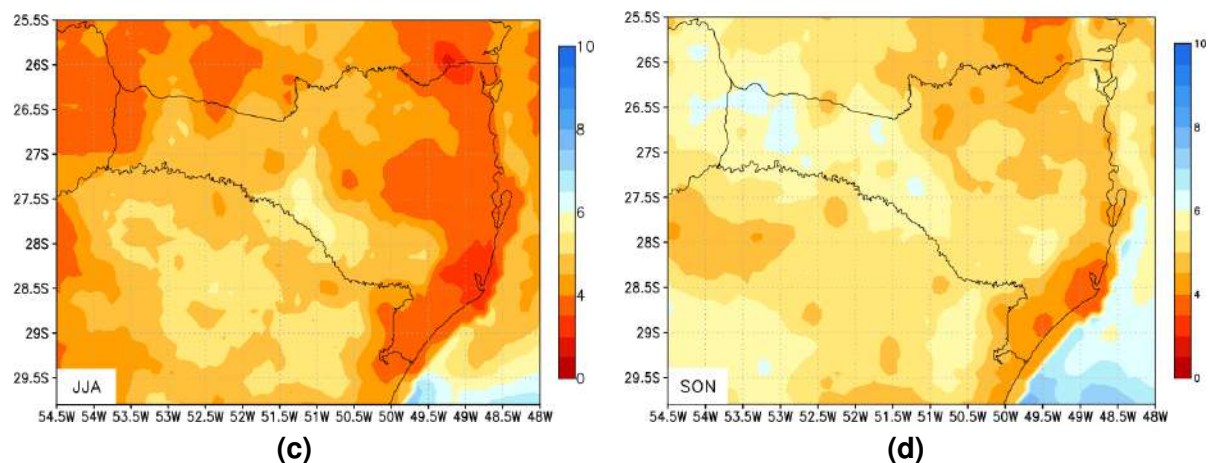
4.1.2.1 Precipitação

Os dados de Precipitação Média foram obtidos por meio da Reanálise MERGE (CPTEC/INPE). Os mapas sazonais correspondentes são ilustrados na Figura 13.

Uma análise dos mapas permite observar que o inverno (Figura 13c) foi a estação mais seca durante o período considerado, enquanto o verão foi a estação menos seca (Figura 13a).

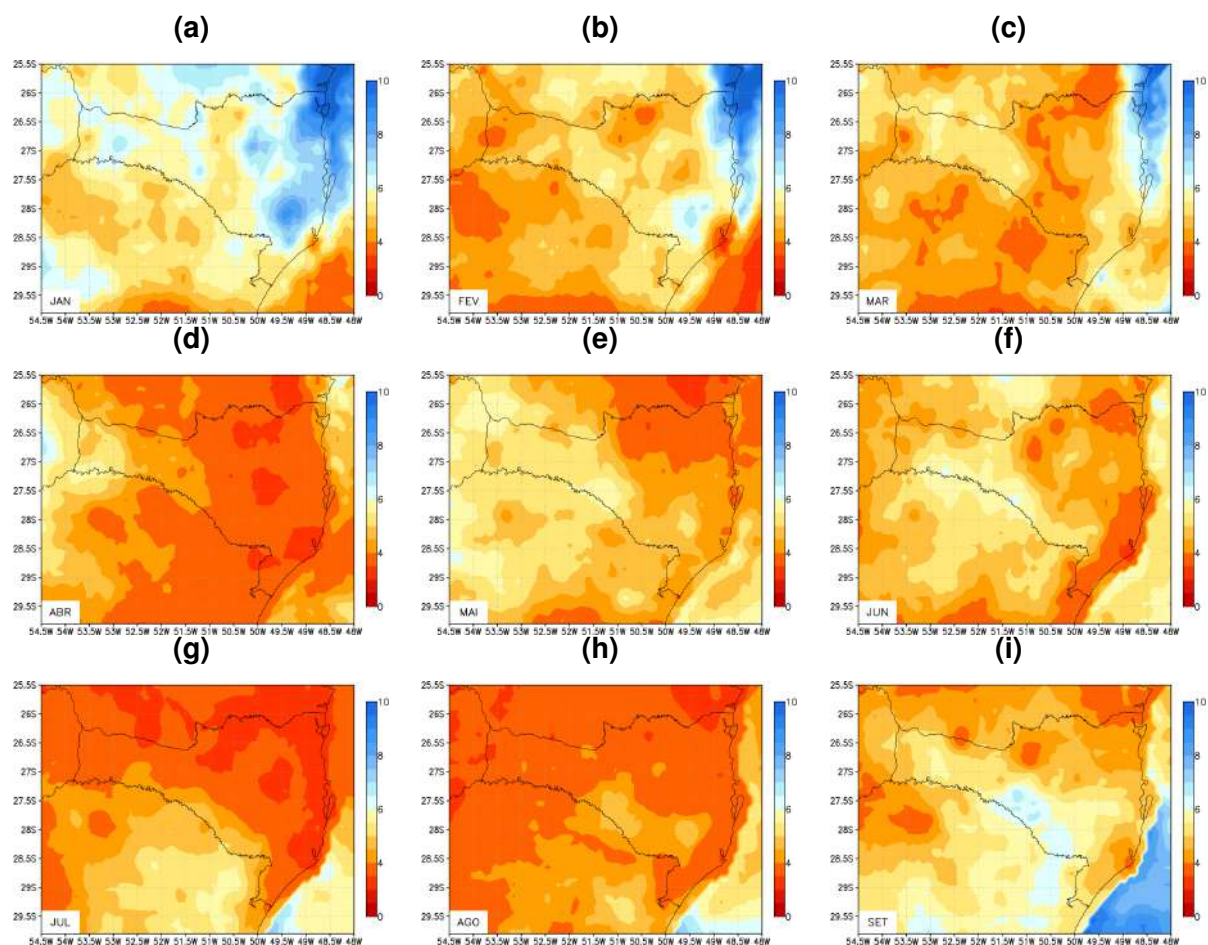
Figura 13 – Valores médios sazonais para Precipitação no período de 2008 a 2022, através de dados MERGE. Unidade: mm

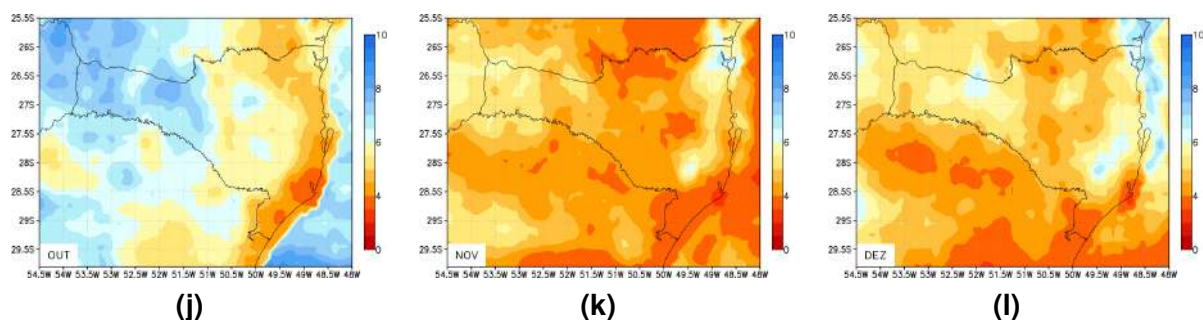




A Figura 14 apresenta a climatologia mensal de precipitação média referente ao período de 15 anos, destacando julho (Figura 14g) como o mês mais seco, seguido por agosto (Figura 14h) e abril (Figura 14d), enquanto dezembro (Figura 14i) representa o mês menos seco.

Figura 14 – Valores médios mensais para Precipitação, no período de 2008 a 2022, através de dados MERGE. Unidade: mm



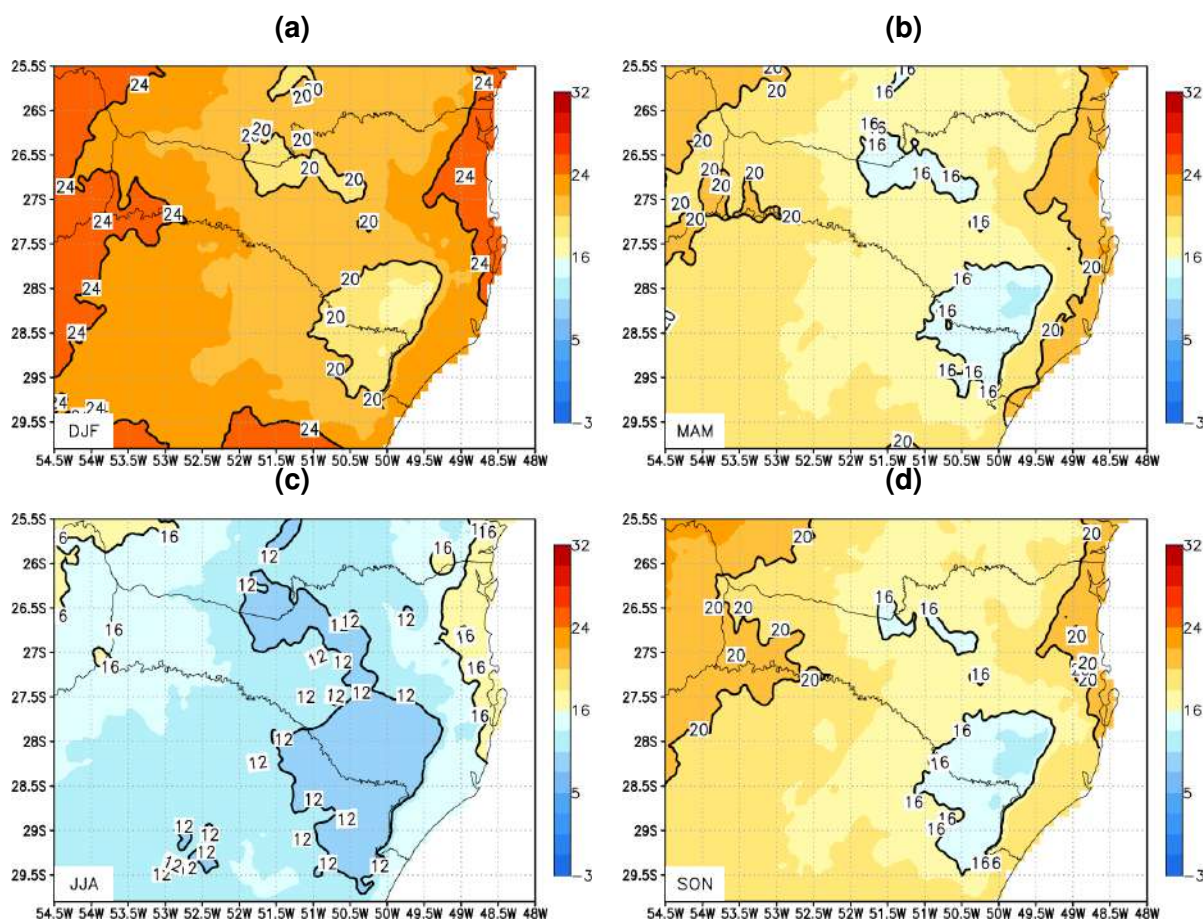


4.1.2.2 Temperatura a 2 metros

Para a Temperatura a 2 metros foram obtidos dados do SAMeT. Os mapas sazonais são mostrados na Figura 15.

Uma análise dos mapas permite observar as estações bem definidas em termos de temperatura. Sendo o verão a estação mais quente (Figura 15a), enquanto que o inverno a estação mais fria (Figura 15c). As Figuras 15b e 15d apresentaram mapas semelhantes em termos de temperatura.

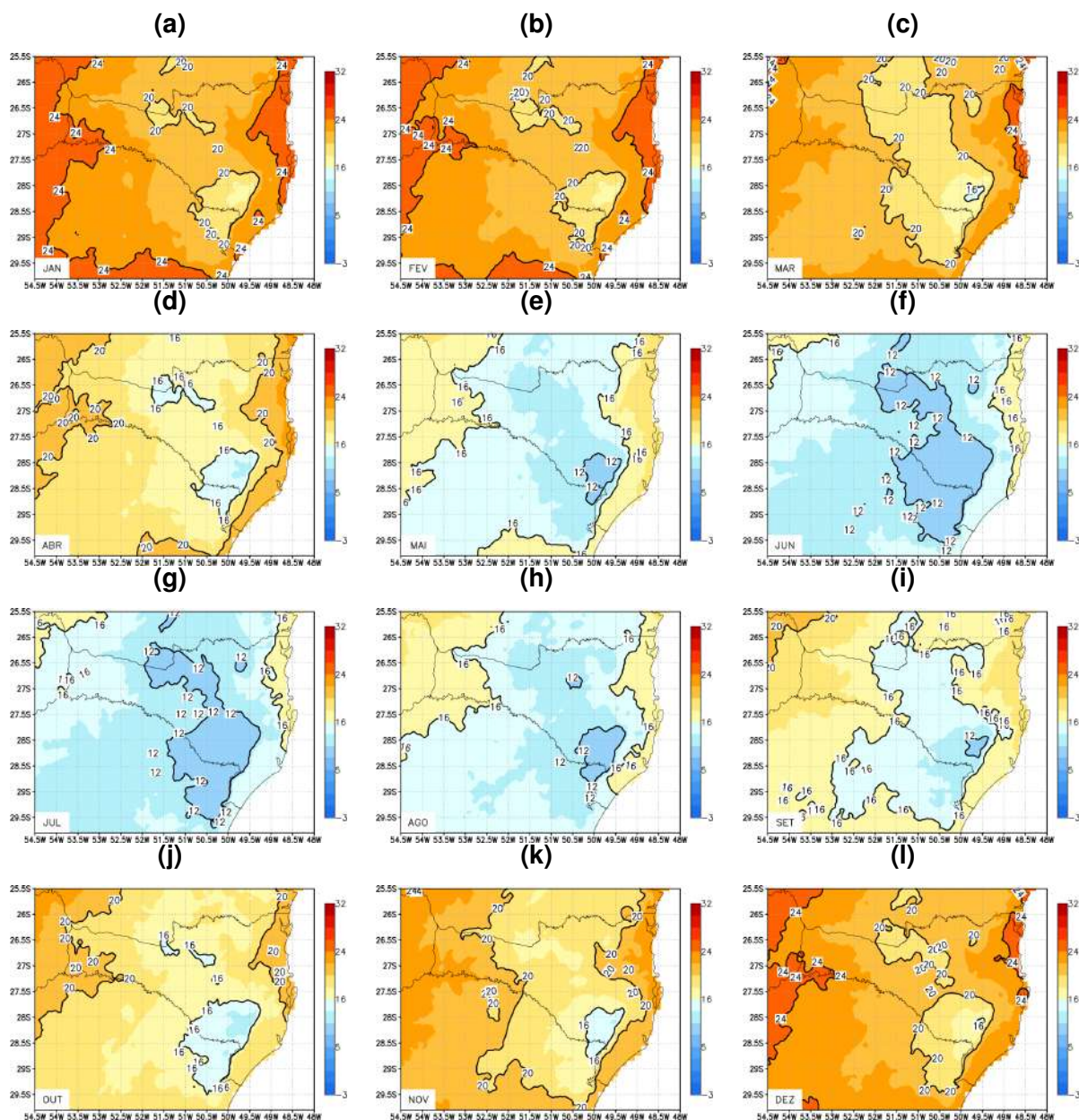
Figura 15 – Valores médios sazonais para Temperatura a 2 metros no período de 2008 a 2022, através de dados SAMeT. Unidade: °C



A Figura 16 apresenta a climatologia mensal de temperatura a 2 metros referente ao período de 15 anos, destacando dezembro, janeiro e fevereiro (Figuras

16l, 16a e 16b) como os meses mais quentes, enquanto junho e julho (Figuras 16f e 16g) como os meses com temperaturas mais baixas.

Figura 16 – Valores médios mensais para Temperatura a 2 metros, no período de 2008 a 2022, através de dados SAMET. Unidade: °C



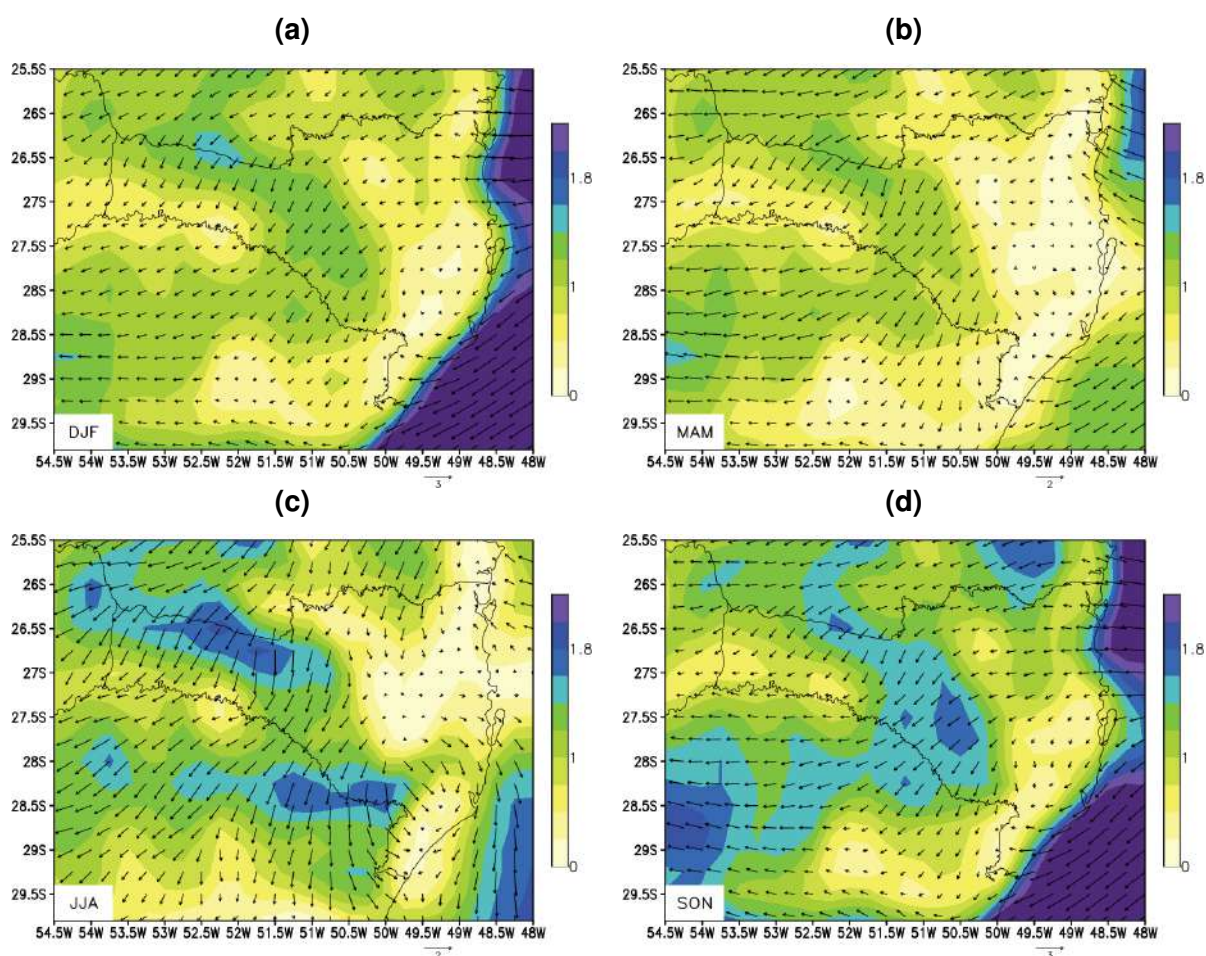
4.1.2.3 Vento

Durante o curso do estudo, os ventos são examinados em vários níveis de pressão atmosférica, variando de 800 a 1000 hPa, com intervalos de aumento de 25 hPa (por exemplo: 800, 825, 850 hPa, etc.). Em situações específicas, esses dados são apresentados para análise.

Nesse item, será mostrado apenas o Vento a 10 metros, cujos dados foram obtidos da Reanálise ERA5. Os mapas sazonais são mostrados na Figura 17.

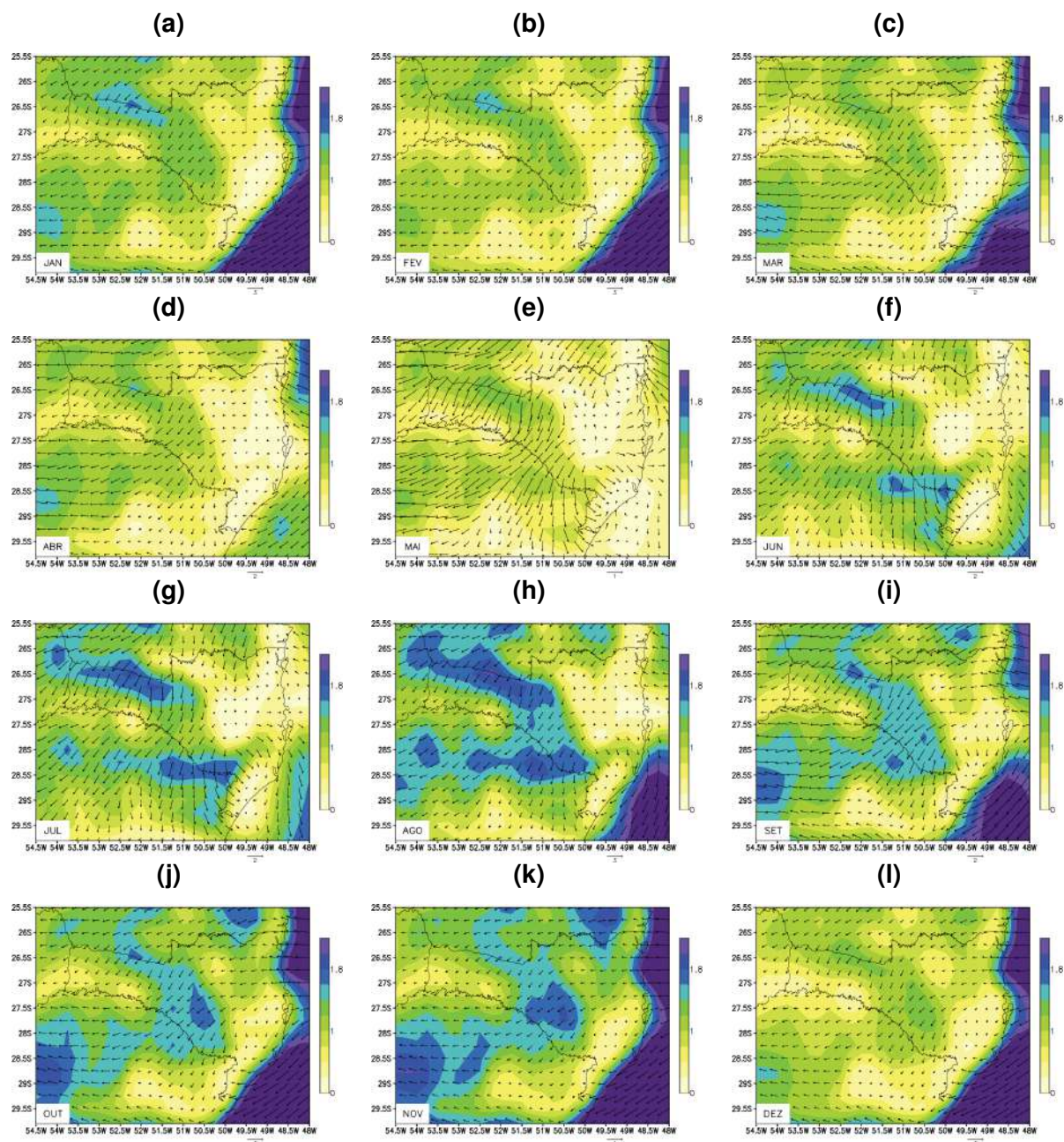
O mapa da Figura 17a ilustra os ventos da região oeste de Santa Catarina como os mais intensos e oriundos de norte e nordeste, e a parte litorânea com ventos mais calmos. Já o mapa da Figura 17b é semelhante ao anterior, tendo apenas uma área maior de calmaria na região litorânea. O comportamento é alterado no inverno (Figura 17c) com aumento da intensidade dos ventos no oeste. No centro oeste apresenta aumento na estação da primavera (Figura 17d).

Figura 17 – Valores médios sazonais para Vento a 10 metros, no período de 2008 a 2022, através de dados de Reanálise ERA5. Unidade: $m s^{-1}$

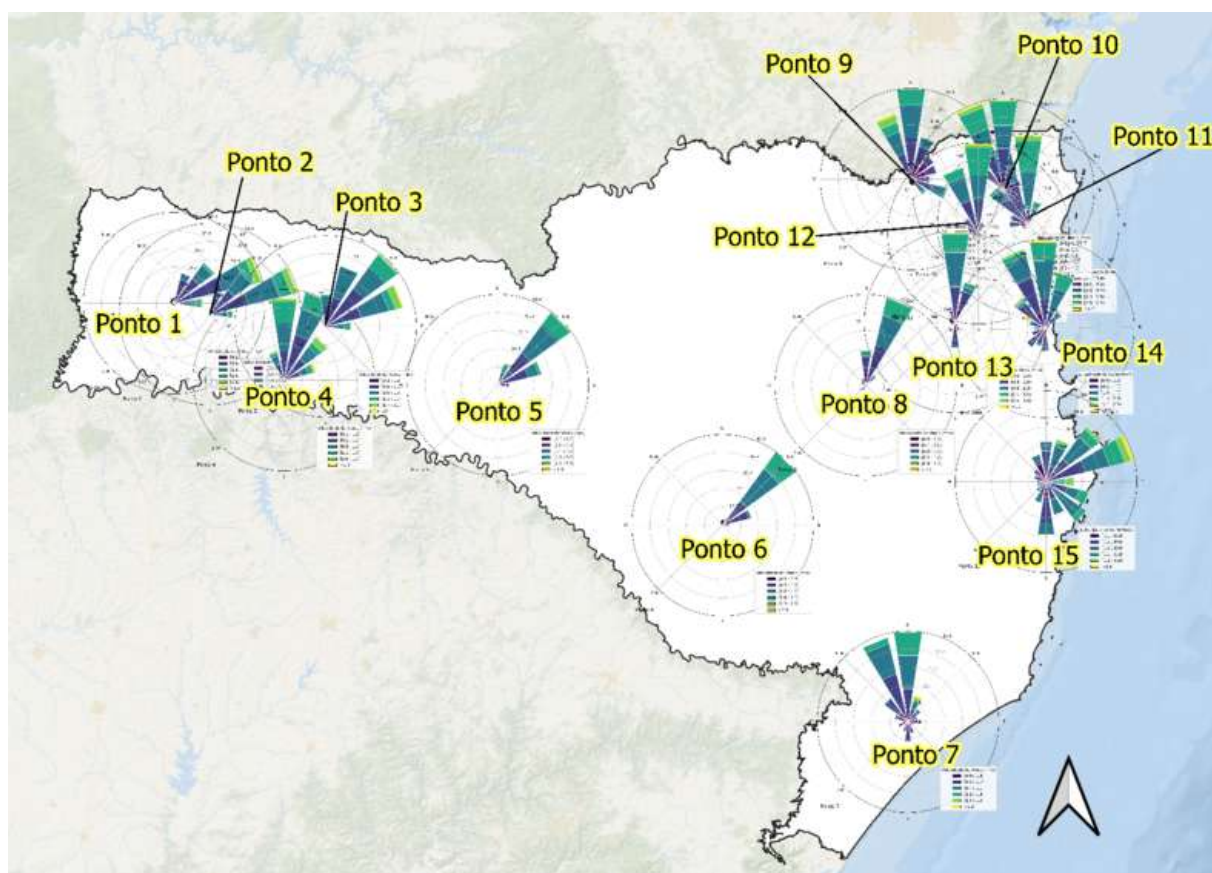


A Figura 18 ilustra a climatologia mensal de Vento a 10 metros durante o período de 15 anos. Ao analisar os mapas, é possível observar que o ano pode ser dividido em seis meses caracterizados por ventos relativamente calmos e seis meses por ventos mais intensos. A intensidade começa a aumentar em junho (Figura 18f) e vai até novembro nessa condição (Figura 18k). De dezembro (Figura 18l) a maio (Figura 18e) o período é marcado por uma calmaria relativa.

Figura 18 – Valores médios mensais para Vento a 10 metros, no período de 2008 a 2022, através de dados de Reanálise ERA5. Unidade: $m s^{-1}$

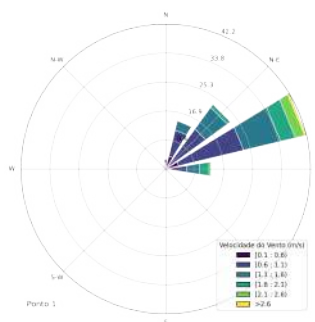
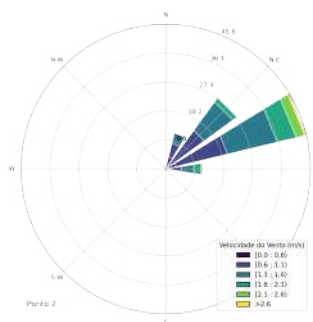
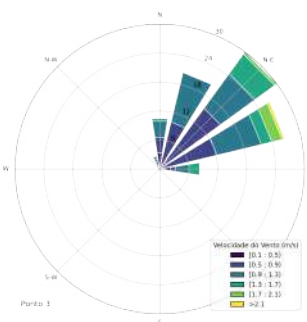


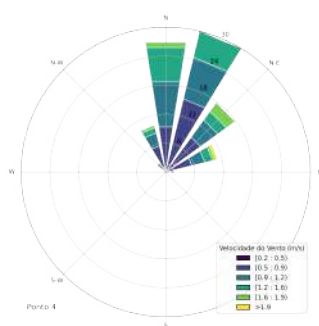
A Figura 19 apresenta os diagramas de Rosa dos Ventos nos 15 pontos de amostragem considerados dentro do Estado de Santa Catarina.

Figura 19 – Diagramas de rosa dos ventos

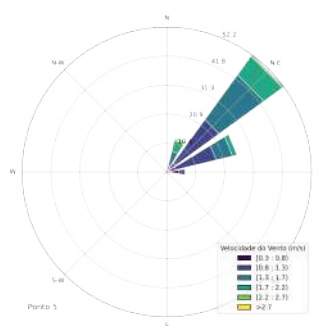
Elaboração: Autora. Fonte: ERA5

Para melhor ilustração, os diagramas de rosa dos ventos são apresentados individualmente para todos os pontos na Figura 20. A análise dos diagramas revela a predominância dos ventos provenientes do norte e nordeste na região durante o período avaliado.

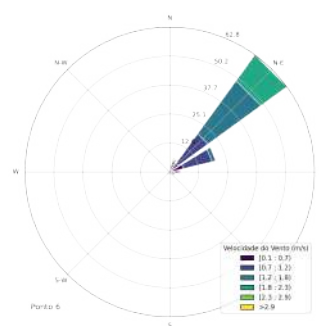
Figura 20 – Diagramas de rosa dos ventos, no período de 2008 a 2022, através de dados de Reanálise ERA5. Unidade: $m s^{-1}$ **(a) Ponto 1****(b) Ponto 2****(c) Ponto 3**



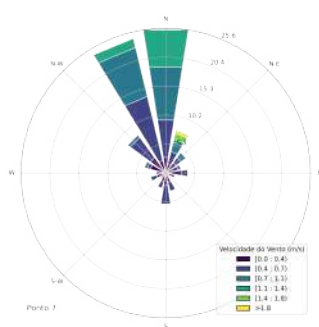
(d) Ponto 4



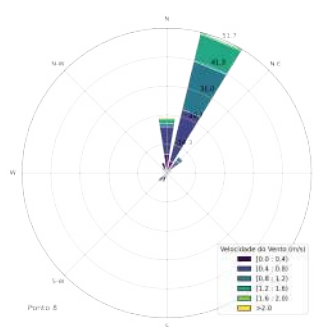
(e) Ponto 5



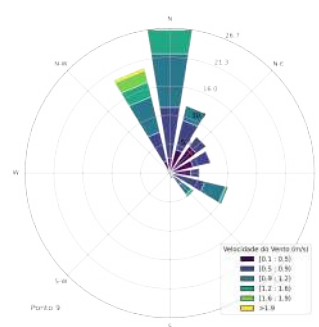
(f) Ponto 6



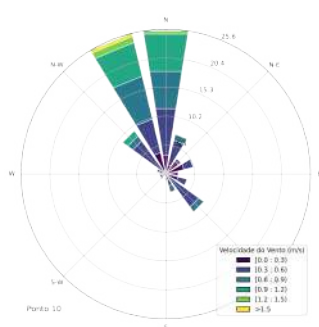
(g) Ponto 7



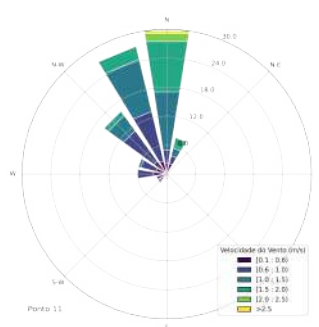
(h) Ponto 8



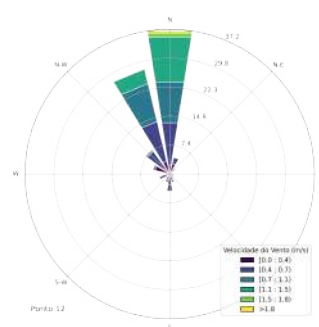
(i) Ponto 9



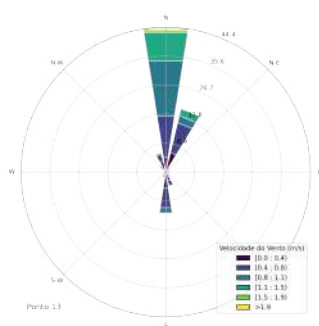
(j) Ponto 10



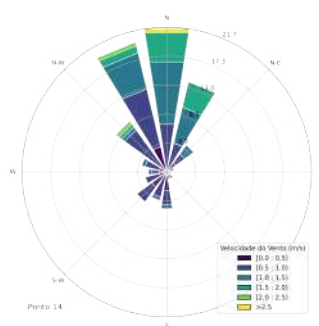
(k) Ponto 11



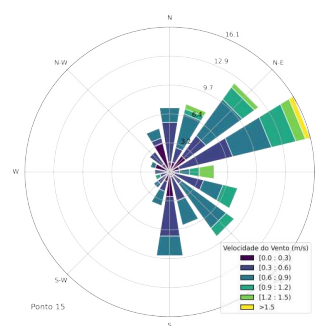
(l) Ponto 12



(m) Ponto 13



(n) Ponto 14



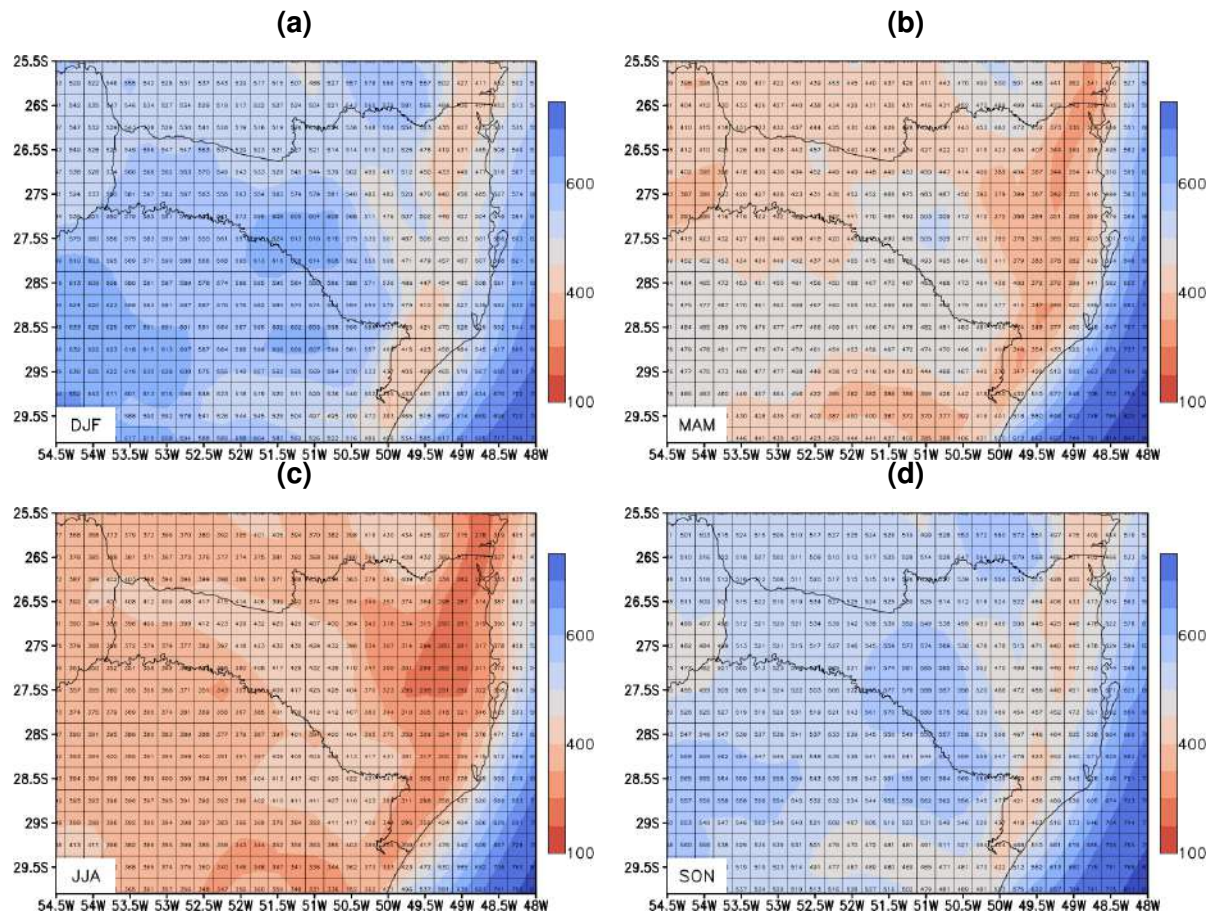
(o) Ponto 15

4.1.2.4 Altura da Camada Limite Planetária

Para a altura da Camada Limite Planetária (CLP) foram obtidos dados de Reanálise ERA5. Os mapas sazonais são mostrados na Figura 21.

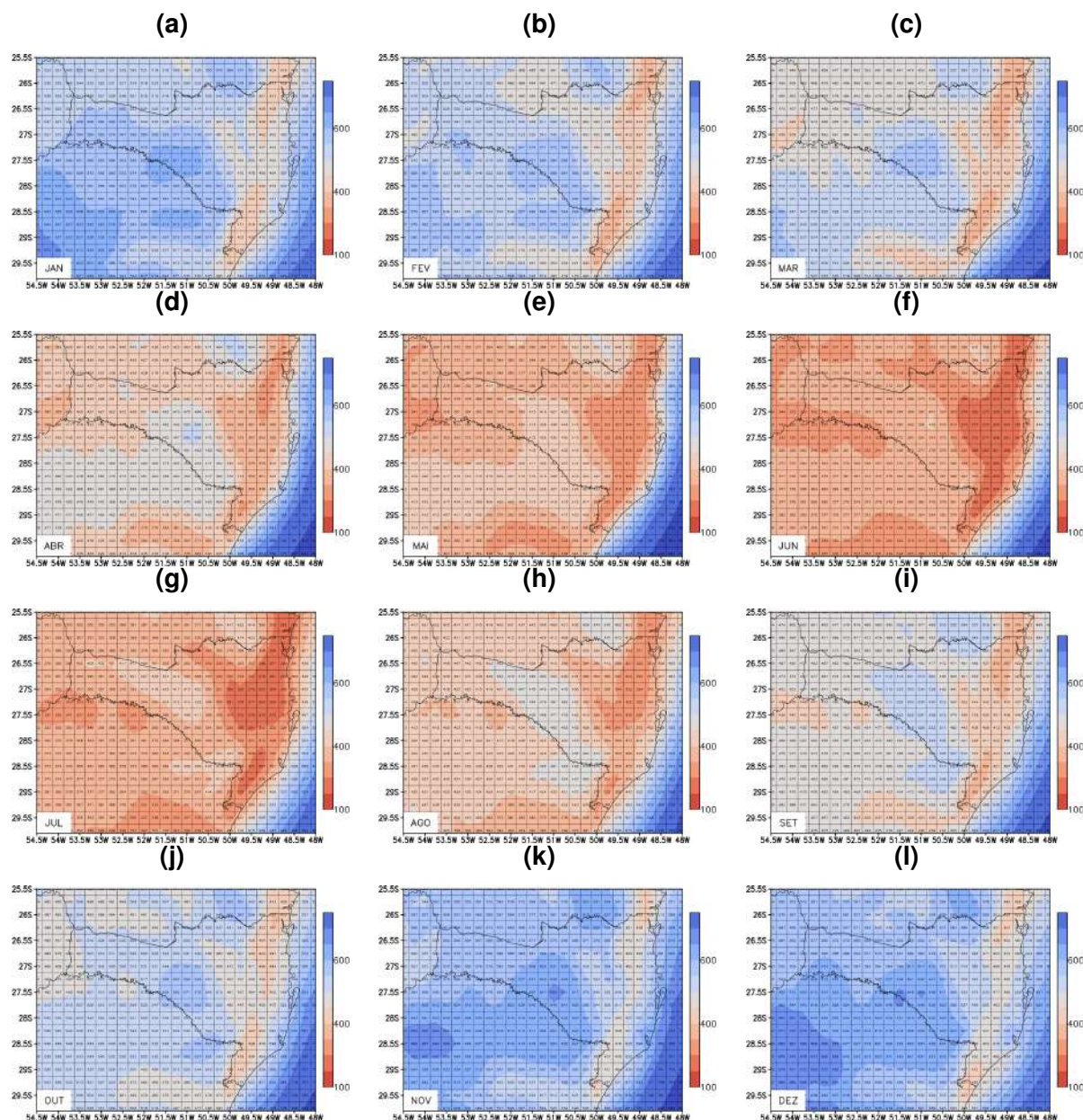
A CLP é mais alta no verão (Figura 21a) e na primavera (Figura 21d). É mais baixa no outono (Figura 21b) e no inverno (Figura 21c), isso se deve à convecção, que eleva a CLP.

Figura 21 – Valores médios sazonais para Altura da Camada Limite no período de 2008 a 2022, através de dados de Reanálise ECMWF v5 (ERA5). Unidade: m



A Figura 22 ilustra a climatologia mensal da CLP durante o período de 15 anos. Ao analisar os mapas, é possível observar que junho (Figura 22f) e julho (Figura 22g) são os meses que apresentam os menores valores, enquanto que novembro, dezembro e janeiro (Figuras 22k, 22l e 22a), apresentam os maiores valores.

Figura 22 – Valores médios mensais para a Altura da Camada Limite, no período de 2008 a 2022, através de dados de Reanálise ECMWF v5 (ERA5). Unidade: °C



4.1.3 Variável Climática

4.1.3.1 Oceanic Niño Index

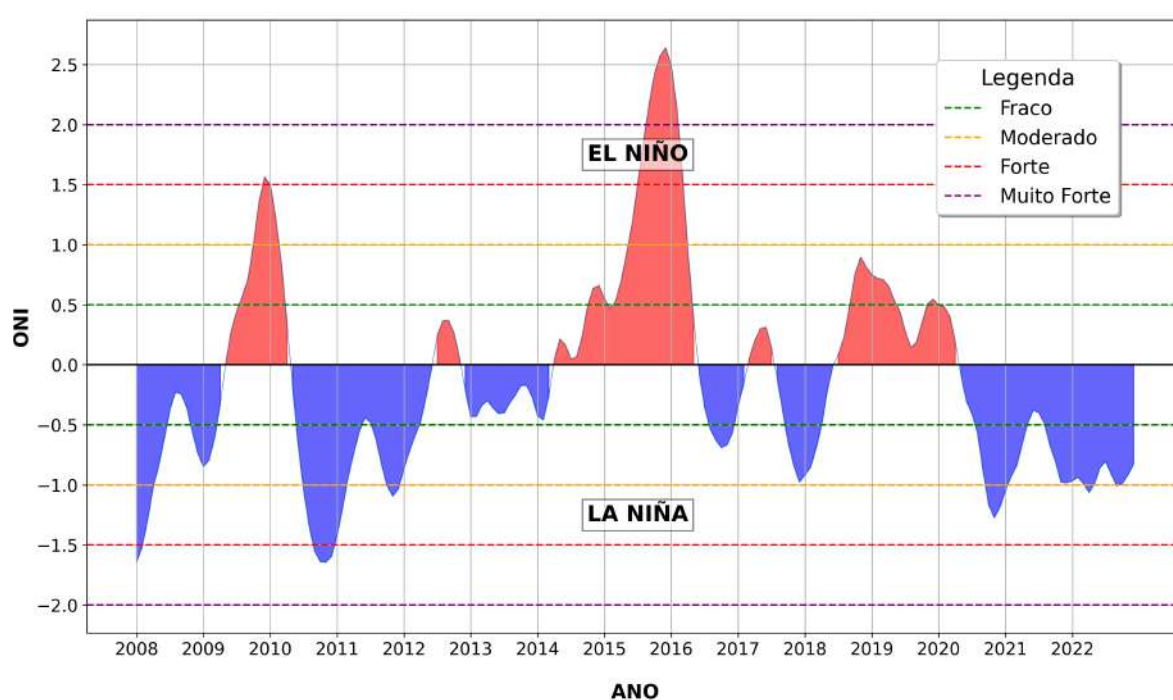
De acordo com Trenberth & Stepaniak (2001), ONI significa “*Oceanic Niño Index*”, que é um índice usado para monitorar e caracterizar o fenômeno *El Niño* Oscilação Sul (ENOS). O ONI é calculado com base nas anomalias de temperatura da superfície do mar (TSM) nas regiões centrais e leste do Oceano Pacífico equatorial. Ele fornece uma medida objetiva da intensidade e da fase do *El Niño* ou *La Niña*, que são os dois extremos do fenômeno ENOS. O ONI é uma ferramenta valiosa para prever padrões climáticos globais e seus impactos em diferentes regiões do mundo.

No contexto da poluição atmosférica, é estabelecido que períodos de esti-

agem prolongada tendem a agravar os níveis de poluentes. A ocorrência de *La Niña*, tem sido associada à estiagem na região Sul do Brasil (Penalba & Rivera, 2016). A análise do período de 2008 a 2022, conforme ilustrado na Figura 23, revela eventos de *La Niña* de diferentes intensidades, como *La Niña* de nível fraco em 2009, 2016 e 2018, *La Niña* de nível moderado no final de 2011, no final de 2020 e início de 2022, e, por fim, *La Niña* de nível forte em 2008 e no final de 2010.

Nos gráficos apresentados ao longo deste trabalho, observar-se-ão aumentos significativos nos níveis de poluentes nos períodos de 2010/2011 e 2021/2022, provavelmente influenciados pelo fenômeno *La Niña*.

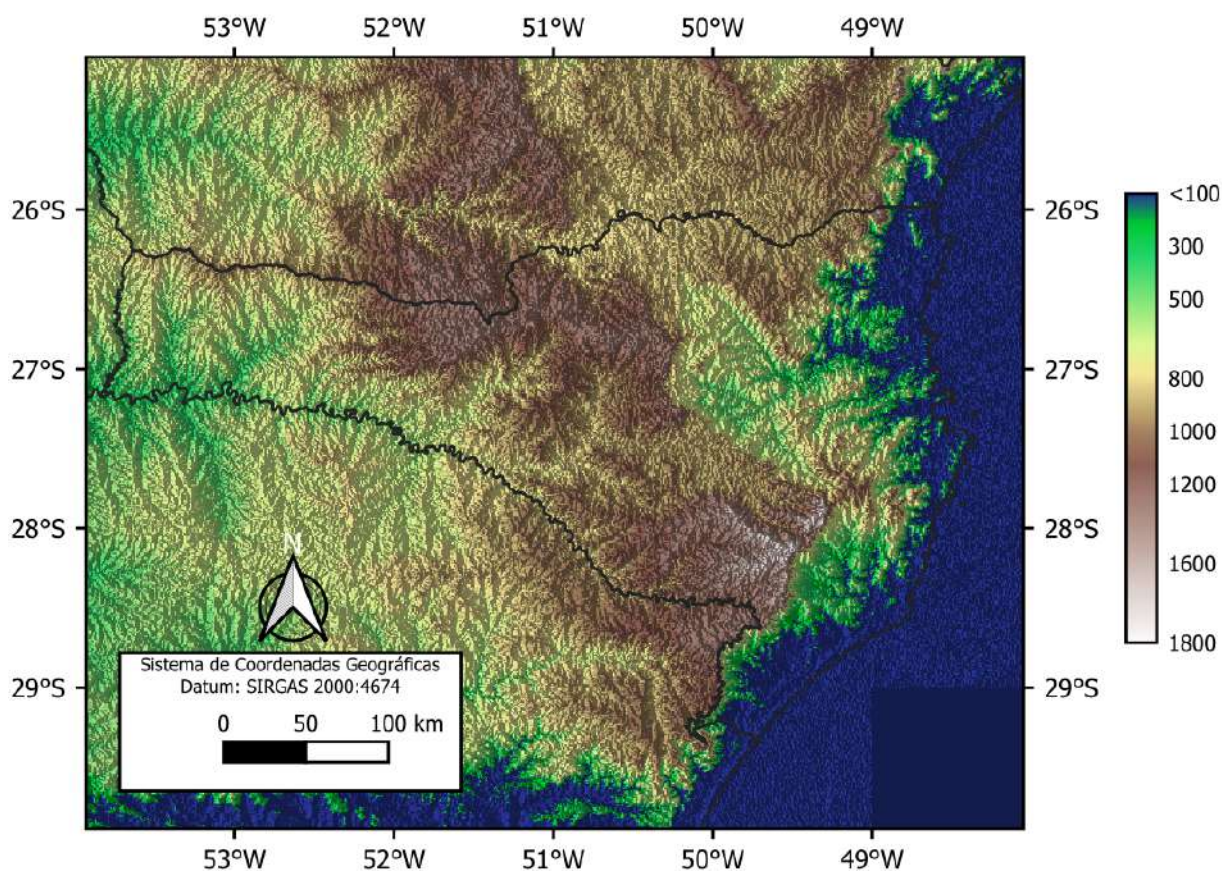
Figura 23 – Oceanic Niño Index



Fonte: (NOAA, 2022a). Elaboração: Autora

4.1.4 Mapa Hipsométrico

Na Figura 24 é apresentado o mapa hipsométrico do Estado de Santa Catarina. O mapa fornece uma representação da topografia da região, destacando as variações altimétricas. A análise hipsométrica é crucial para compreender a distribuição altitudinal, que influencia diretamente a dispersão e a concentração de poluentes atmosféricos. As características topográficas, como vales e montanhas, podem afetar os padrões de circulação do ar, facilitando ou dificultando a dissipação de poluentes. Portanto, o mapa é uma ferramenta essencial para estudos relacionados à poluição atmosférica, auxiliando na identificação de áreas potencialmente mais vulneráveis à acumulação de poluentes e na elaboração de estratégias de mitigação ambiental.

Figura 24 – Mapa Hipsométrico

Elaboração: Autora. Fonte: Base de dados TOPODATA (INPE)

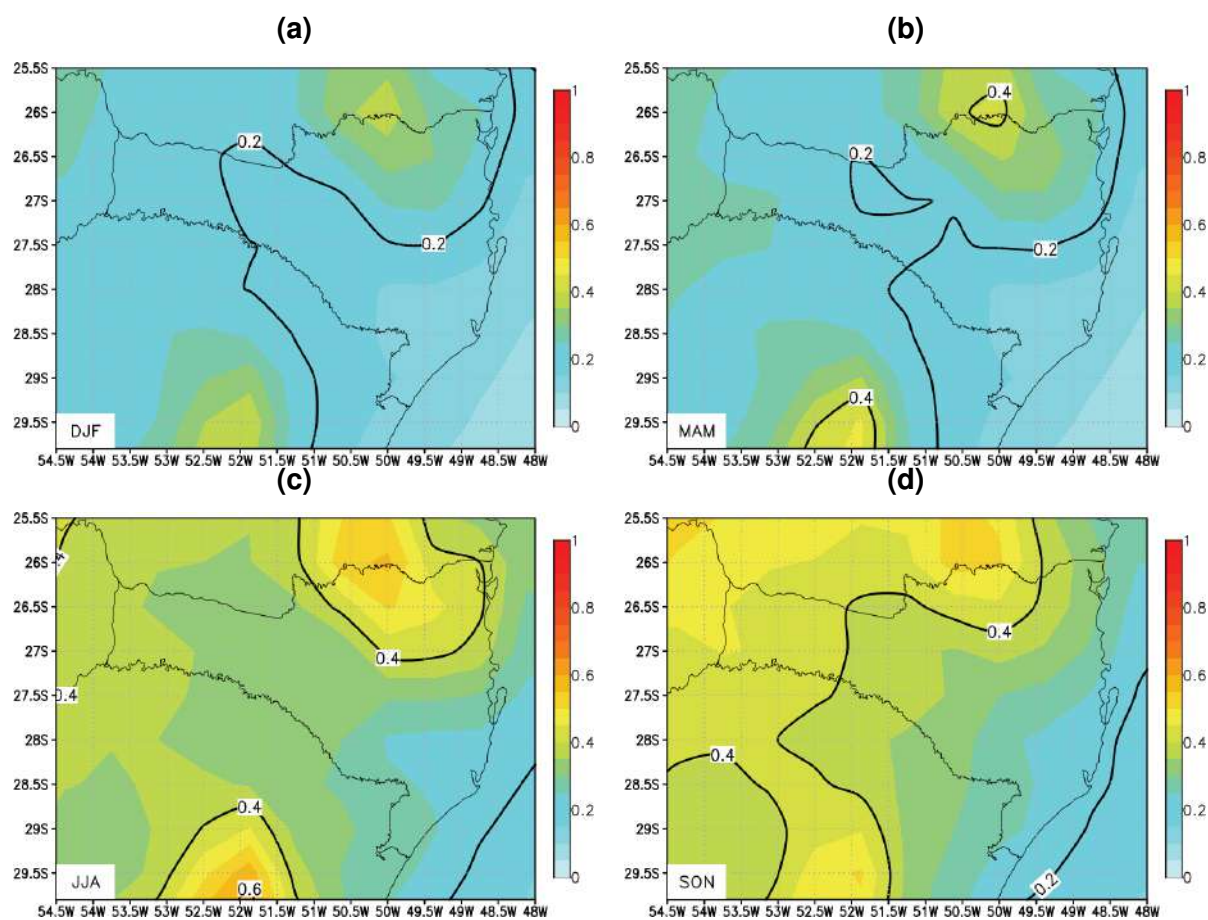
4.1.5 Composição troposférica de poluentes

4.1.5.1 Particulados

Para os particulados foram obtidos dados de *Black Carbon*¹ (Carbono Negro), *Dust* (Poeira), *Dust MP_{2,5}*, Sal Marinho, Sulfato (SO_4) e Carbono Orgânico, todos ao nível da superfície. Os dados são de Reanálise MERRA-2. Os mapas sazonais são mostrados na Figura 25. Sendo SON (Figura 25d) a estação com maiores valores, abrangendo uma área maior, seguido de JJA, MAM e DJF (Figuras 25c, 25b e 25a, respectivamente).

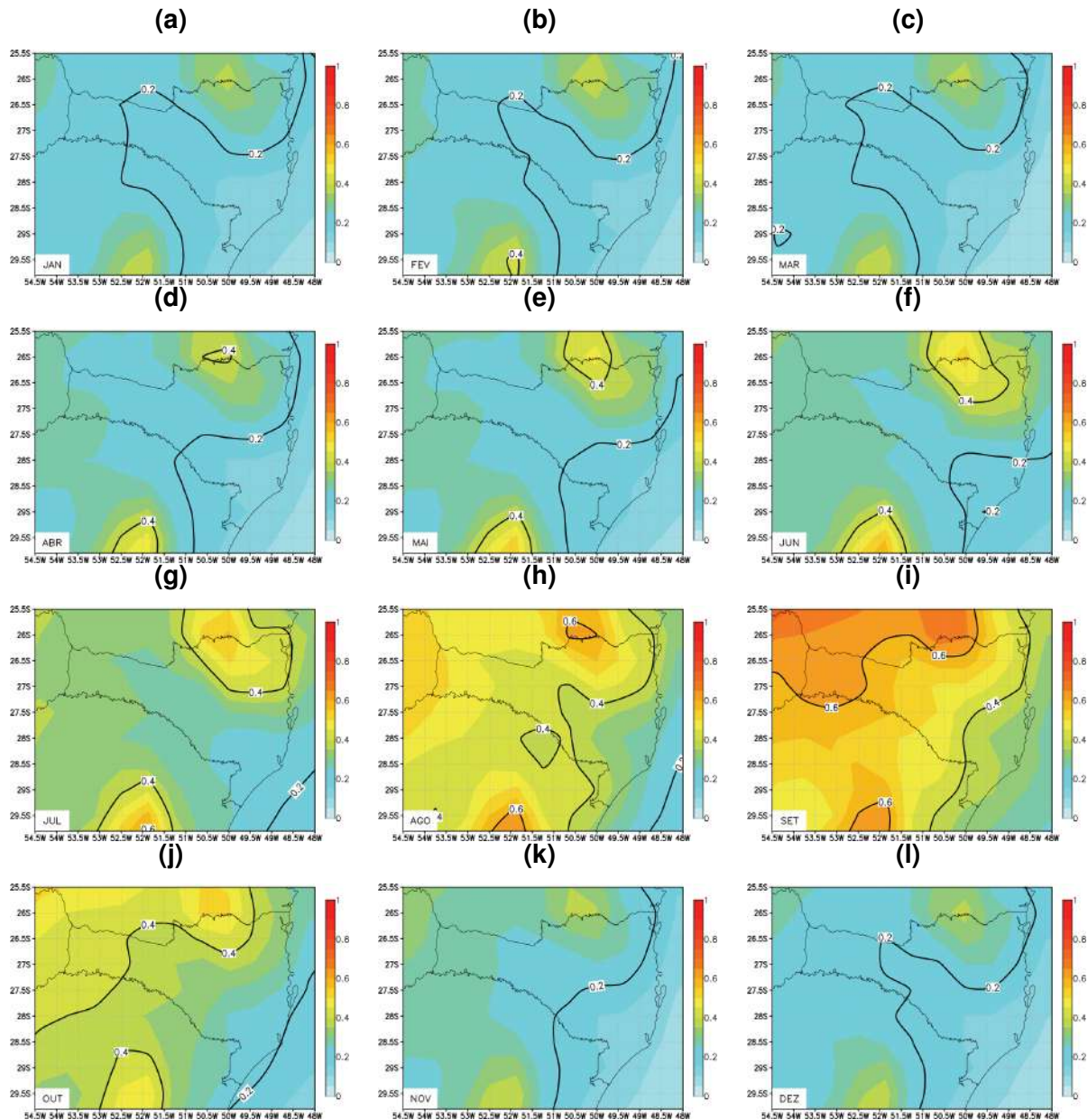
¹ Black Carbon: Um termo definido operacionalmente que descreve o carbono medido pela absorção de luz. Como tal, não é o mesmo que carbono elementar, que normalmente é monitorado com métodos óptico-térmicos. Fonte: WHO (2021)

Figura 25 – Valores médios sazonais para *Black Carbon* no período de 2008 a 2022, através da Reanálise MERRA-2. Unidade: $\mu g m^{-3}$



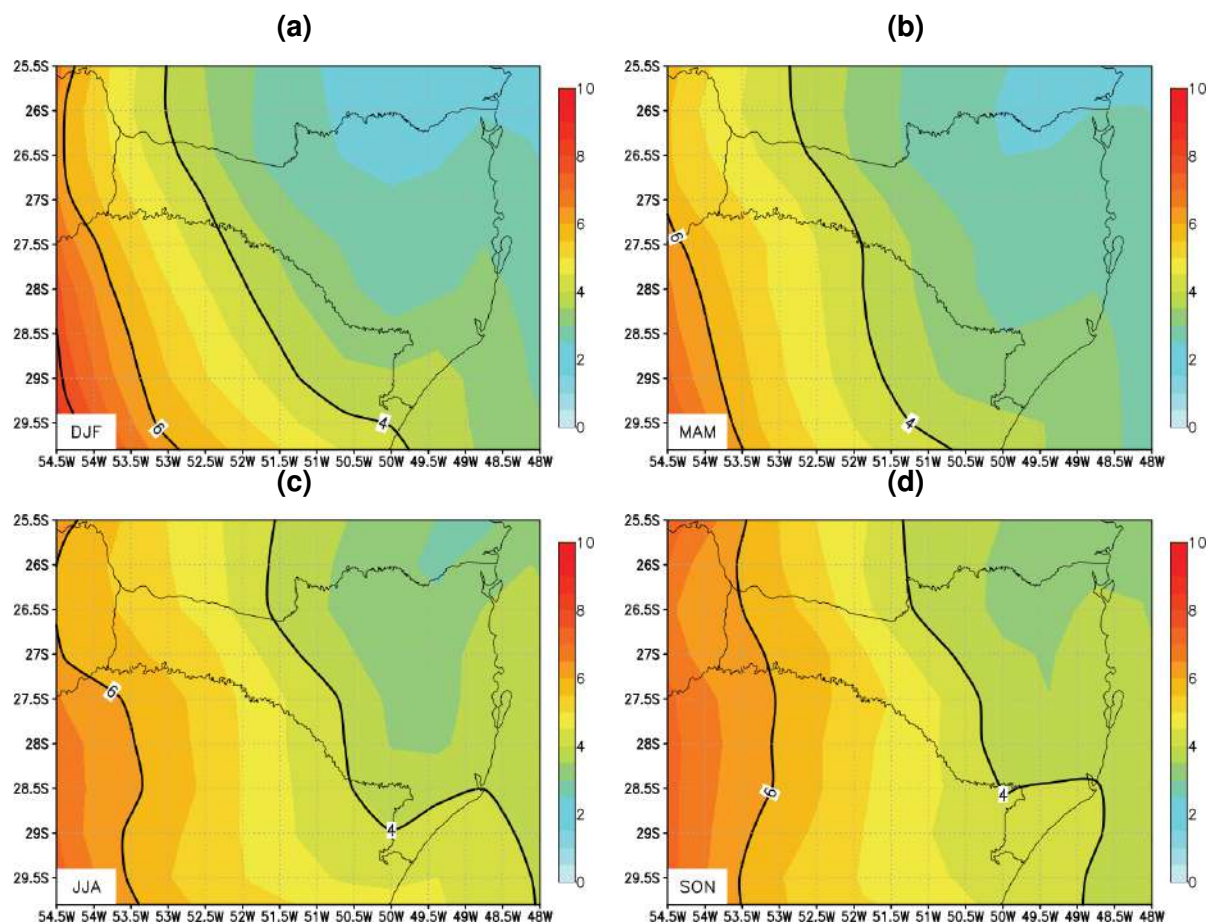
A Figura 26 apresenta a climatologia mensal referente ao período de 15 anos, destacando setembro (Figura 26i) como o mês com os valores mais elevados de *Black Carbon*, seguido por agosto (Figura 26h), enquanto dezembro (Figura 26l) e janeiro (Figura 26a) registram os valores mais baixos.

Figura 26 – Valores médios mensais para *Black Carbon* no período de 2008 a 2022, através da Reanálise MERRA-2. Unidade: $\mu g m^{-3}$



A análise dos mapas apresentados na Figura 27 evidencia uma maior concentração do poluente *Dust* durante os períodos de primavera (SON) e inverno (JJA). Em comparação com os dados de *Black Carbon* discutidos anteriormente, verifica-se que a escala de concentração do Dust é dez vezes superior. Ademais, nota-se um aumento progressivo da concentração do poluente da direita para a esquerda, seguindo uma direção longitudinal de leste para oeste.

Figura 27 – Valores médios sazonais para *Dust* (Poeira) no período de 2008 a 2022, através da Reanálise MERRA-2. Unidade: $\mu\text{g m}^{-3}$



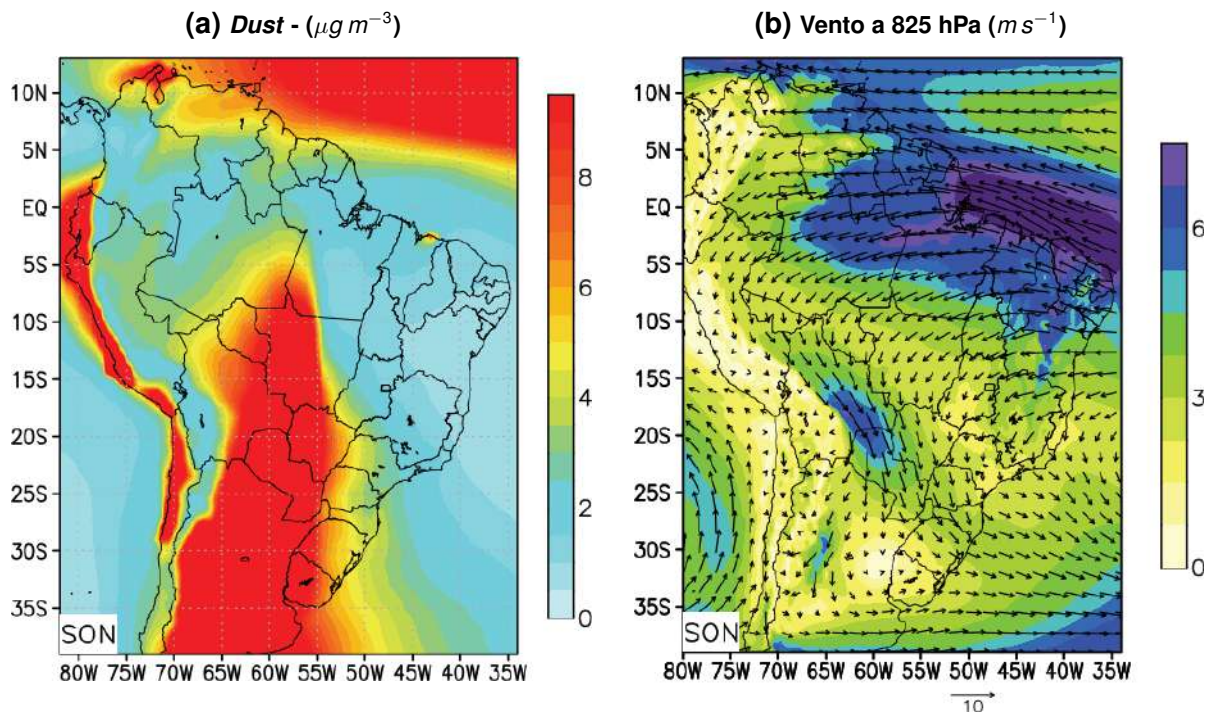
Dado que o recorte dos mapas na Figura 27 fornece informações limitadas sobre a região, torna-se necessário ampliar a área de estudo. Assim, a Figura 28 apresenta a América do Sul durante o período da primavera (SON). No Apêndice G, são disponibilizados os mapas sazonais, bem como os 12 mapas de climatologia mensal para a América do Sul.

Analisando os mapas da Figura 28 e conforme diversos estudos que investigaram a emissão de poeira na América do Sul, como Prospero et al. (2002) e Ginoux et al. (2012), apontaram várias causas principais: processos naturais, como a erosão do solo, atividades vulcânicas e o transporte de poeira do deserto. Observa-se que a produção de poeira no Estado de Santa Catarina não tem origem interna significativa, mas sim externa. Essas partículas são transportadas das regiões Norte e Centro-Oeste do Brasil para o Sul e Sudeste. Com um tempo de vida maior na atmosfera em comparação aos gases poluentes e, por estarem em estado sólido, essas partículas apresentam maior persistência durante o transporte atmosférico. Esse processo se intensifica nos meses de agosto, setembro e outubro, período marcado pelo aumento das queimadas no Norte e Centro-Oeste do país, levando poluentes atmosféricos em direção ao Sul e Sudeste.

A Figura 28a apresenta a distribuição de *Dust* durante a primavera, enquanto a Figura 28b ilustra a predominância dos ventos também na mesma estação para o período de 15 anos (climatologia). Observa-se que os ventos predominantes são provenientes das direções norte e noroeste (Amazônia), podendo transportar partículas através dos Jatos de Baixos Níveis (JBNs).

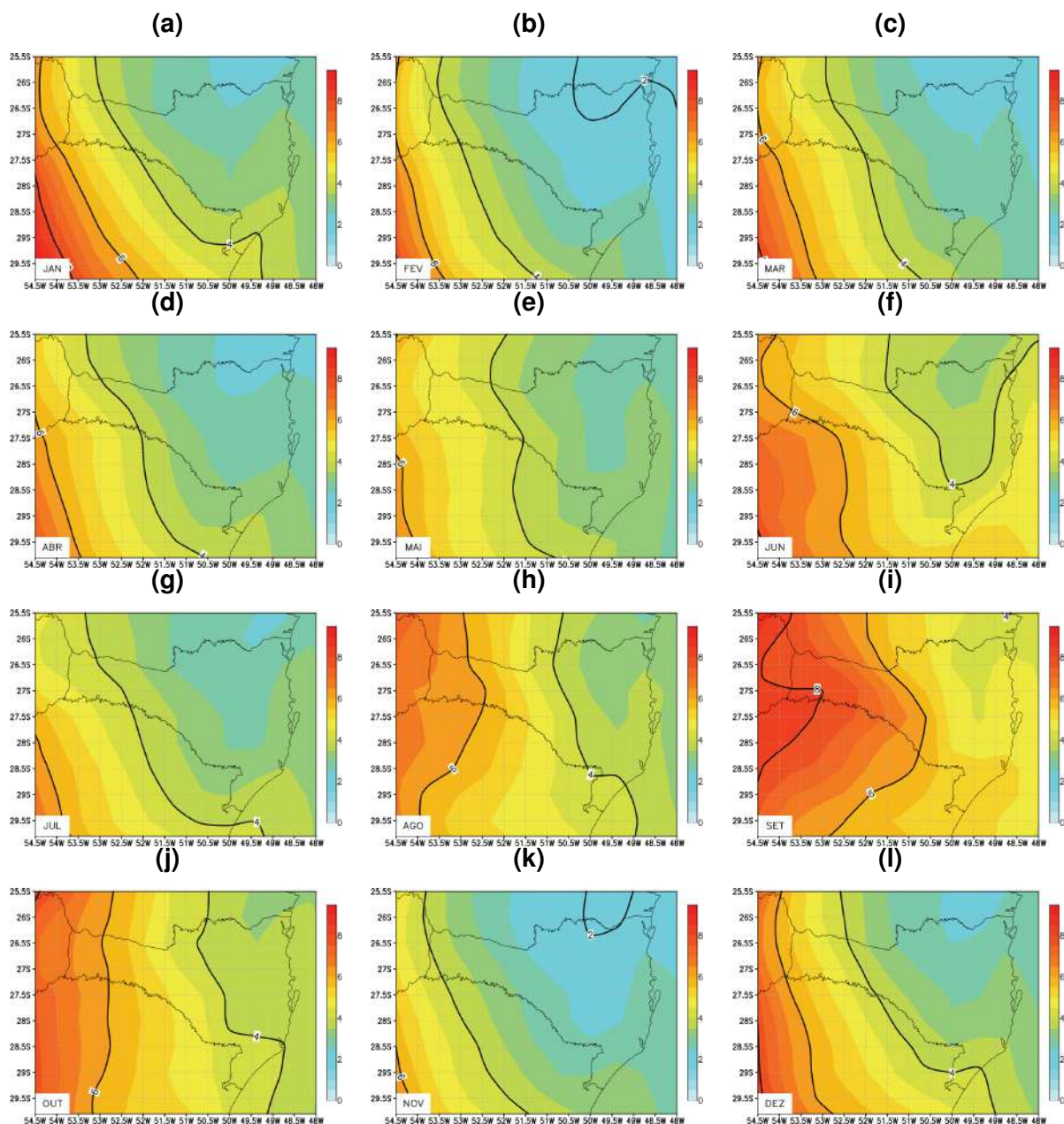
A pressão atmosférica de 825 hPa (Aproximadamente 1.600 metros de altitude) foi selecionada por ser representativa de todo o Estado de Santa Catarina e por estar dentro dos limites médios da Camada Limite Planetária (CLP). A altura média da CLP e o mapa hipsométrico podem ser vistos nos itens 4.1.2.4 e 4.1.4, respectivamente.

Figura 28 – *Dust* e Vento na América do Sul em SON no período de 2008 a 2022



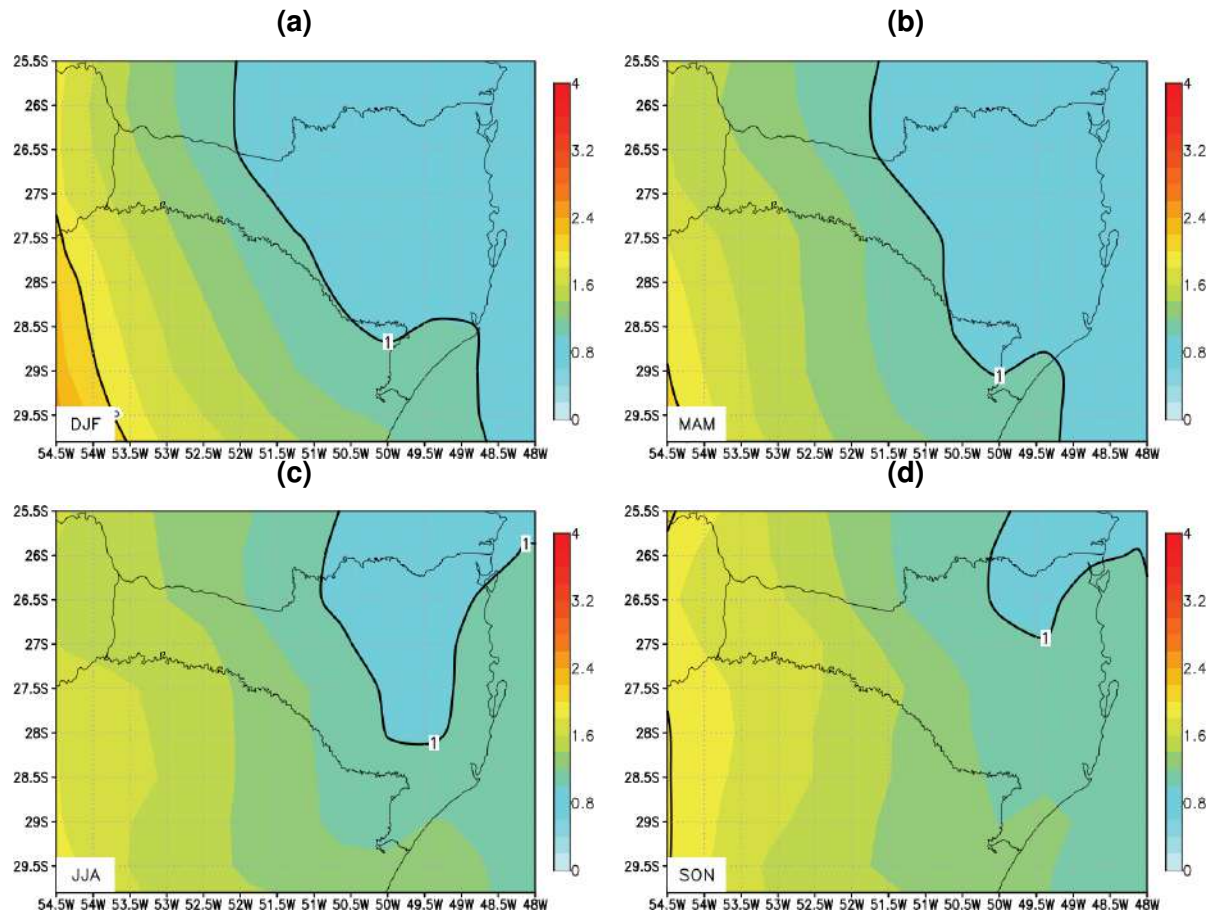
A climatologia mensal de *Dust* para os 15 anos é então realizada, conforme demonstrado na Figura 29, destacando setembro (Figura 29i) como o mês com os valores mais elevados, seguido por agosto (Figura 29h) e também outubro (Figura 29j), enquanto novembro (Figura 29k) registra os valores mais baixos.

Figura 29 – Valores médios mensais para *Dust* no período de 2008 a 2022, através da Reanálise MERRA-2. Unidade: $\mu g m^{-3}$



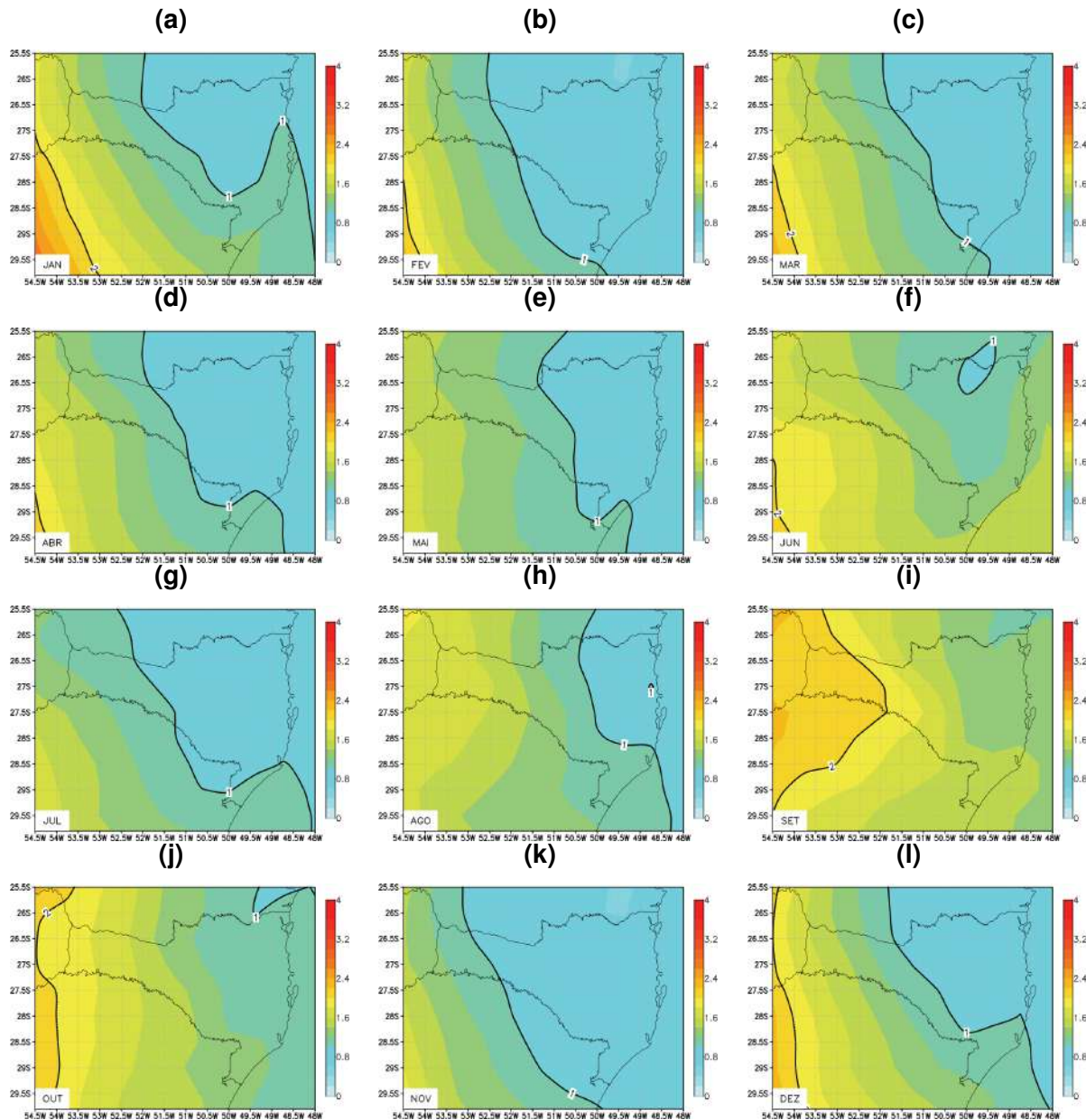
Através da análise dos mapas representados na Figura 30, é possível observar um ligeiro aumento na concentração do poluente estudado durante as estações de inverno (Figura 30c) e primavera (Figura 30d). Em comparação com as medições de poeira (*Dust*) realizadas anteriormente, os valores de concentração apresentam uma variação restrita, com valores situados na faixa de 0 a $4 \mu g m^{-3}$, sendo as partículas analisadas as de menor dimensão dentre todos os particulados, com diâmetro não excedente a $2,5 \mu g m^{-3}$.

Figura 30 – Valores médios sazonais para *Dust* $MP_{2.5}$ (Poeira) no período de 2008 a 2022, através da Reanálise MERRA-2. Unidade: $\mu g m^{-3}$



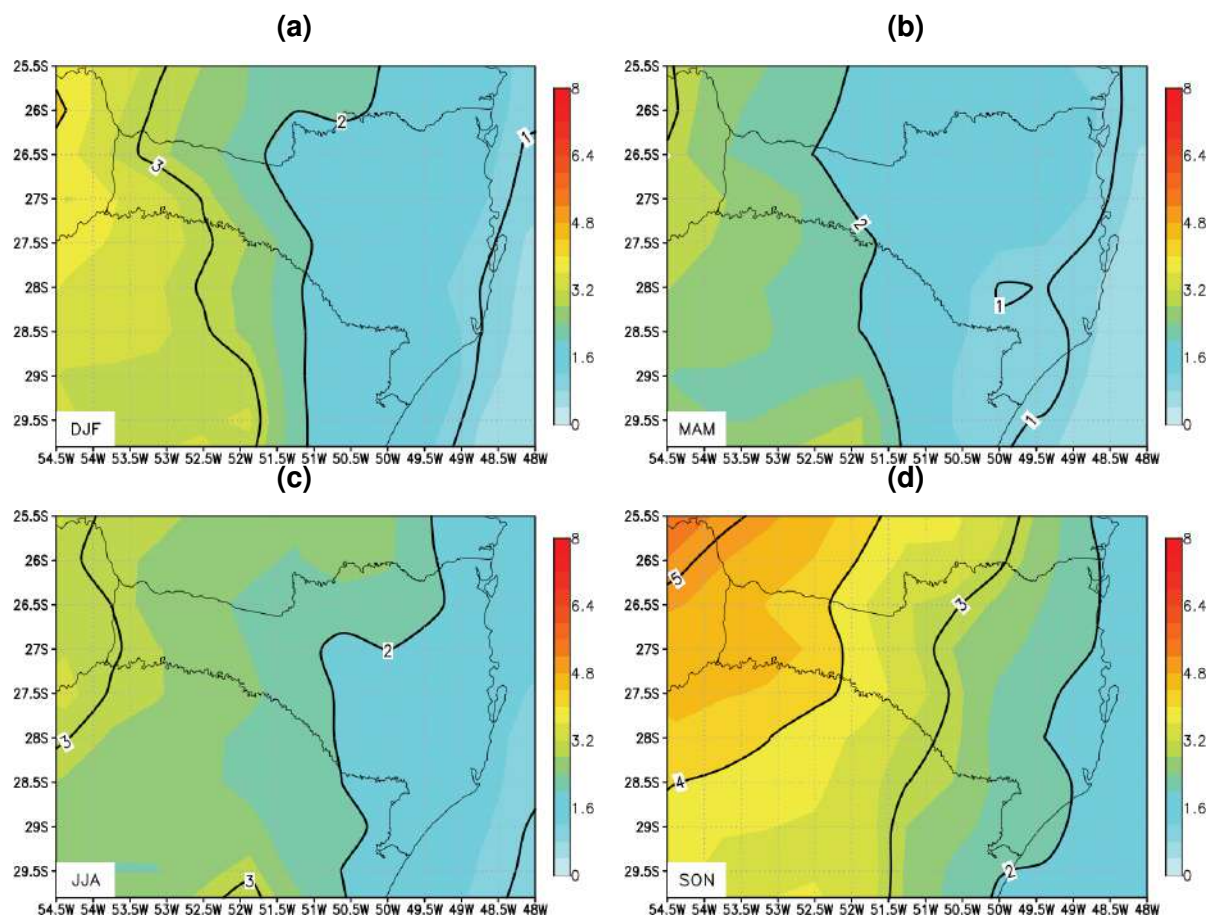
A climatologia mensal de *Dust* para os 15 anos é então realizada, conforme demonstrado na Figura 31, destacando setembro (Figura 31i) como o mês com os valores mais elevados, enquanto novembro (Figura 31k) registra os valores mais baixos.

Figura 31 – Valores médios mensais para *Dust* $MP_{2,5}$ no período de 2008 a 2022, através da Reanálise MERRA-2. Unidade: $\mu g m^{-3}$



Através da análise dos mapas apresentados Figura 32 para o Carbono Orgânico, com destaque para a Figura 32d, é evidenciada uma disparidade significativa durante o período de primavera (SON), o qual se caracteriza pela escassa precipitação na região de estudo. Este fenômeno se mostra como uma particularidade singular em comparação com todos os outros tipos de partículas investigadas anteriormente, sendo a discrepância observada exclusivamente nessa estação.

Figura 32 – Valores médios sazonais para Particulado - Carbono Orgânico no período de 2008 a 2022, através da Reanálise MERRA-2. Unidade: $\mu g m^{-3}$



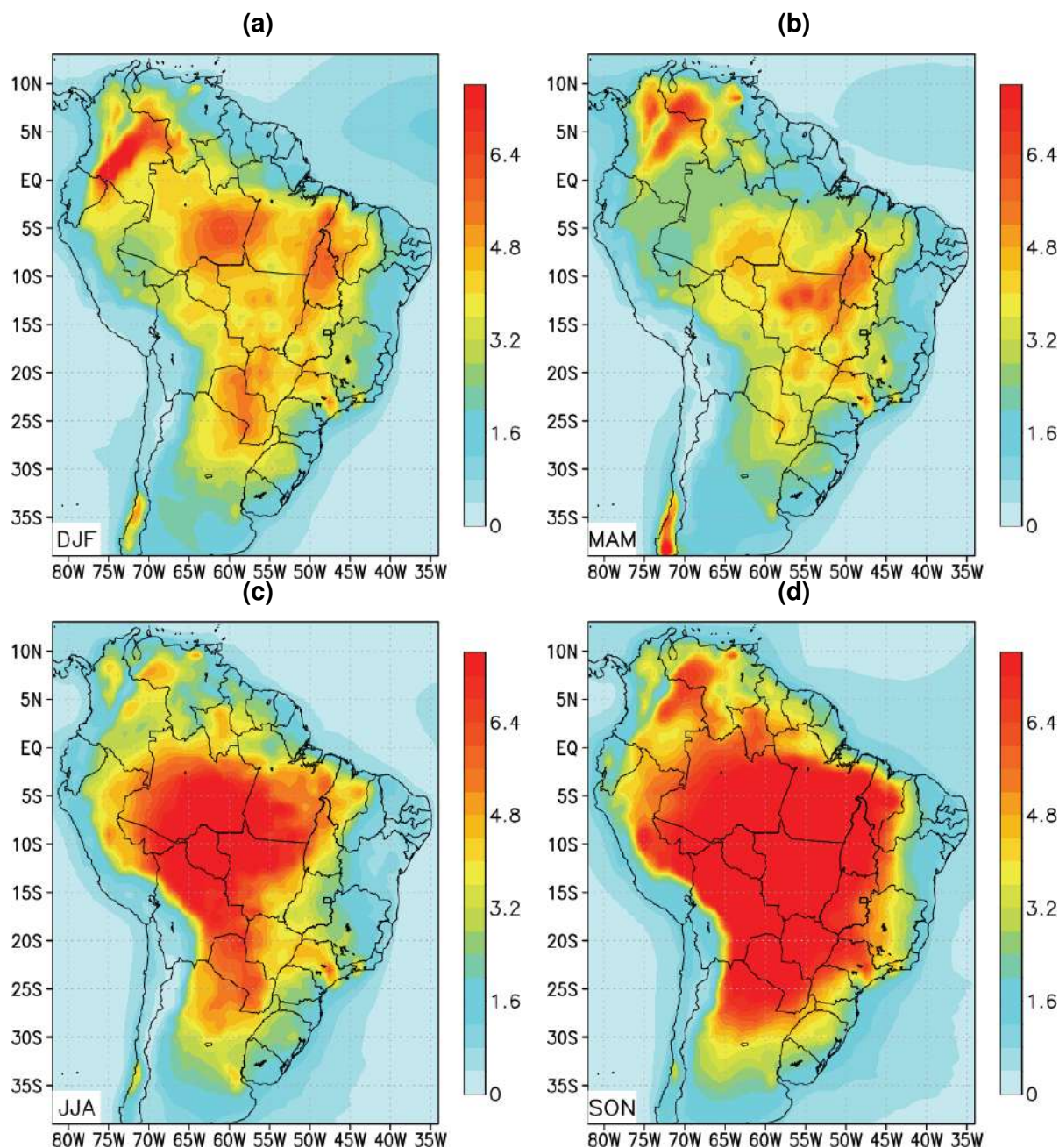
Portanto, é imprescindível proceder com a verificação dos valores médios sazonais para esse poluente em uma área mais abrangente, como ilustrado na Figura 33.

Observa-se na Figura 33d uma extensa área de elevado carbono orgânico durante a estação da primavera, a qual coincide com o período de maior incidência de focos ativos de queimadas, conforme relatado pelo INPE (2024).

No Apêndice H, são disponibilizadas as climatologias mensais, com os 12 mapas para a América do Sul.

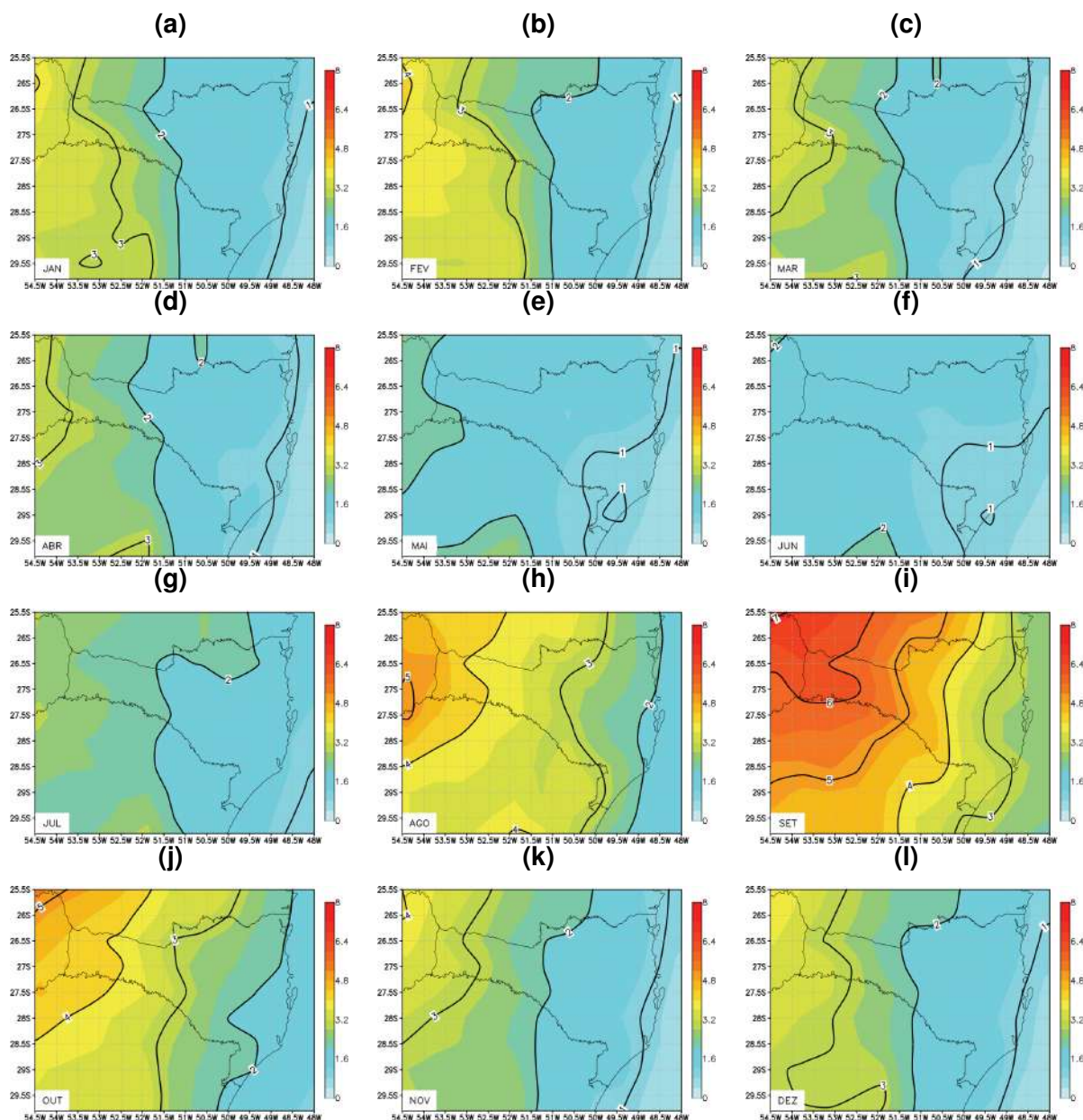
Assim como o *Dust* a origem do Carbono Orgânico é externa ao Estado de Santa Catarina.

Figura 33 – Valores médios sazonais para Particulado - Carbono Orgânico na América do Sul, no período de 2008 a 2022, através da Reanálise MERRA-2. Unidade: $\mu g m^{-3}$



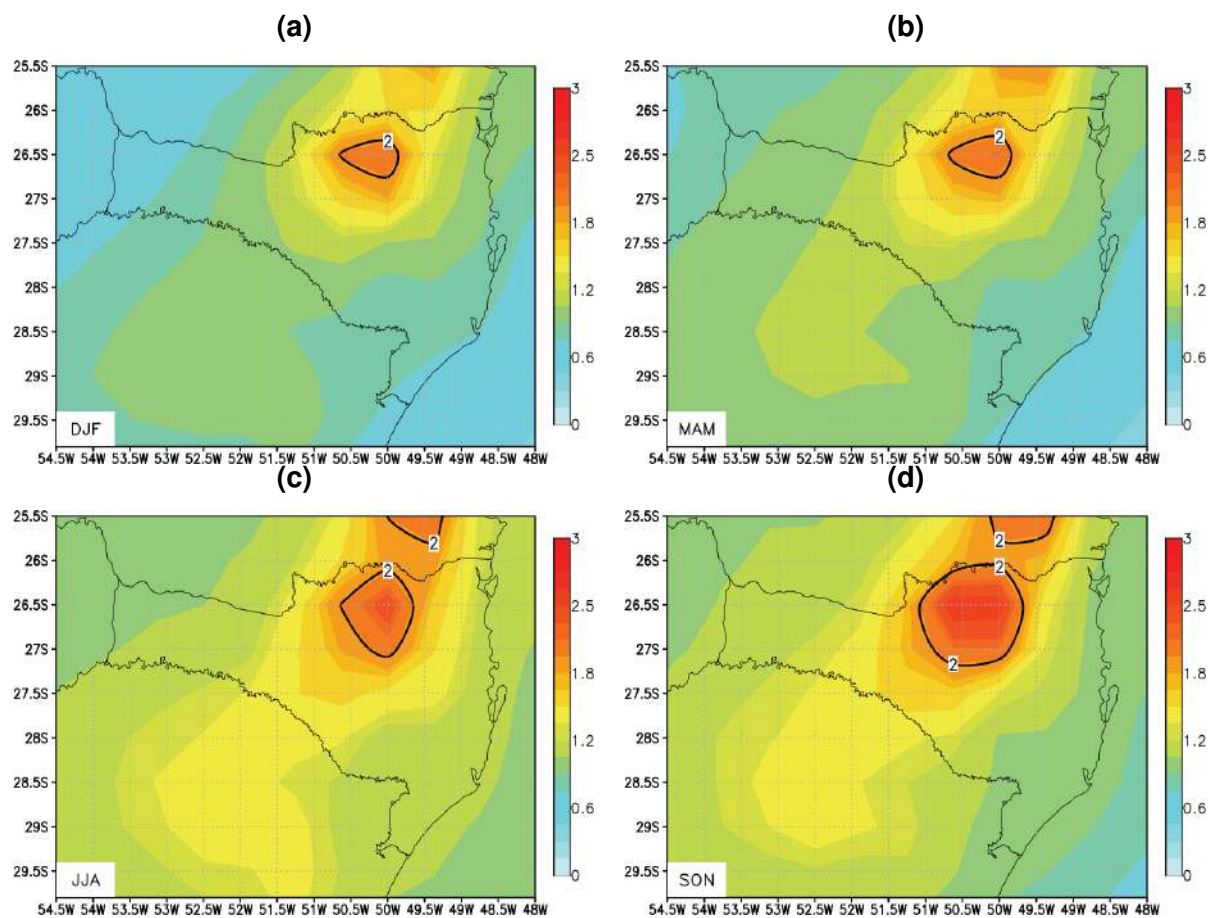
A climatologia mensal de Carbono Orgânico para os 15 anos é então realizada, conforme demonstrado na Figura 34, destacando setembro (Figura 34i) como o mês com os valores mais elevados, enquanto junho (Figura 34f) registra os valores mais baixos. O carbono orgânico é proveniente de incêndios e queimadas, além da decomposição de matéria orgânica.

Figura 34 – Valores médios mensais para Particulado - Carbono Orgânico no período de 2008 a 2022, através da Reanálise MERRA-2. Unidade: $\mu\text{g m}^{-3}$



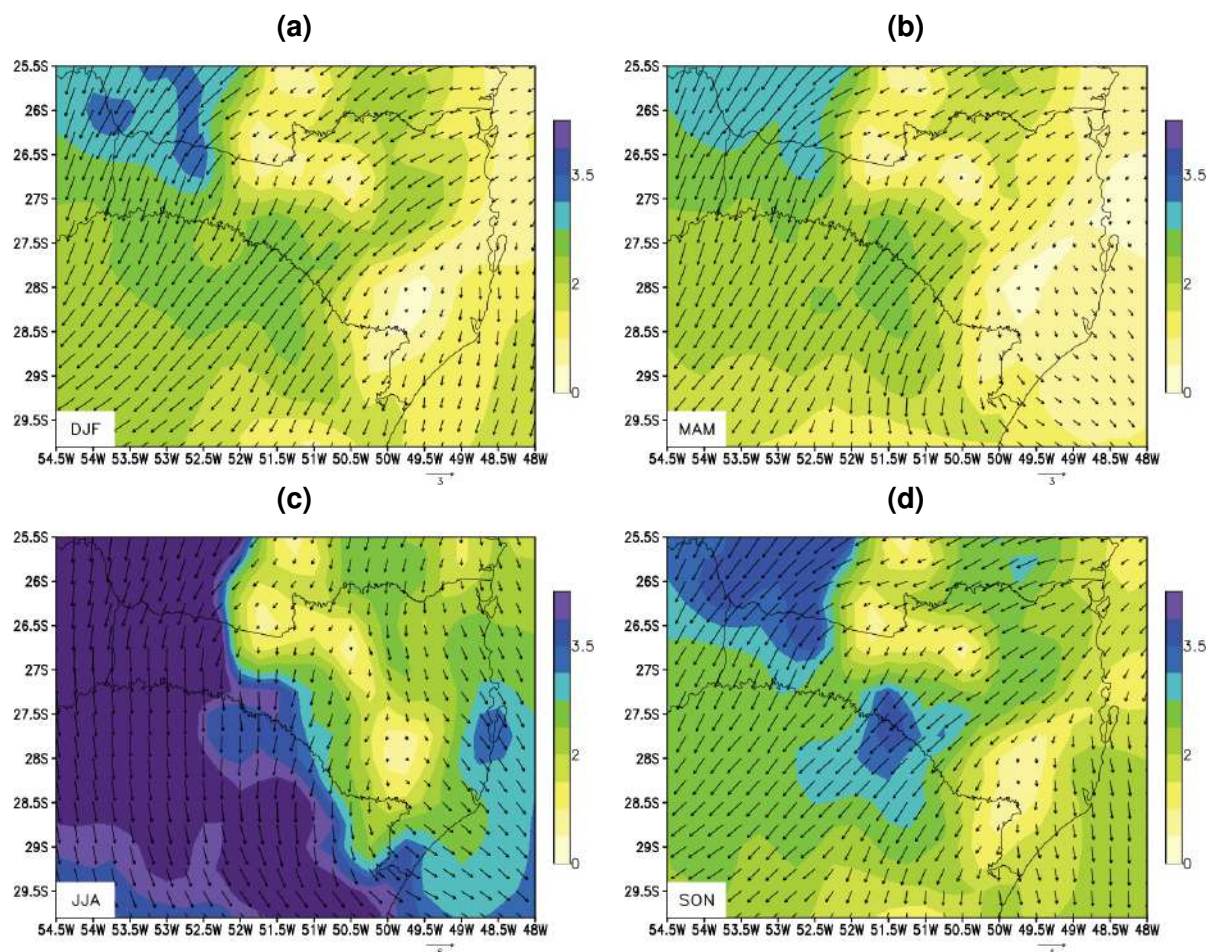
A análise dos mapas apresentados na Figura 35, especialmente a Figura 35d, revela uma maior concentração do poluente sulfato, que é subproduto do SO_2 . Ao contrário dos poluentes discutidos anteriormente, que exigiam uma análise mais abrangente, aqui é observada uma concentração mais localizada. O centro dessa maior concentração no mapa está situado na cidade de Itaipópolis.

Figura 35 – Valores médios sazonais para Particulado - Sulfato no período de 2008 a 2022, através da Reanálise MERRA-2. Unidade: $\mu g m^{-3}$



É possível estabelecer correlações entre a topografia e os padrões de ventos a um nível de pressão atmosférica de 900 hPa. Na Figura 36, observa-se que o vento sopra predominantemente do nordeste em direção à área de maior concentração do poluente, com seu epicentro bem definido. Adicionalmente, verifica-se a ocorrência de calmaria nas proximidades dessa área.

Figura 36 – Valores médios sazonais para Vento a 900 hPa no período de 2008 a 2022, através da Reanálise ERA5. Unidade: $m s^{-1}$



A análise isolada de variáveis meteorológicas e químicas, como o comportamento dos ventos e a concentração de poluentes, apresenta desafios devido à complexidade das interações entre os elementos ambientais. Assim, para compreender como esses fatores se correlacionam e influenciam o transporte e a dispersão de poluentes, foram geradas visualizações conforme as imagens da Figura 37.

A topografia é uma das variáveis mais relevantes para entender a dispersão de poluentes. A imagem da Figura 37a destaca a área circulada, que mostra a área de estudo localizada em um vale cercado por montanhas, destacando-se pela dificuldade natural na ventilação. Essa configuração geográfica cria condições que favorecem a retenção de poluentes como o sulfato (SO_4), um dos principais componentes das partículas finas ($MP_{2.5}$). A falta de circulação do ar em áreas de relevo elevado intensifica a concentração local de poluentes, uma característica comum em regiões onde barreiras topográficas limitam a dispersão horizontal e vertical.

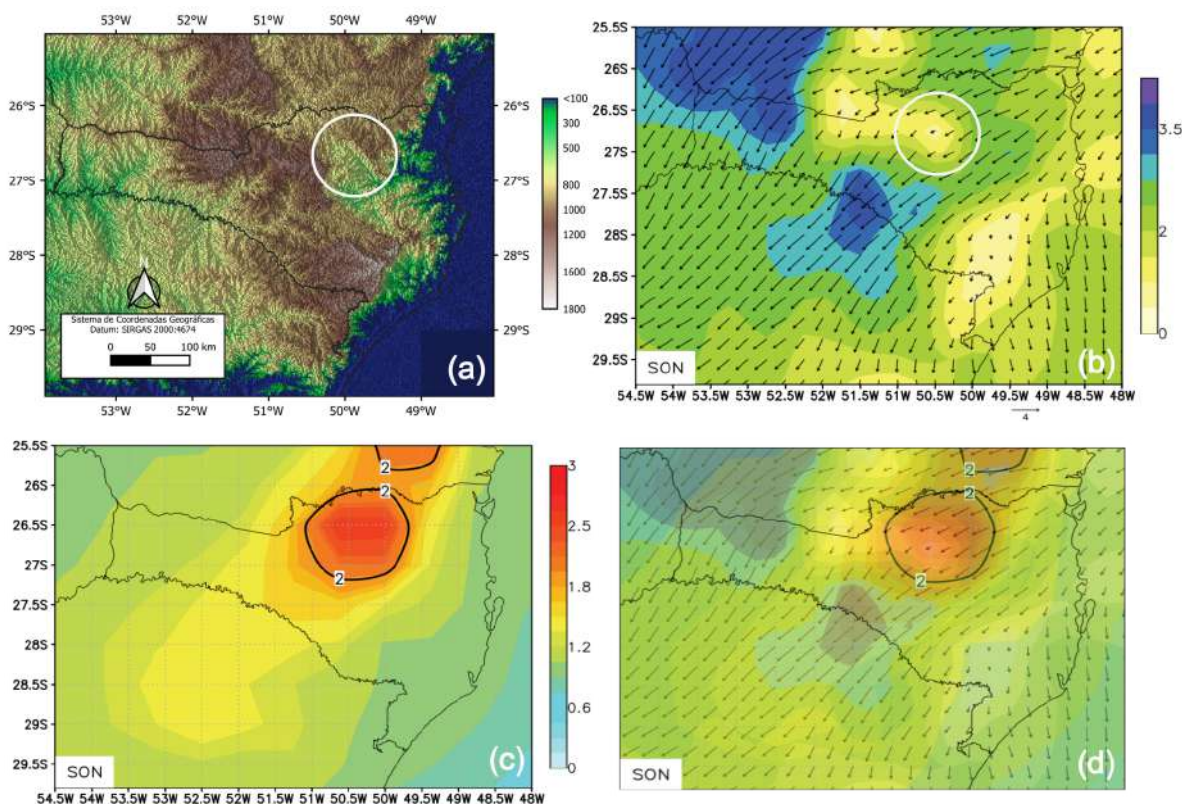
Na Figura 37b observa-se uma zona de calmaria na área circulada, representada por vetores de vento reduzidos, indicando pouca movimentação do ar. Essa condição é típica em vales cercados por montanhas, onde o relevo cria barreiras físicas

para o deslocamento das massas de ar, contribuindo para a estagnação atmosférica. Essa estagnação potencializa o acúmulo de poluentes, especialmente em períodos de estabilidade atmosférica e ausência de ventos significativos.

Com base nos dados de reanálise MERRA-2, a Figura 37c evidencia a distribuição espacial da concentração de sulfato na região. As áreas de maior intensidade do poluente estão concentradas justamente na zona marcada, que coincide com a área de calmaria identificada na análise dos ventos. Esse padrão reforça a correlação entre a topografia, os ventos e a concentração de poluentes, demonstrando que regiões de menor movimentação do ar são mais suscetíveis ao acúmulo de partículas finas.

A última visualização (Figura 37d) sintetiza as informações, combinando os vetores de vento e a concentração de SO_4 . Nota-se que os ventos vindos do nordeste, possivelmente transportando poluentes industriais da região de Curitiba, e do leste, oriundos de Joinville, encontram uma barreira natural nas montanhas. Essa barreira reduz significativamente a dispersão e facilita a acumulação do poluente na área marcada. A interação entre o relevo e os ventos evidencia o papel das condições geográficas e meteorológicas no comportamento dos poluentes atmosféricos.

Figura 37 – A topografia da região (a), em m, os vetores de vento (b) na estação da primavera (SON) em $m s^{-1}$, a concentração do poluente SO_4 (c) na primavera (SON), em $\mu g m^{-3}$, e em (d) são apresentadas as componentes do vetor vento e concentração do poluente com a mesma faixa de cores apresentadas em (c)

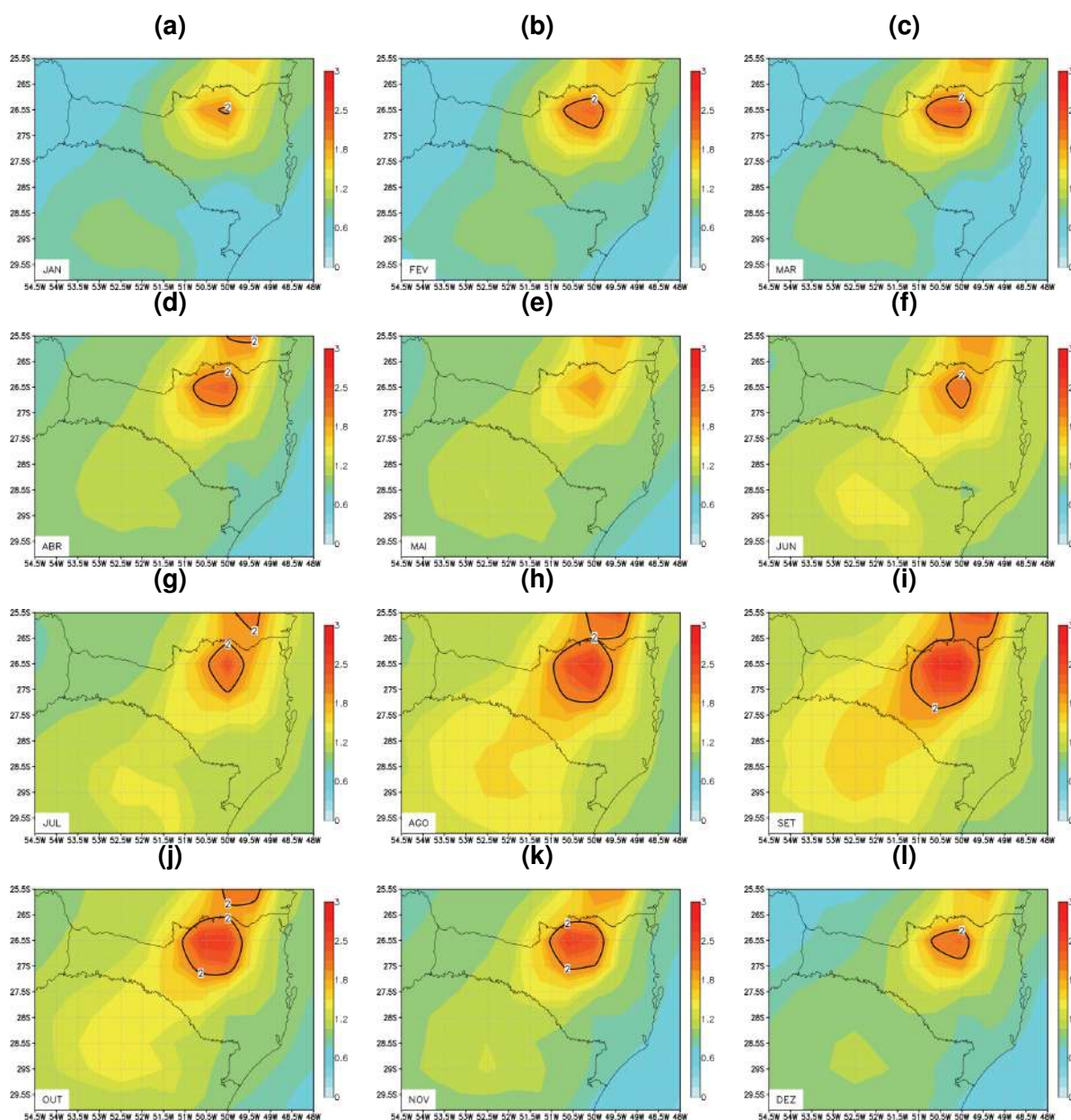


Elaboração: Autora

A climatologia mensal de Sulfato para os 15 anos é então realizada, conforme demonstrado na Figura 38, destacando setembro (Figura 38i) como o mês com os valores mais elevados, enquanto janeiro (Figura 38a) registra os valores mais baixos. O sulfato é um poluente secundário derivado do dióxido de enxofre e é classificado como material particulado fino ($MP_{2,5}$).

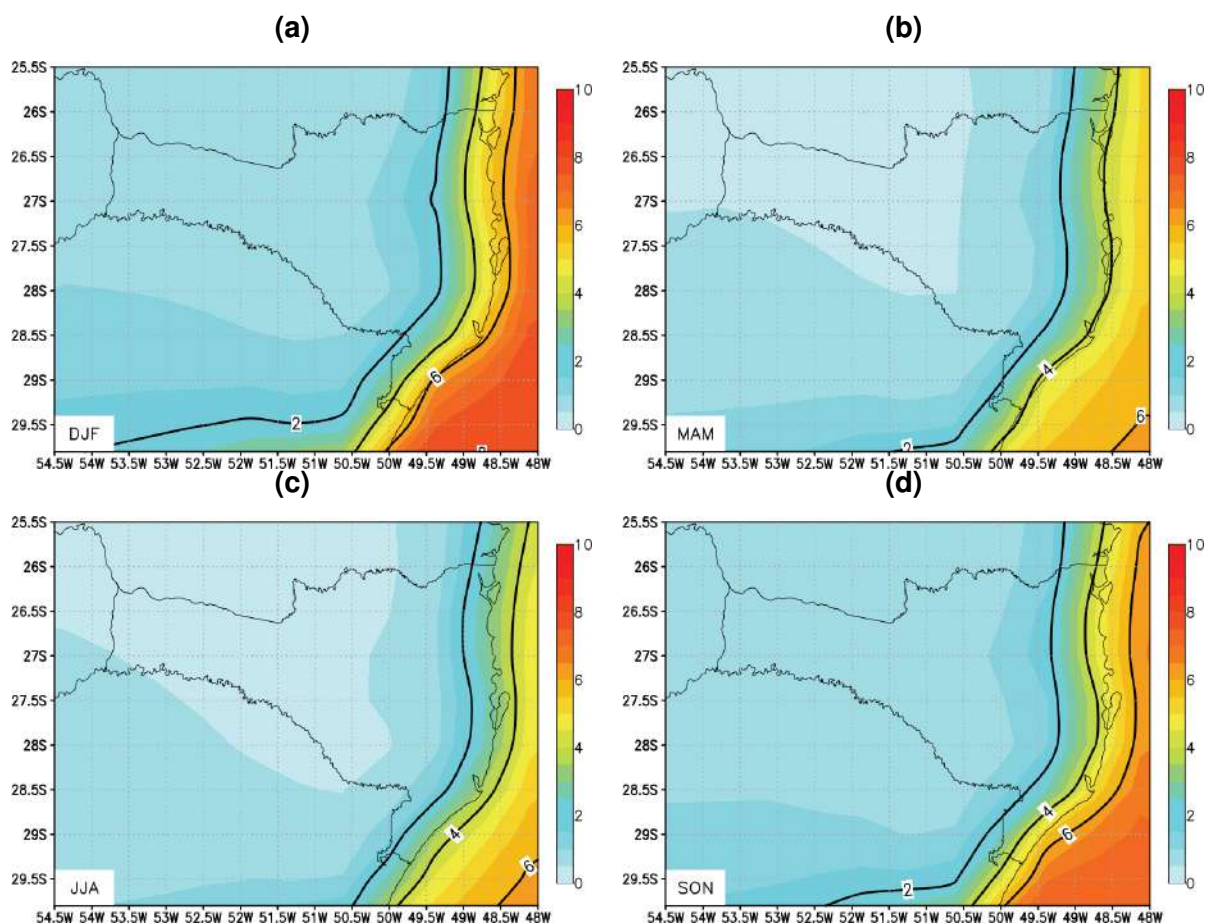
Durante o período de primavera (SON), além do transporte de poluentes provenientes das regiões Norte e Centro-Oeste em direção ao Sul do Brasil, observa-se uma maior concentração de sulfato (SO_4) na região nordeste do Estado de Santa Catarina. Essa área inclui municípios como Joinville, São Francisco do Sul, São Bento do Sul, Araquari, Jaraguá do Sul, entre outros.

Figura 38 – Valores médios mensais para o Particulado Sulfato (SO_4) no período de 2008 a 2022, através da Reanálise MERRA-2. Unidade: $\mu g m^{-3}$



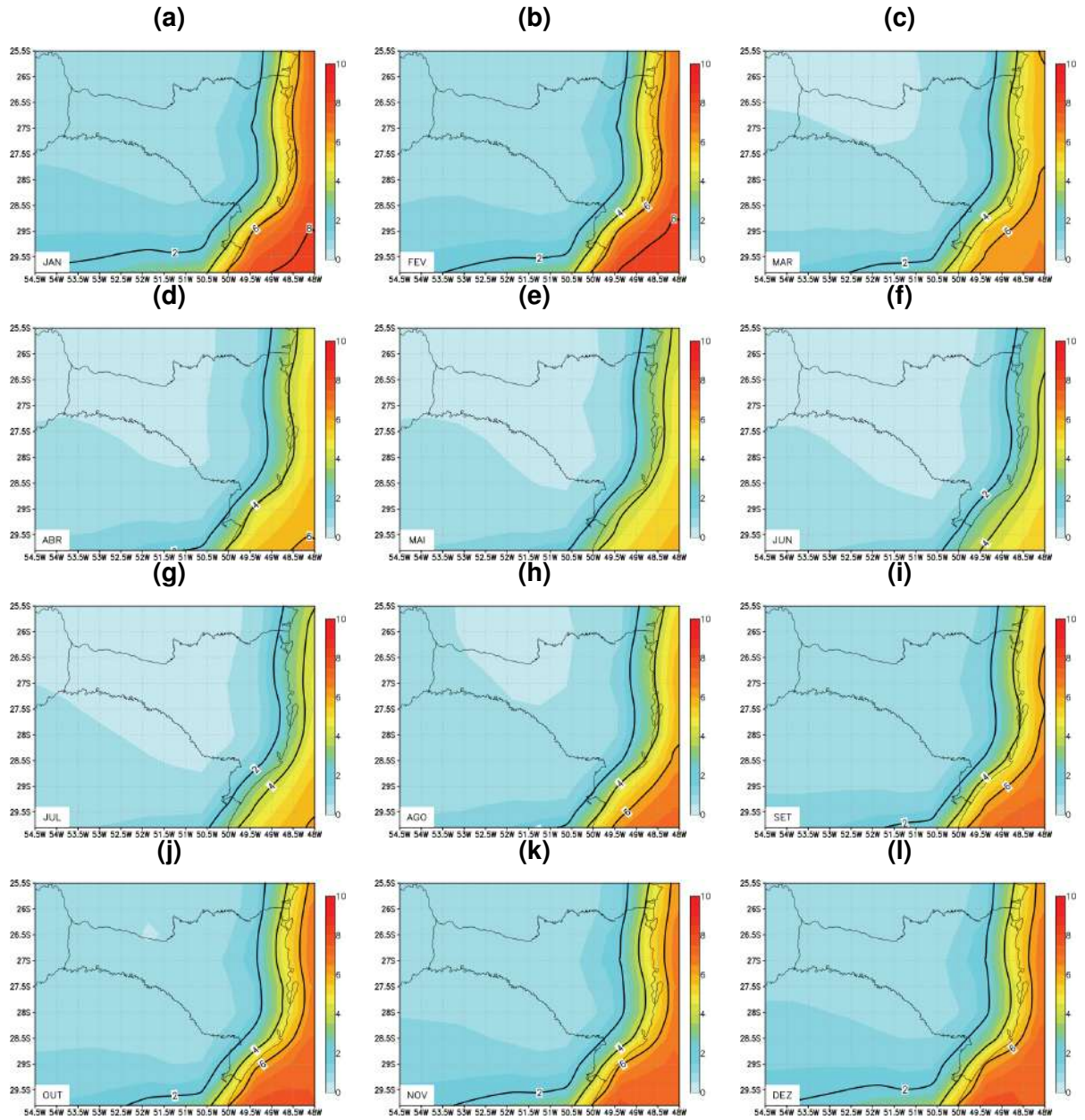
A análise dos mapas apresentados na Figura 39, especialmente na estação do verão (Figura 39a), revela uma concentração ligeiramente maior do poluente Sal Marinho, que é também um poluente material particulado fino ($MP_{2,5}$). Os menores valores são encontrados no inverno (Figura 39c).

Figura 39 – Valores médios sazonais para Particulado - Sal Marinho no período de 2008 a 2022, através da Reanálise MERRA-2. Unidade: $\mu g m^{-3}$



A climatologia mensal de Sal Marinho para os 15 anos é então realizada, conforme demonstrado na Figura 40, destacando janeiro (Figura 40a) e fevereiro (Figura 40b) como os meses com os valores mais elevados, enquanto junho (Figura 40f) registra os valores mais baixos. O sal marinho é um poluente classificado como material particulado fino ($MP_{2,5}$).

Figura 40 – Valores médios mensais para o Particulado *Sal Marinho* no período de 2008 a 2022, através da Reanálise MERRA-2. Unidade: $\mu g m^{-3}$



4.1.5.2 Material particulado fino

Para a obtenção de um resultado único de Material Particulado Fino ($MP_{2,5}$), foi utilizada a Equação 12 de Chimurkar et al. (2020).

$$MP_{2,5} = Dust_{25} + OC \times 1,8 + BC + SS_{25} + SO_4 \times \frac{132,14}{96,06} \quad (12)$$

Onde:

$MP_{2,5}$ = valor do particulado com tamanho até 2,5 μm .

$Dust_{2,5}$ = Concentração de Poeira MP 2,5 em superfície, no MERRA-2 o

nome da variável é DUSMASS25.

OC = Concentração de Carbono Orgânico em superfície, no MERRA-2 o nome da variável é OCSMASS.

BC = Concentração de Black Carbon em superfície, no MERRA-2 o nome da variável é BCSMASS.

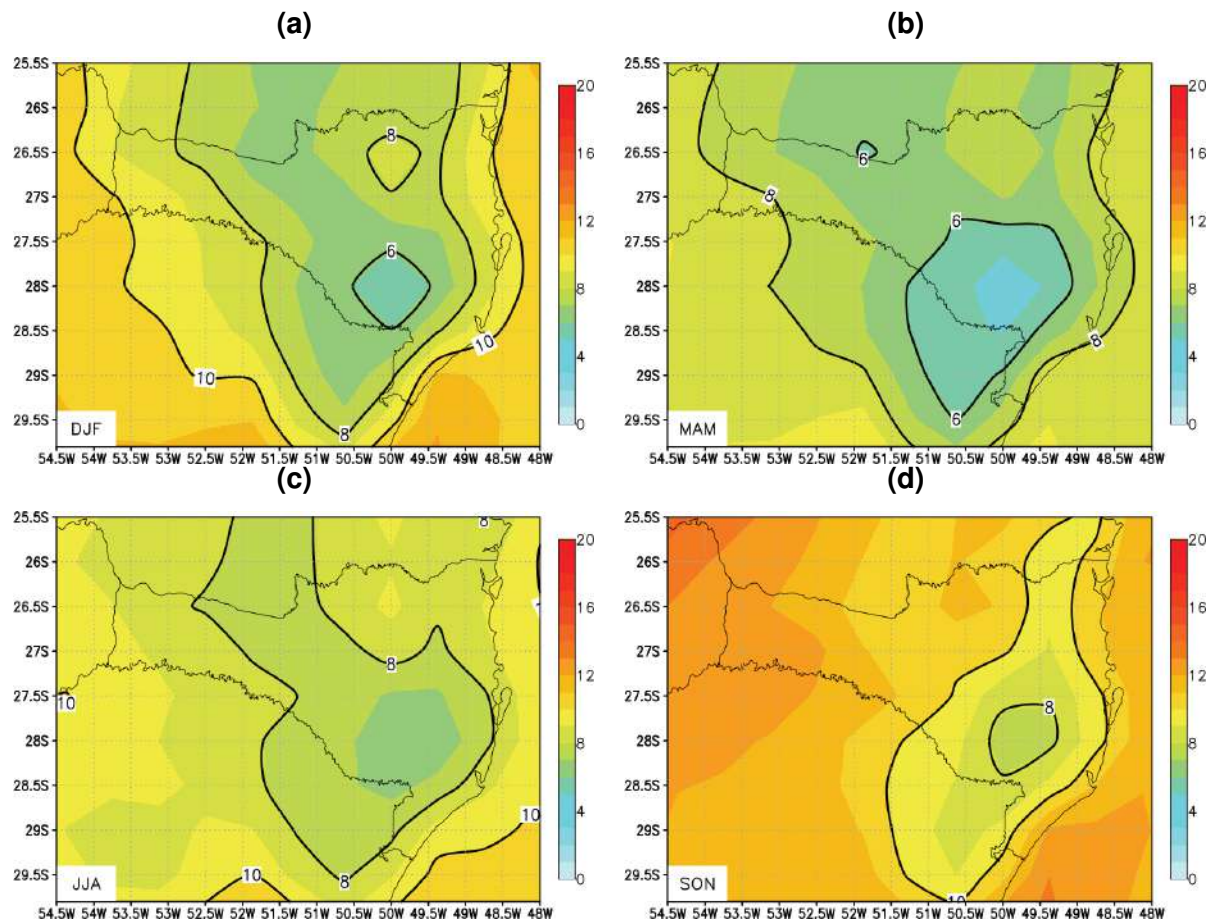
$SS_{2.5}$ = Concentração superficial de sal marinho, no MERRA-2 o nome da variável é SSSMASS25.

SO_4 = Concentração de Sulfato (SO_4), no MERRA-2 o nome da variável é SO4SMASS.

$\frac{132,14}{96,06}$ = fator de multiplicação do SO_4 . O sulfato requer um fator de multiplicação, uma vez que o traçador de espécies no MERRA-2 é o íon sulfato.

A análise dos mapas apresentados na Figura 41, revela uma concentração maior do poluente $MP_{2,5}$ na estação de primavera (Figura 41d). Os menores valores são encontrados no outono (Figura 41b) e no inverno (Figura 41c).

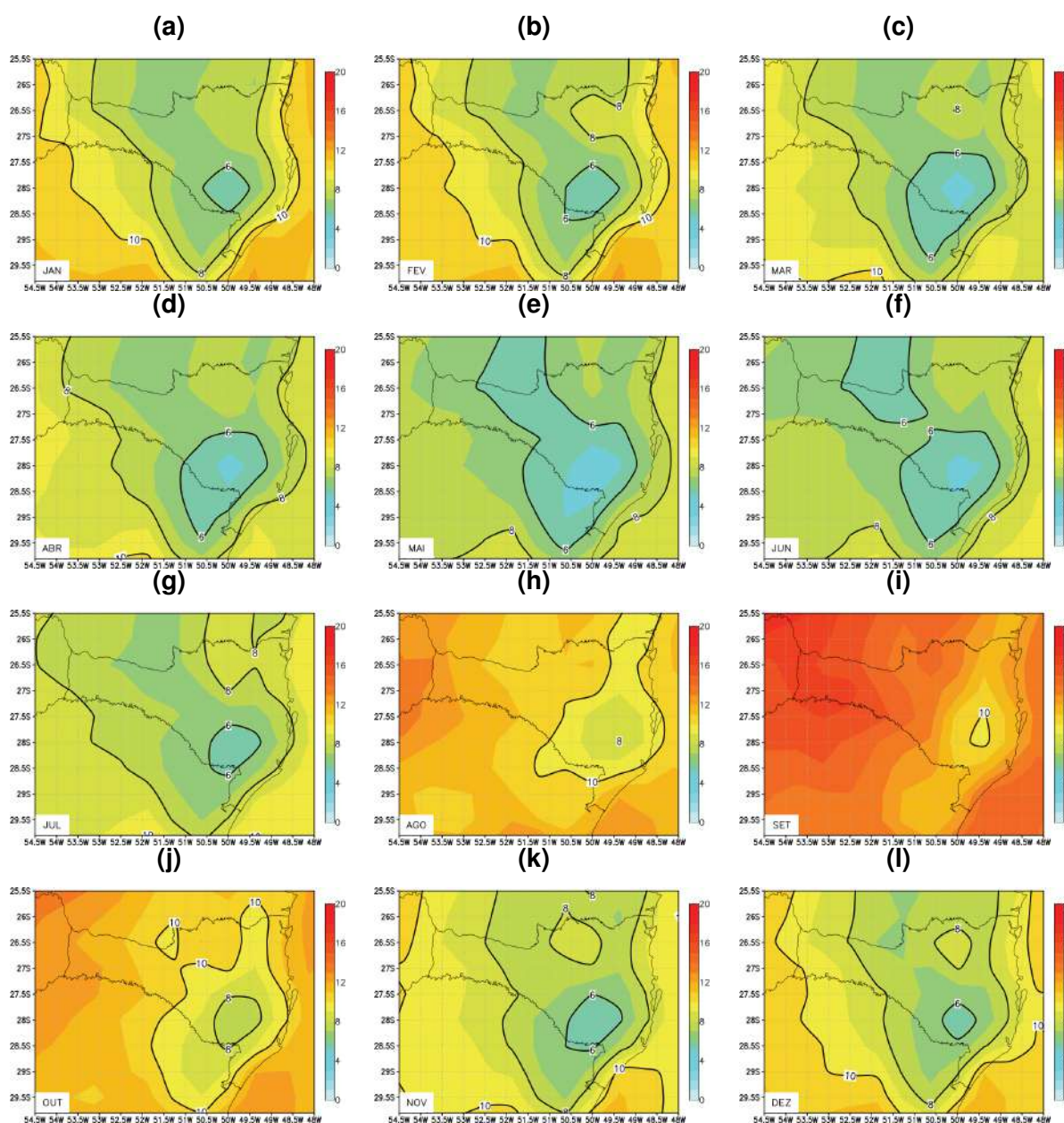
Figura 41 – Valores médios sazonais para material particulado fino - $MP_{2,5}$ no período de 2008 a 2022, através da Reanálise MERRA-2. Unidade: $\mu g m^{-3}$



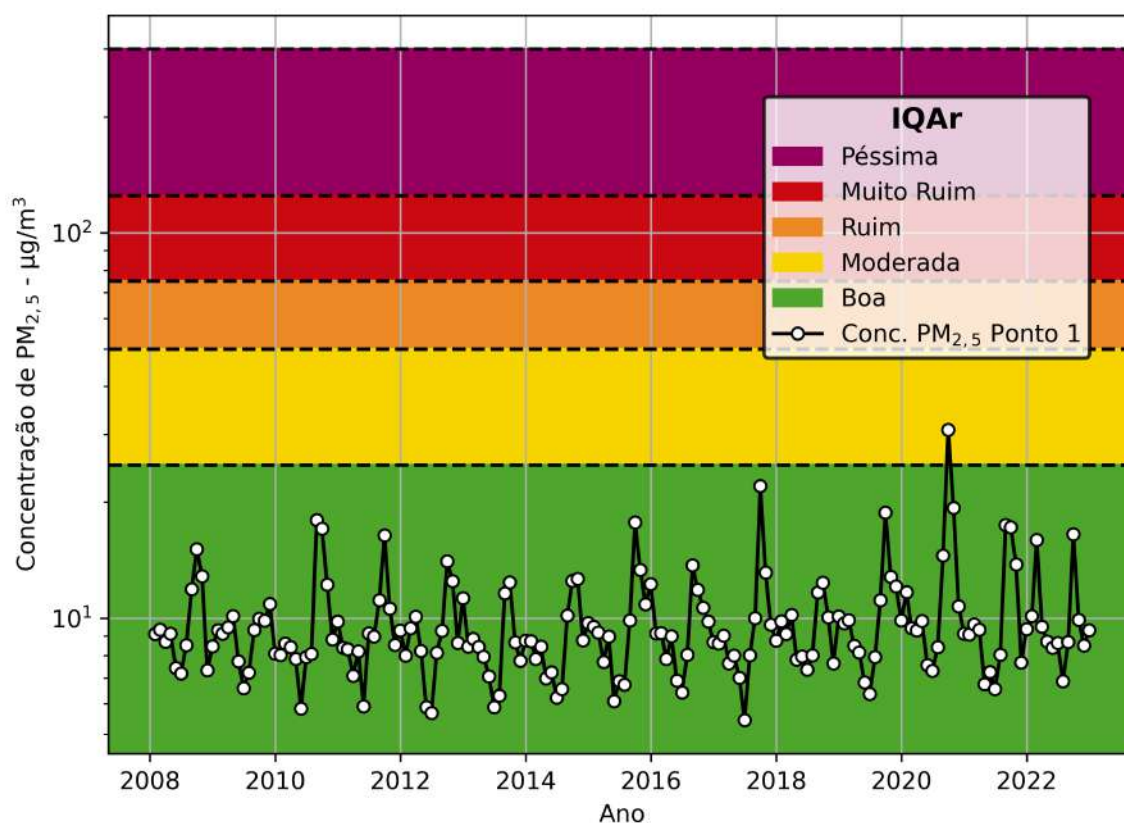
A climatologia mensal de $MP_{2,5}$ para os 15 anos é então realizada, conforme demonstrado na Figura 42, destacando setembro (Figura 42i) como o mês com os

valores mais elevados, enquanto maio (Figura 42e) registra os valores mais baixos.

Figura 42 – Valores médios mensais para $MP_{2,5}$ no período de 2008 a 2022, através da Reanálise MERRA-2. Unidade: $\mu g m^{-3}$



Considerando o Índice de Qualidade do Ar (IQAr), apresenta-se a série histórica do Ponto 1 na Figura 43. O gráfico ilustra o comportamento do $MP_{2,5}$ no período de 2008 a 2022, dentro das faixas do IQAr, evidenciando a transição da classificação “Boa” para “Moderada”, onde ocorreu a maior média mensal em setembro de 2020, valor de $30,9 \mu g m^{-3}$. Em 2008 houve uma estiagem prolongada na Amazônia, o que pode ter contribuído. Os demais gráficos relativos aos diferentes pontos são fornecidos no Apêndice I.

Figura 43 – Concentração do Poluente $PM_{2,5}$ e a Relação com o Índice de Qualidade do Ar

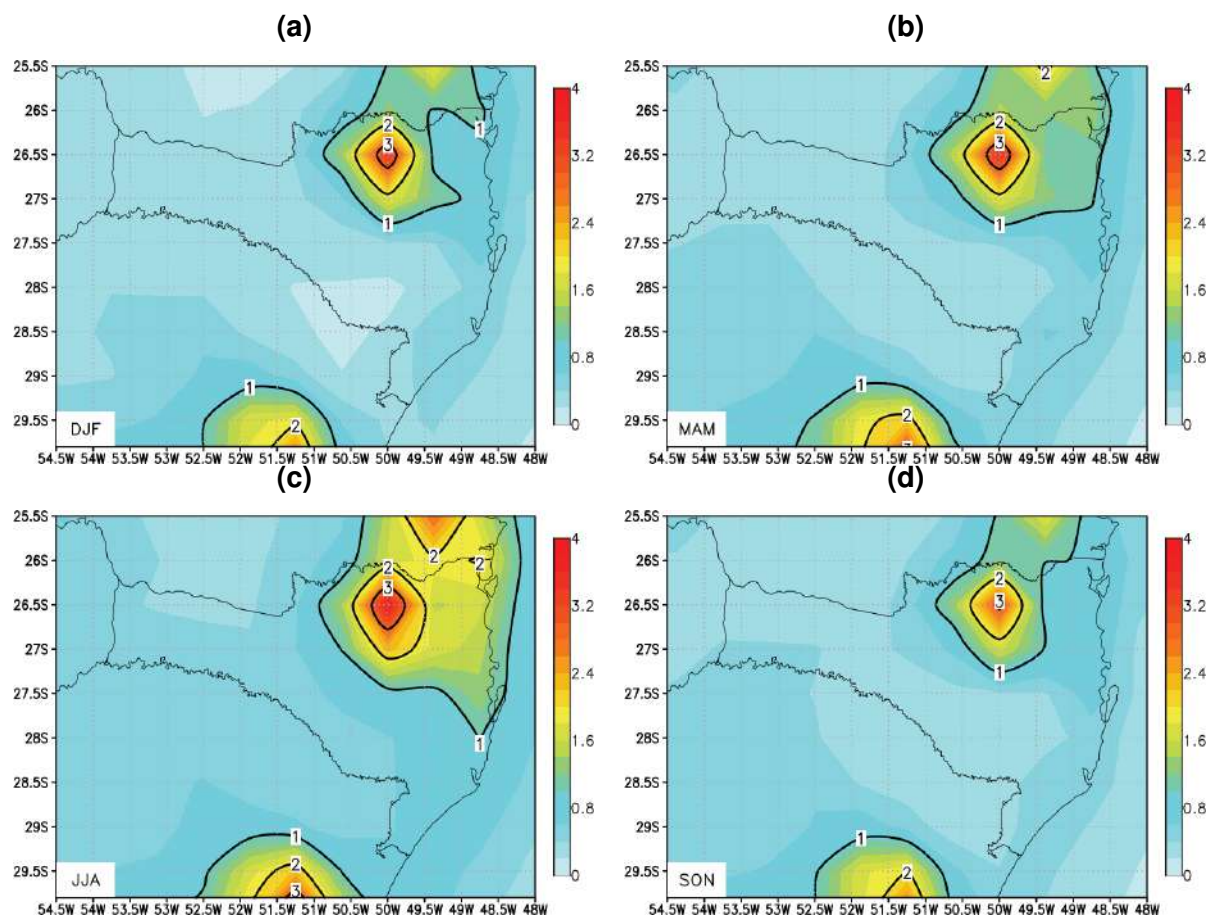
Elaboração: Autora

4.1.5.3 Dióxido de Enxofre

Para o Dióxido de Enxofre (SO_2), foram obtidos dados de concentração em superfície através da Reanálise MERRA-2. Os mapas sazonais correspondentes estão representados na Figura 44.

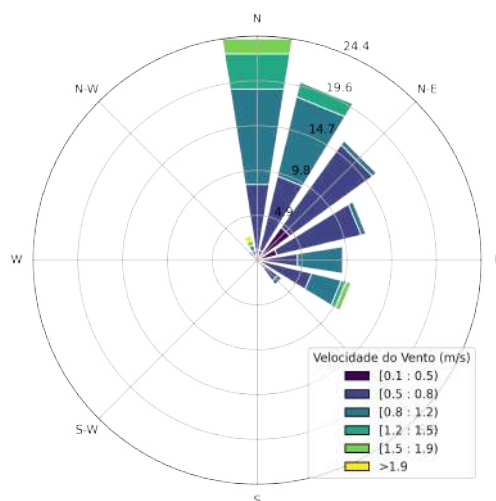
A análise é semelhante ao SO_4 , visto no item 4.1.5.1. Ao analisar os mapas das Figuras 44a, 44b, 44c e 44d torna-se evidente uma concentração mais elevada, notavelmente localizada nas coordenadas geográficas Latitude $-26,5^\circ$ e Longitude -50° . O local corresponde ao município de Itaiópolis, com pouco mais de 22 mil habitantes de acordo com Censo IBGE 2022. Ao examinar as imagens de satélite, foi observado que os municípios circundantes também têm uma densidade populacional reduzida, sugerindo que a concentração deste poluente, conforme observado pelos dados da fonte, não é originária dessas áreas, mas é transportada por parcelas de ar.

Figura 44 – Valores médios sazonais para Dióxido de Enxofre (SO_2) no período 2008 a 2022, através da Reanálise MERRA-2. Unidade: $\mu g m^{-3}$



O diagrama rosa dos ventos, ilustrado na Figura 45 e centrado em Itaiópolis, evidencia que os ventos predominantes se originam das direções norte e nordeste. Esta constatação implica que as parcelas de ar possivelmente têm sua origem nas zonas circundantes a Joinville e na área industrial de Curitiba.

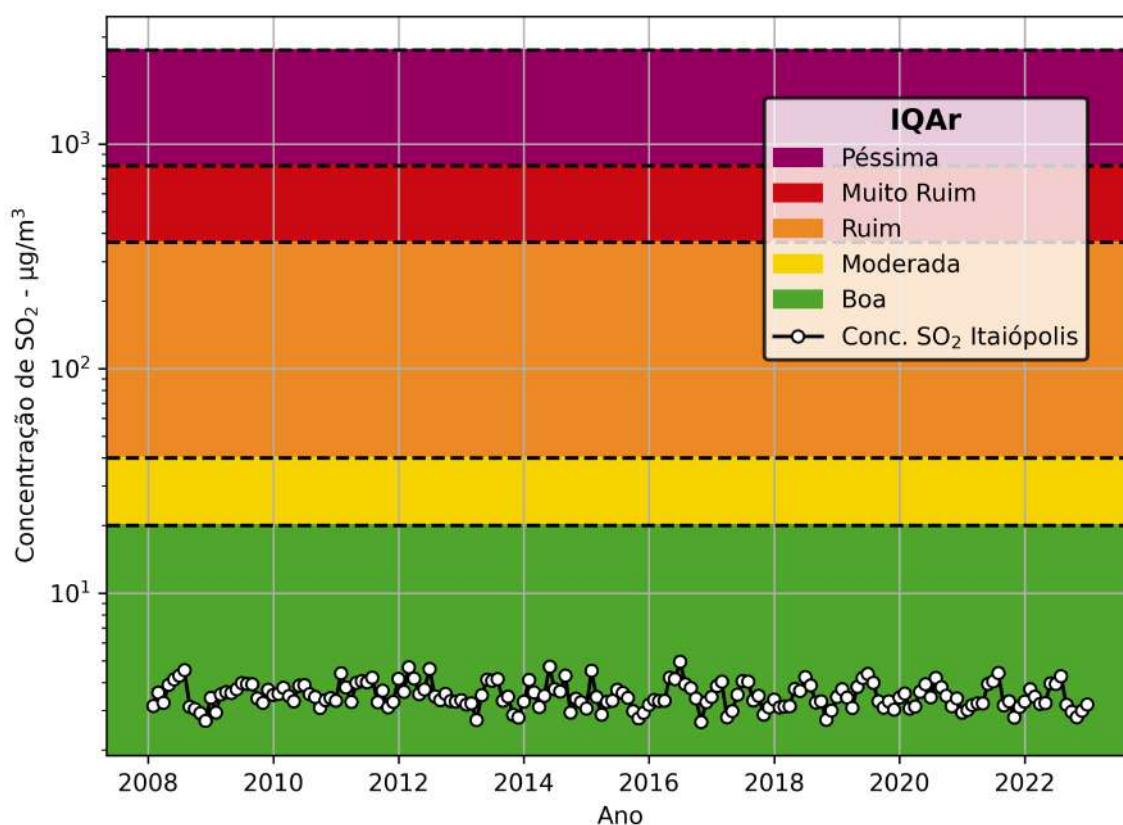
Figura 45 – Rosa dos ventos para o município de Itaiópolis, 2008 a 2022



Fonte: ERA5

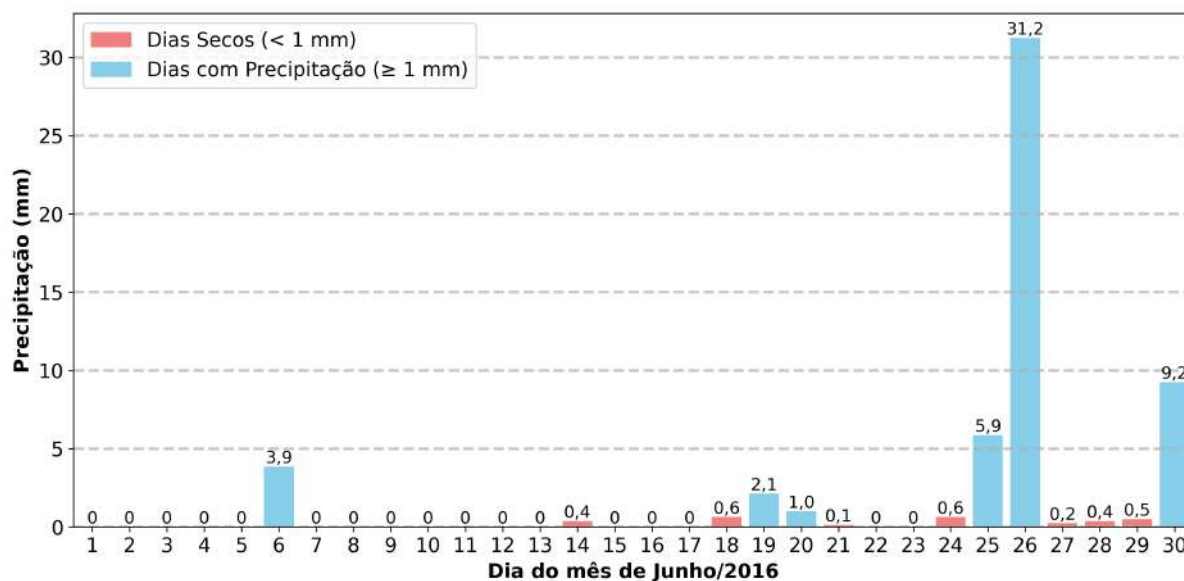
Considerando o Índice de Qualidade do Ar (IQAr), apresenta-se a série histórica em Itaiópolis na Figura 46. O gráfico ilustra o comportamento do SO_2 no período de 2008 a 2022, dentro das faixas do IQAr. Embora o local apresente a maior concentração do poluente no Estado de Santa Catarina, em todo o período a classificação permaneceu como “Boa”. A maior média mensal foi registrada em junho de 2016, com um valor médio de $4,96 \mu g m^{-3}$. Os demais gráficos relativos aos diferentes pontos são apresentados no Apêndice J.

Figura 46 – Concentração do Poluente SO_2 e a relação com o Índice de Qualidade do Ar



Elaboração: Autora

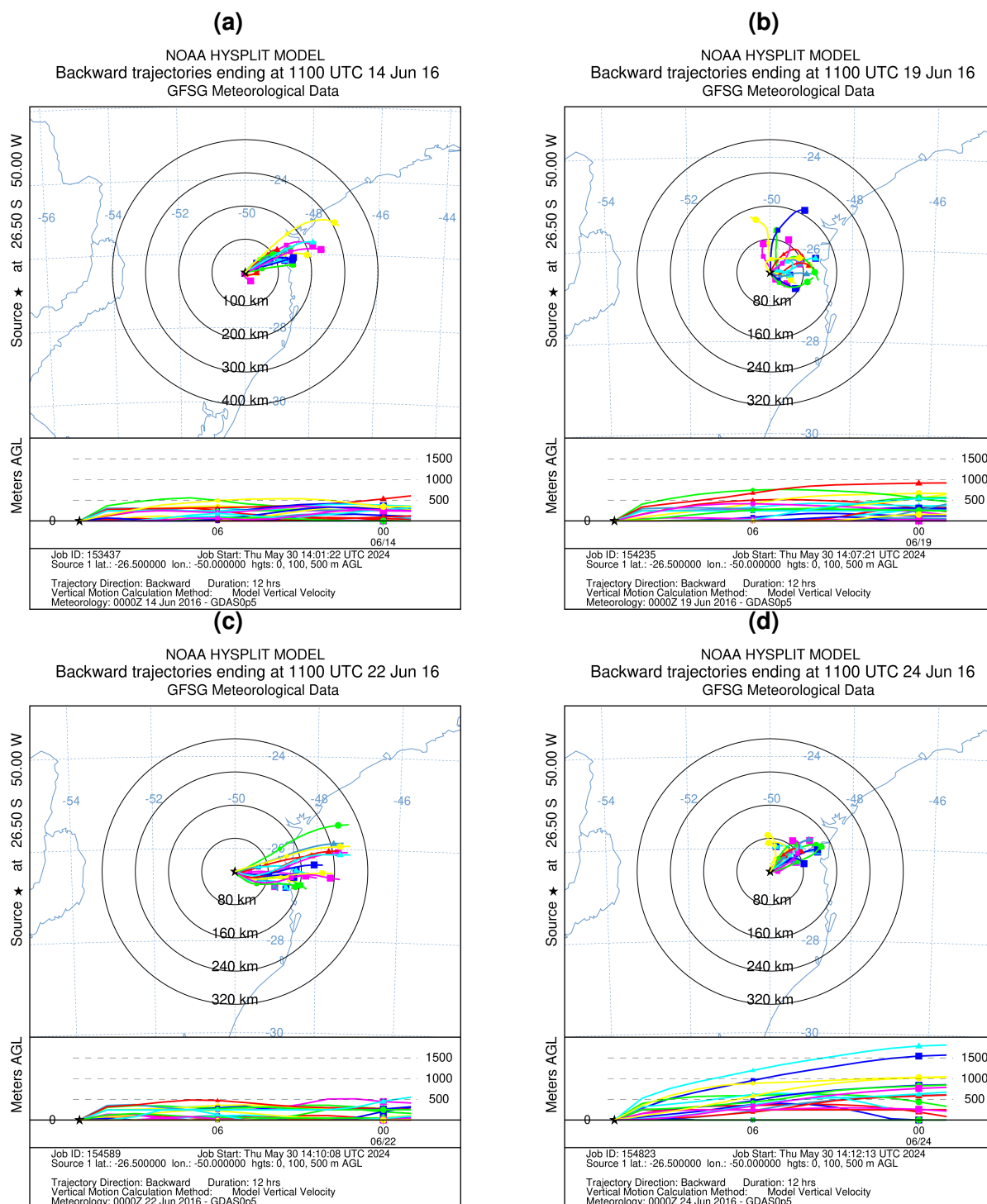
A Figura 47 demonstra a precipitação total em todos os dias do mês de junho de 2016. Houve 23 dias secos (de um total de 30 dias) no mês. Os dias secos são favoráveis à poluição atmosférica, ou seja, agravam o problema.

Figura 47 – Precipitação para o mês de junho de 2016, onde ocorreu o pico do poluente

Fonte: MERGE

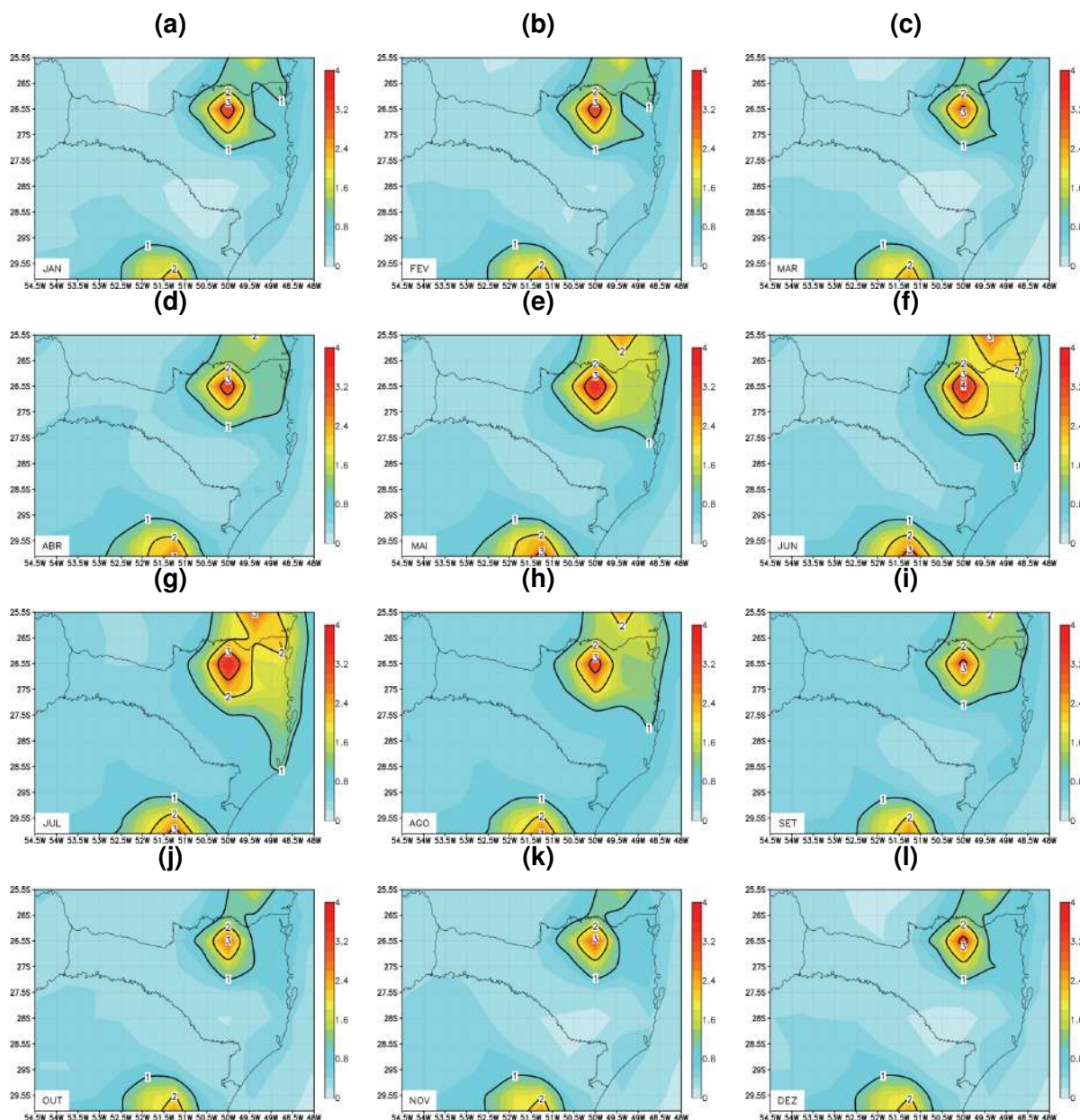
O resultado do modelo *HYSPLIT* é ilustrado na Figura 48, mostra a trajetória e dispersão das parcelas de ar. A partir da análise das representações gráficas, observa-se que as trajetórias exibem uma predominância de direção oriunda das regiões leste e nordeste, percorrendo distâncias superiores a 100 km em baixas altitudes, dentro da CLP, até alcançarem a localidade de Itaiópolis. As datas selecionadas são os períodos de estiagem ou dias secos, que apresentam uma potencial concentração elevada do poluente SO_2 sendo transportado pelo vento até a região.

Figura 48 – Trajetória para trás das parcelas de ar nas últimas 12 horas, chegando em Itaiópolis nos dias 14, 19, 22 e 24 de junho/2016



A climatologia mensal de SO_2 para os 15 anos é então realizada, conforme demonstrado na Figura 49, destacando junho (Figura 49f) como o mês com os valores mais elevados, enquanto outubro e novembro ficam empatados como os meses de menores valores (Figuras 49j e 49k).

Figura 49 – Valores médios mensais para *Dióxido de Enxofre* no período de 2008 a 2022, através da Reanálise MERRA-2. Unidade: $\mu\text{g m}^{-3}$



4.1.5.4 Monóxido de Carbono

Para a análise do Monóxido de Carbono (CO), foram empregados dados provenientes do instrumento MOPPIT e da Reanálise MERRA-2, a fim de realizar uma comparação entre essas duas fontes de dados. Os resultados são apresentados na Figura 50.

Observa-se nos mapas uma leve elevação na concentração durante as estações de inverno (Figura 50f) e primavera (Figura 50h), os quais são caracterizados pelos menores índices pluviométricos na região de estudo para essas épocas do ano.

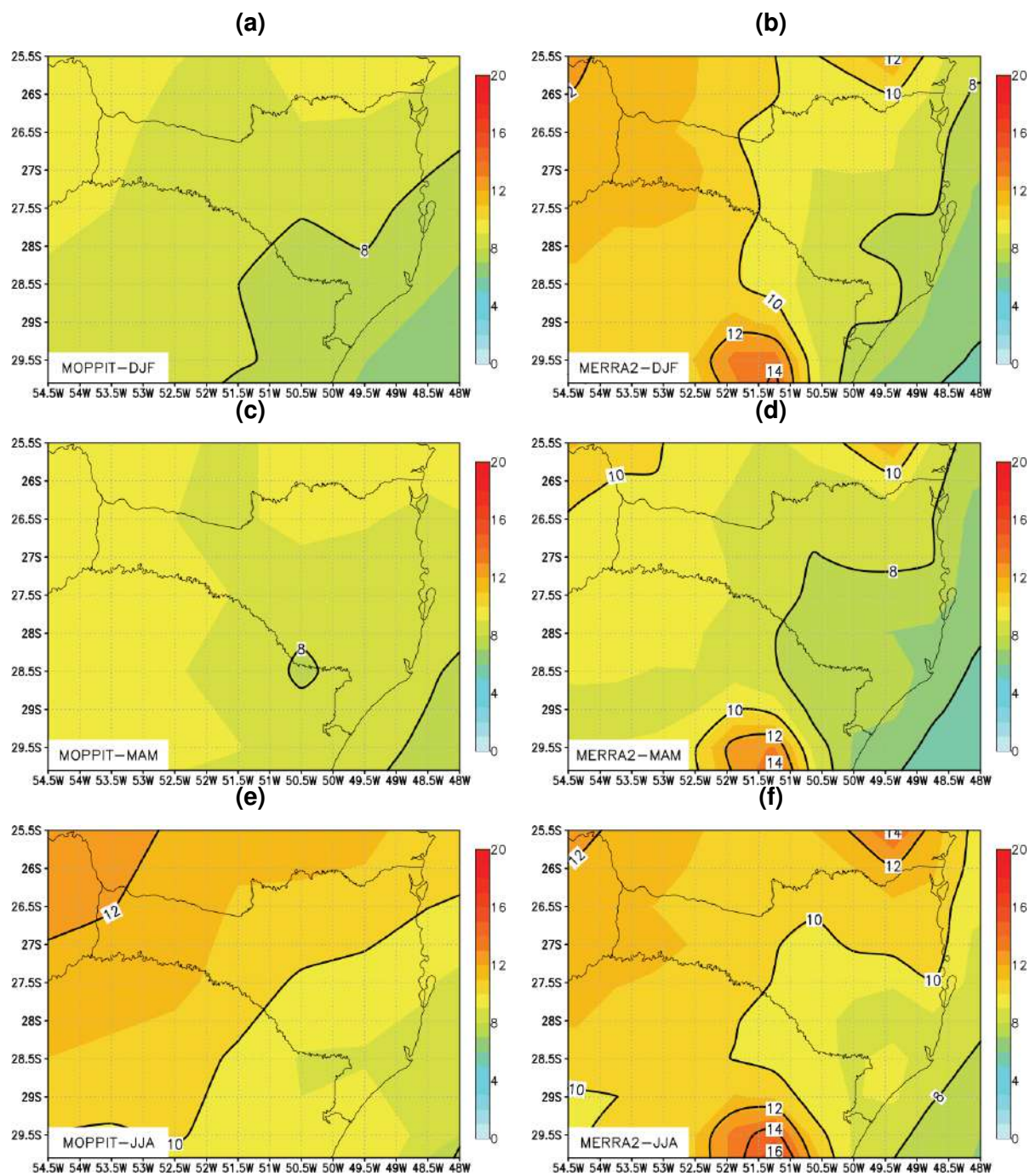
Nota-se uma diferença significativa nas concentrações de SO_2 e SO_4 , que são mais elevadas no Nordeste do Estado de Santa Catarina, enquanto as concen-

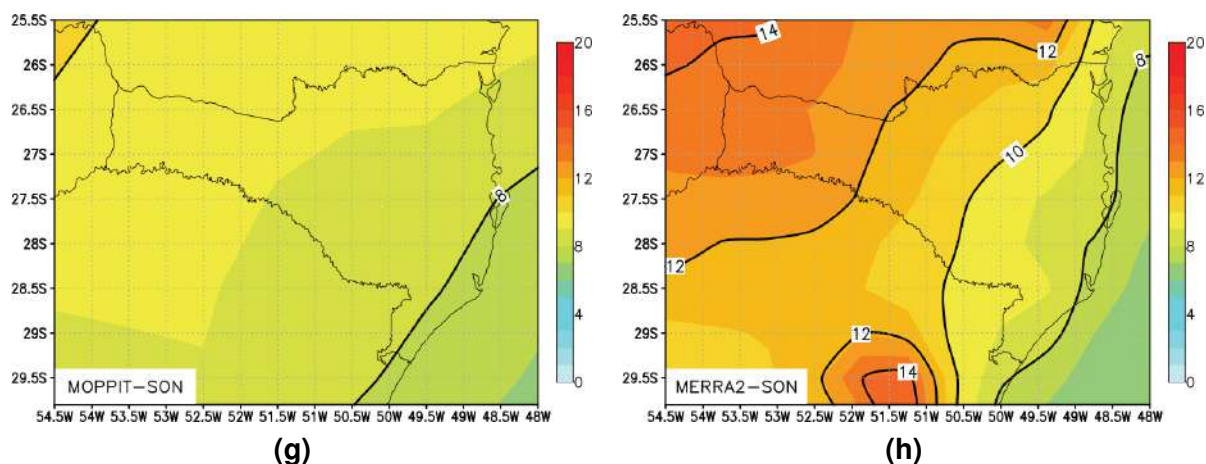
trações de *CO* são mais altas no Oeste do Estado, diminuindo em direção ao Leste. Essa distribuição espacial indica a presença de fontes distintas de poluição para esses poluentes. Caso a principal fonte de ambos fosse, por exemplo, queimadas locais ou emissões veiculares, seria esperado que esses dois poluentes (*SO₂* e *CO*) apresentassem padrões semelhantes de distribuição espaço-temporal, o que não se verifica neste caso.

Ao comparar diretamente os mapas gerados pelo MOPPIT e pelo MERRA-2, nota-se uma concordância próxima entre ambos, com representações semelhantes utilizando a mesma escala. O valor máximo de 0,2 ppm, considerado nominalmente baixo, sugere que o Monóxido de Carbono não é uma preocupação significativa como poluente na área da pesquisa.

Na região oeste de Santa Catarina, são observados os níveis mais altos de concentração do poluente *CO*, com uma diminuição gradual em direção ao leste, na região litorânea.

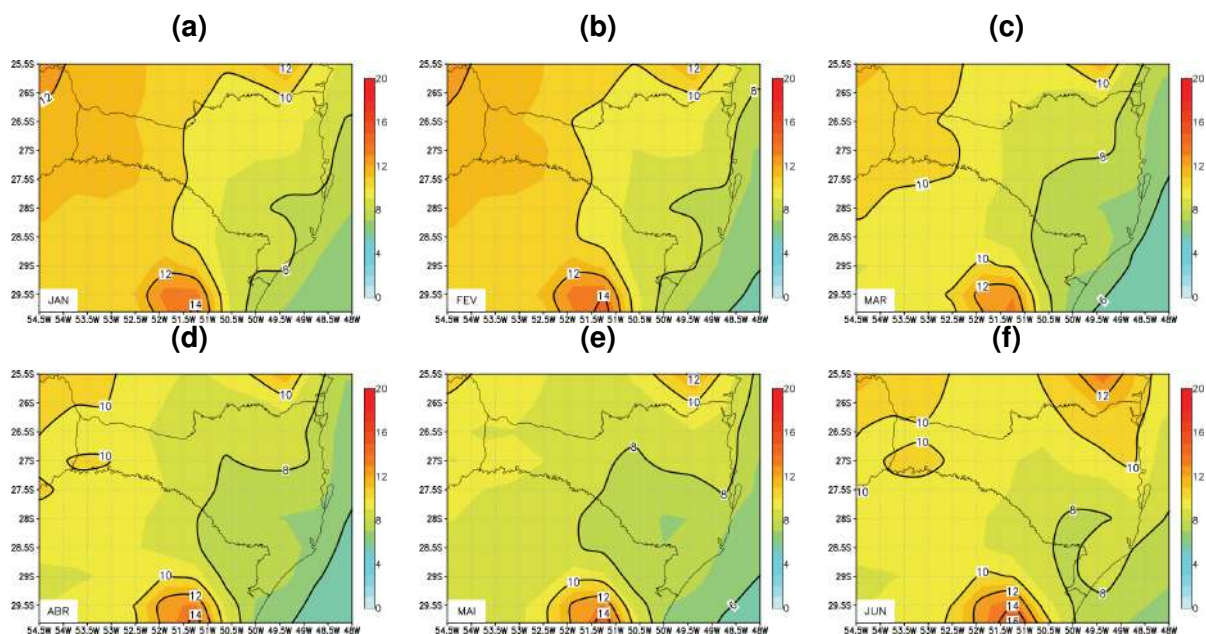
Figura 50 – Valores médios sazonais para Monóxido de Carbono no período de 2008 a 2022. Comparativo entre MOPPIT e Reanálise MERRA-2. Unidade: ppm ($\times 10^{-2}$)

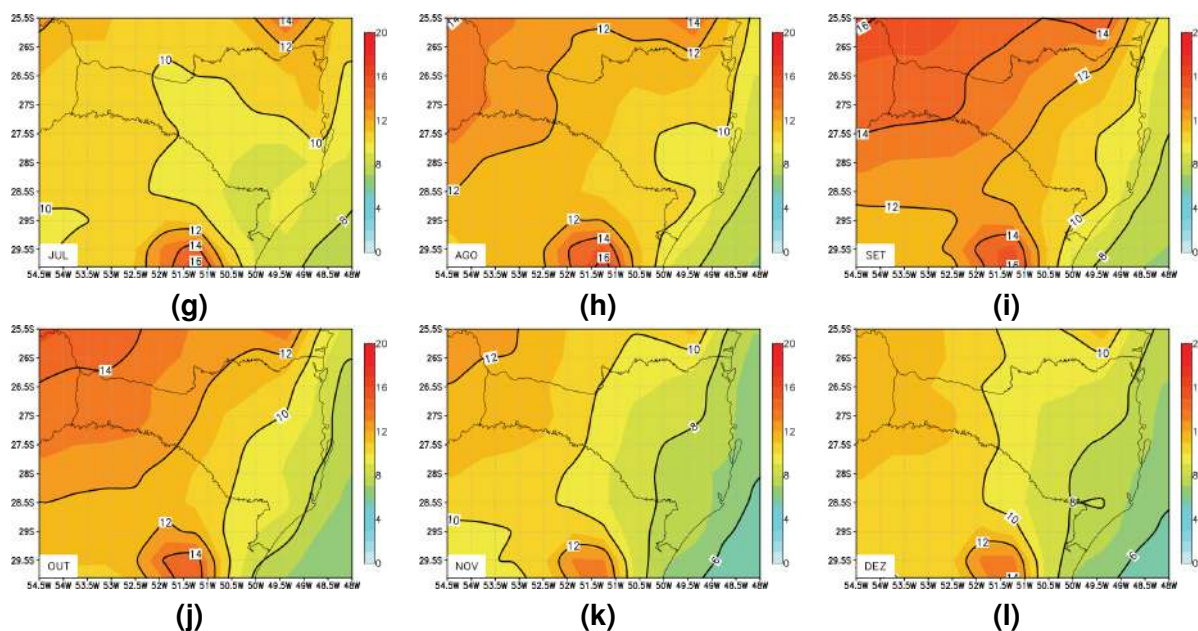




A climatologia mensal de CO do MERRA-2 para os 15 anos é então realizada, conforme demonstrado na Figura 51, destacando setembro (Figura 51i) como o mês com os valores mais elevados, enquanto dezembro e janeiro ficam empatados como os meses de menores valores (Figuras 51l e 51a).

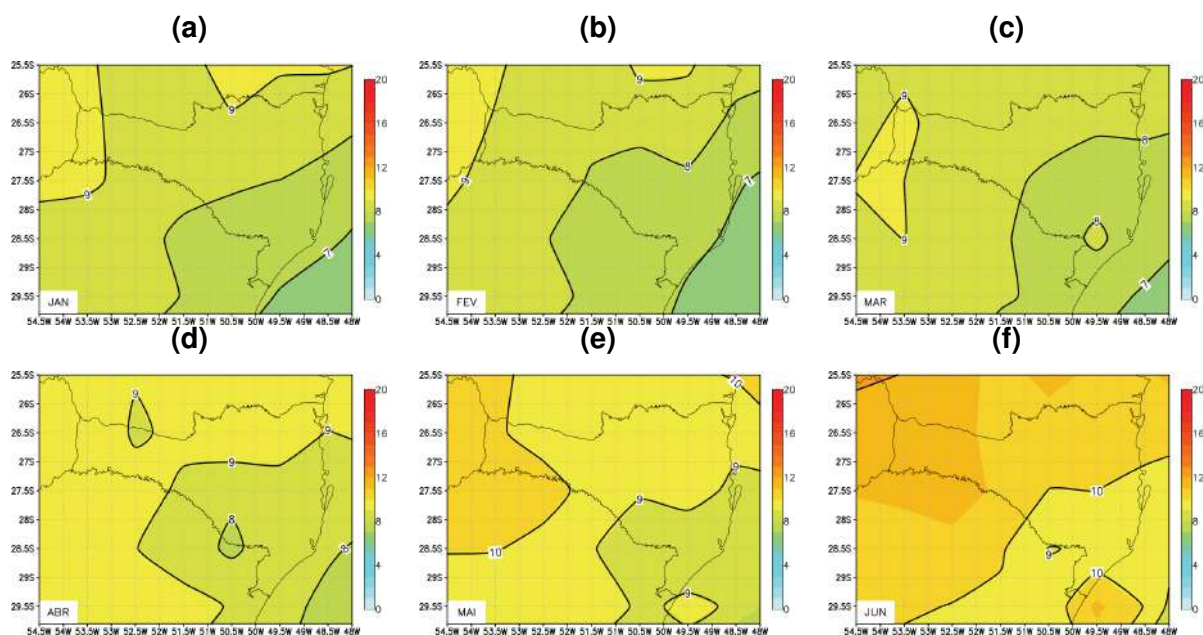
Figura 51 – Valores médios mensais para Monóxido de Carbono - CO , no período de 2008 a 2022, através de dados de reanálise MERRA-2. Unidade: $\text{ppm} \times 10^{-2}$

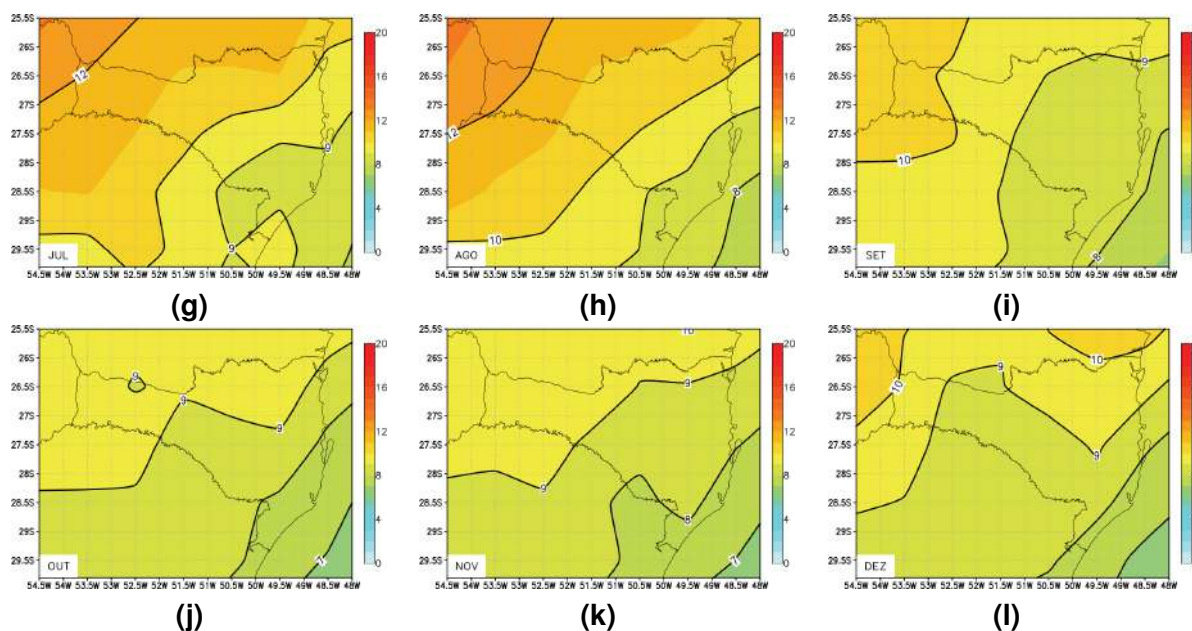




A climatologia mensal de *CO* do MOPPIT para os 15 anos é então realizada, conforme demonstrado na Figura 52, destacando os meses de junho, julho e agosto, diferente dos poluentes como carbono orgânico, *Black Carbon* e SO_4 que tem concentrações maiores nos meses de agosto, setembro e outubro. O mês de Janeiro fica como o mês de menores valores (Figura 52a).

Figura 52 – Valores médios mensais para *Monóxido de Carbono - CO*, no período de 2008 a 2022, através de dados de MOPPIT. Unidade: $ppm \times 10^{-2}$



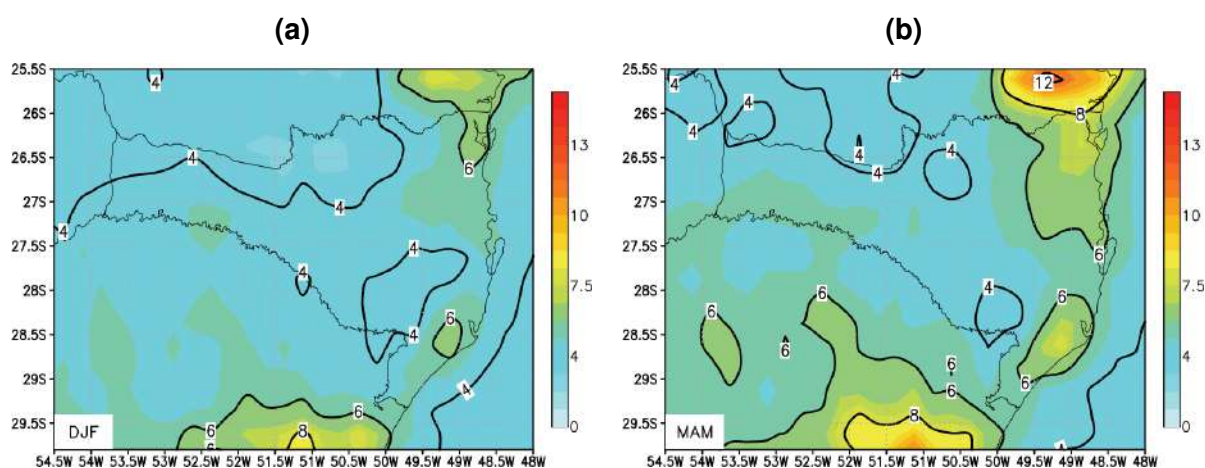


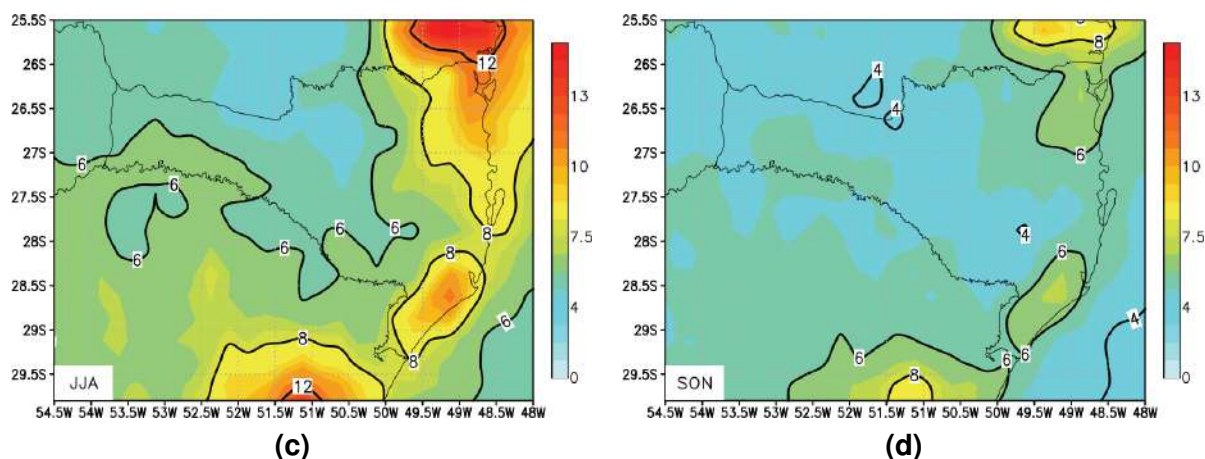
4.1.5.5 Dióximo de Nitrogênio

Os dados de Dióximo de Nitrogênio (NO_2) foram obtidos por meio do instrumento OMI, um sensor acoplado ao satélite Aura da NASA. Os resultados sazonais são representados na Figura 53.

A partir da observação do mapa apresentado na Figura 53c, pode-se identificar uma concentração significativa localizada nas coordenadas geográficas Latitude $-28,6^\circ$ e Longitude $-49,1^\circ$. Essa área corresponde ao município de Sangão, o qual possui aproximadamente 13 mil habitantes de acordo com Censo do IBGE de 2022. Ao analisar a região, nota-se a presença de municípios densamente povoados, como Criciúma e Tubarão. Assim, é possível inferir que a concentração do poluente observado pelos dados provavelmente é gerada nesses locais e transportada até Sangão.

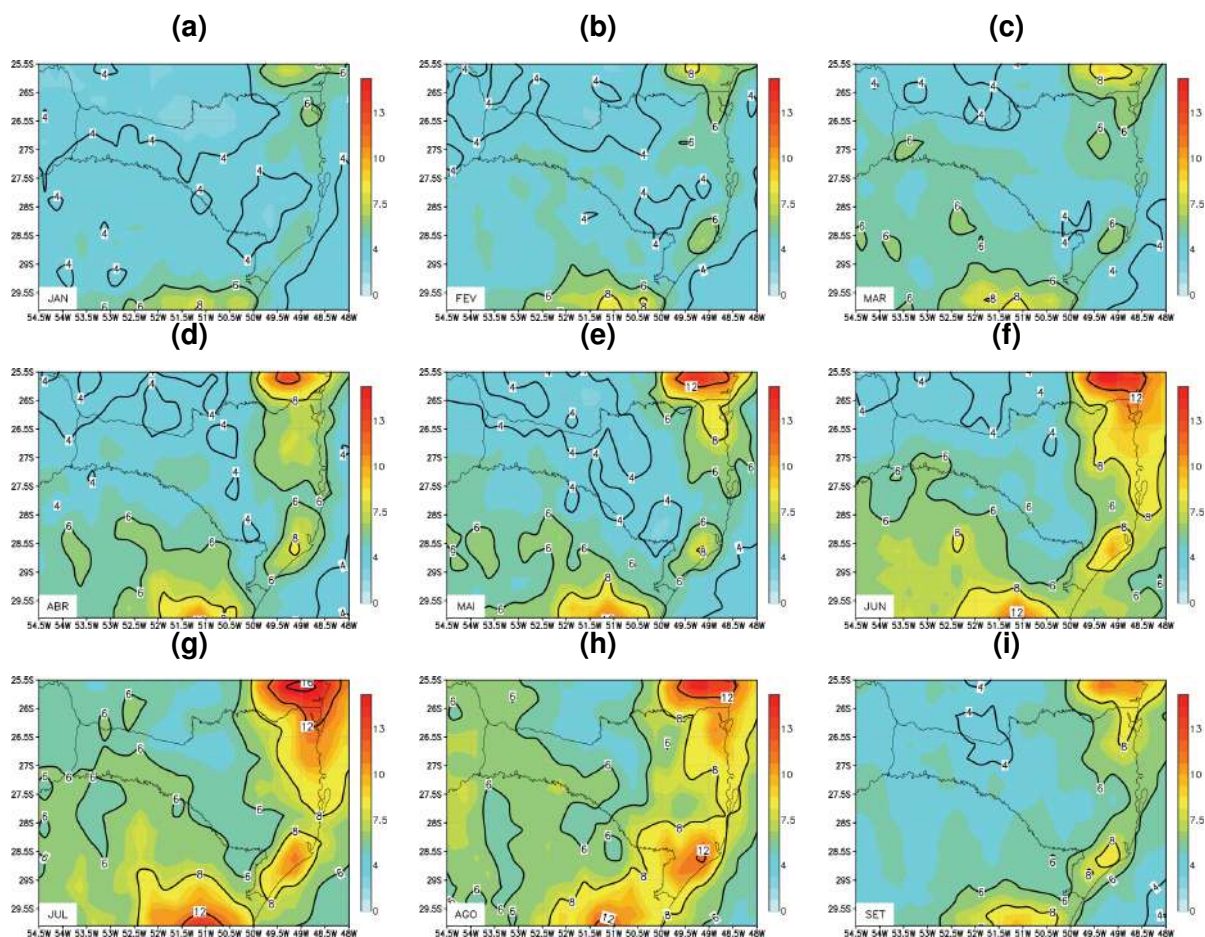
Figura 53 – Valores médios sazonais para Dióximo de Nitrogênio no período de 2008 a 2022, através de dados OMI. Unidade: $\mu\text{g m}^{-2}(\times 10^2)$

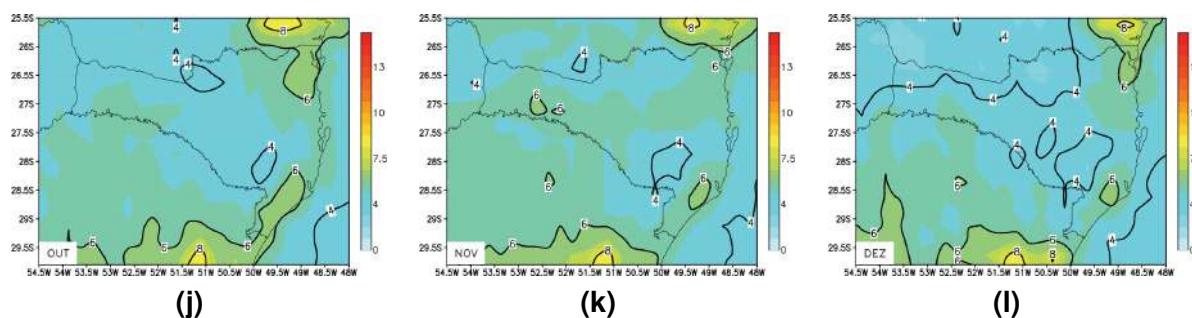




A climatologia mensal de NO_2 para os 15 anos é então realizada, conforme demonstrado na Figura 54, destacando junho, julho e agosto (Figuras 54f, 54g e 54h) como os meses com os valores mais elevados aumentando a partir de Maio, enquanto janeiro o mês de menores valores (Figura 54a). Observa-se este comportamento para os outros gases como SO_2 e CO , porém NO_2 assim como SO_2 as concentrações são maiores no Nordeste do Estado de Santa Catarina, diferente do CO que tem concentrações maiores no Oeste do Estado.

Figura 54 – Valores médios mensais para Dióxido de Nitrogênio, no período de 2008 a 2022, através de dados OMI. Unidade: $\mu g m^{-2} (\times 10^2)$



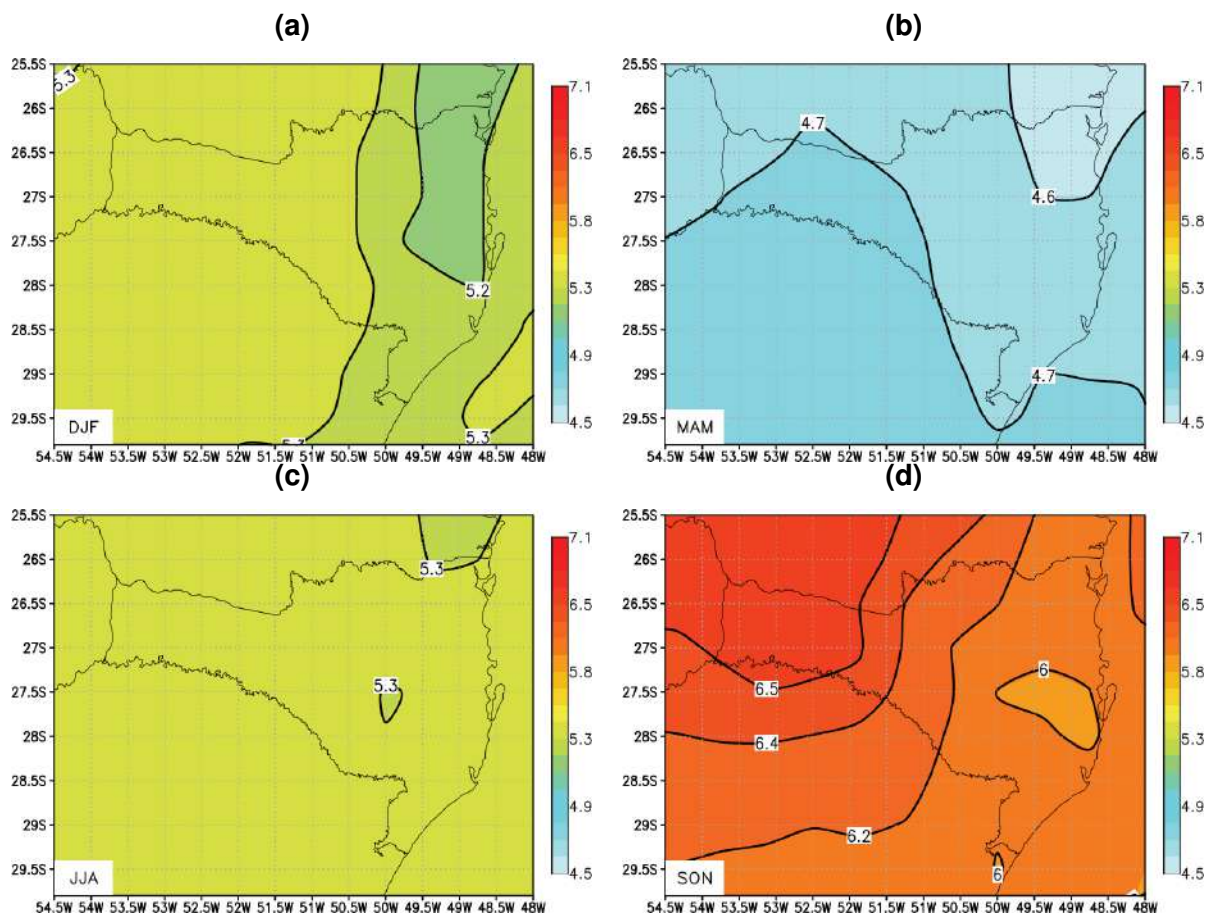


4.1.5.6 Ozônio

Para o Ozônio (O_3), foram obtidos dados da Reanálise MERRA-2, em um nível de pressão atmosférica de 875 hPa, escolhido por abranger todo o Estado de Santa Catarina e situar-se na baixa troposfera. Os resultados sazonais estão apresentados na Figura 55.

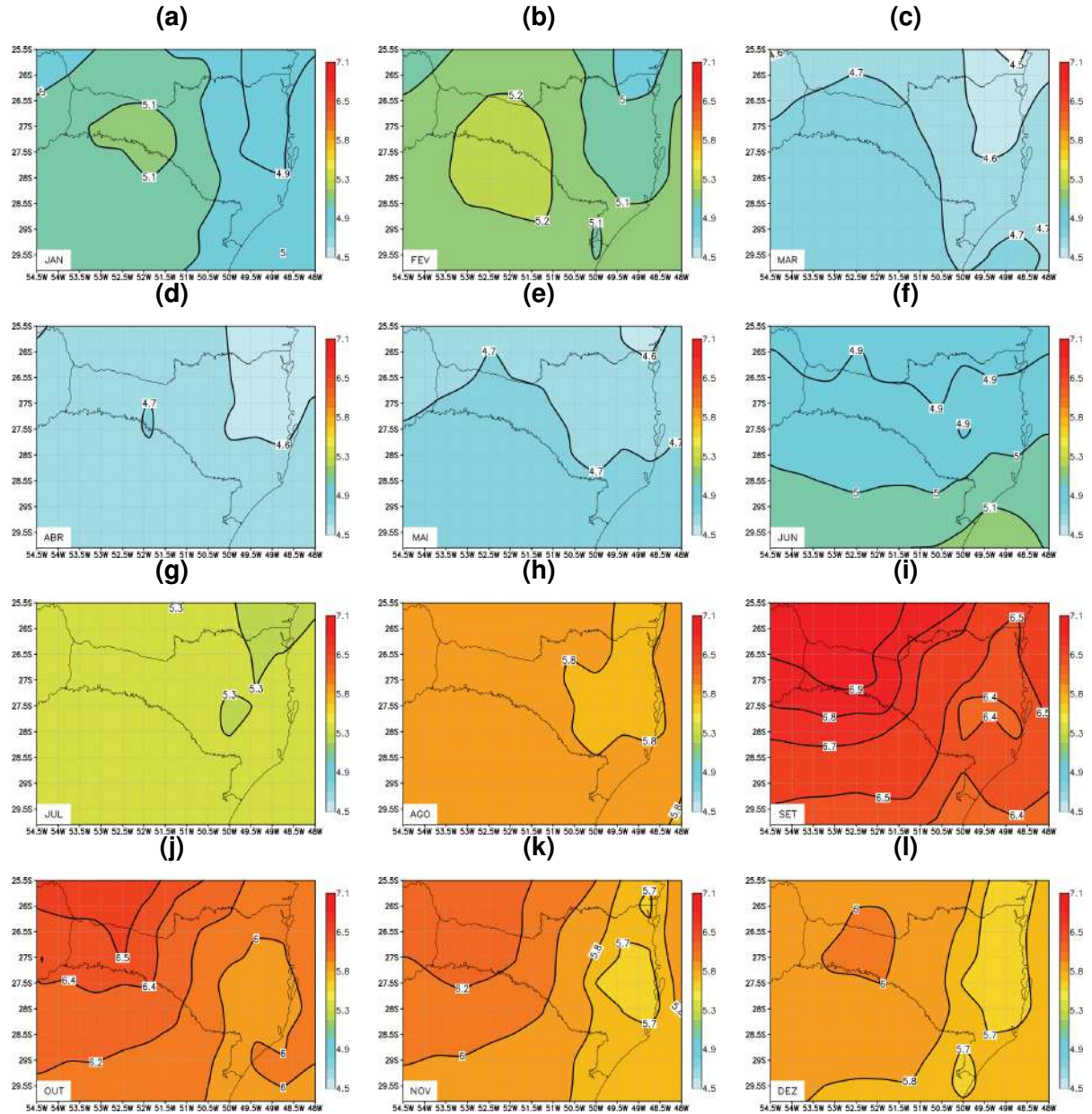
A partir da análise dos resultados, identifica-se a primavera como a estação com maiores concentrações de ozônio (Figura 55d), enquanto as menores concentrações ocorrem no outono (Figura 55b), e as concentrações no verão e inverno são semelhantes (Figura 55a e 55c).

Figura 55 – Valores médios sazonais para Ozônio no período de 2008 a 2022, através de dados de Reanálise MERRA-2. Unidade: $kg\ kg^{-1}$, 875 hPa



A climatologia mensal de O_3 para os 15 anos foi realizada, conforme demonstrado na Figura 56. Destaca-se o mês de setembro (Figura 56i) como aquele com os valores mais elevados, enquanto maio apresenta os menores valores (Figura 56e).

Figura 56 – Valores médios mensais para Ozônio, no período de 2008 a 2022, através de dados de Reanálise MERRA-2. Unidade: $kg\ kg^{-1}$, 875 hPa



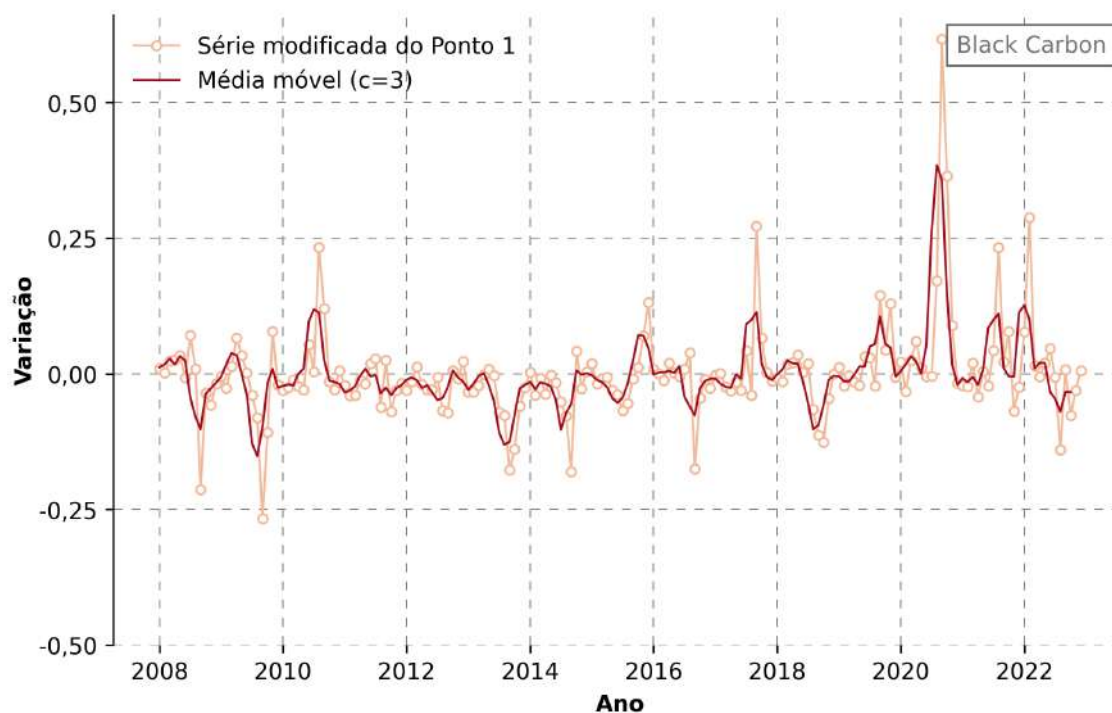
4.1.6 Análise de tendências

4.1.6.1 *Black Carbon*

O gráfico representado na Figura 57 exibe a série histórica modificada correspondente ao Ponto 1 juntamente com a representação suavizada gerada pela média móvel. Conforme descrito no item 3.7.4, o Teste de *Mann-Kendall* é aplicado aos valores resultantes da suavização pela média móvel.

O pico em 2020, pode ser explicado pelo aumento das queimadas no Norte e Centro Oeste do Brasil naquele ano, onde a poluição diminuiu nas capitais devido a COVID-19 com menor tráfego de veículos e das atividades presenciais (*home office* e aula *online*), porém aumentou de forma exacerbada as concentrações dos poluentes atmosféricos sobre o Norte e o Centro Oeste do país devido as queimadas causadas por atividades humanas.

Figura 57 – Gráfico da série histórica modificada do Ponto 1 do poluente *Black Carbon*, no período de 2008 a 2022



A Tabela 3 evidencia que em todos os pontos houve uma tendência positiva para o poluente *Black Carbon* no período de 15 anos, indicando um aumento progressivo ao longo do tempo.

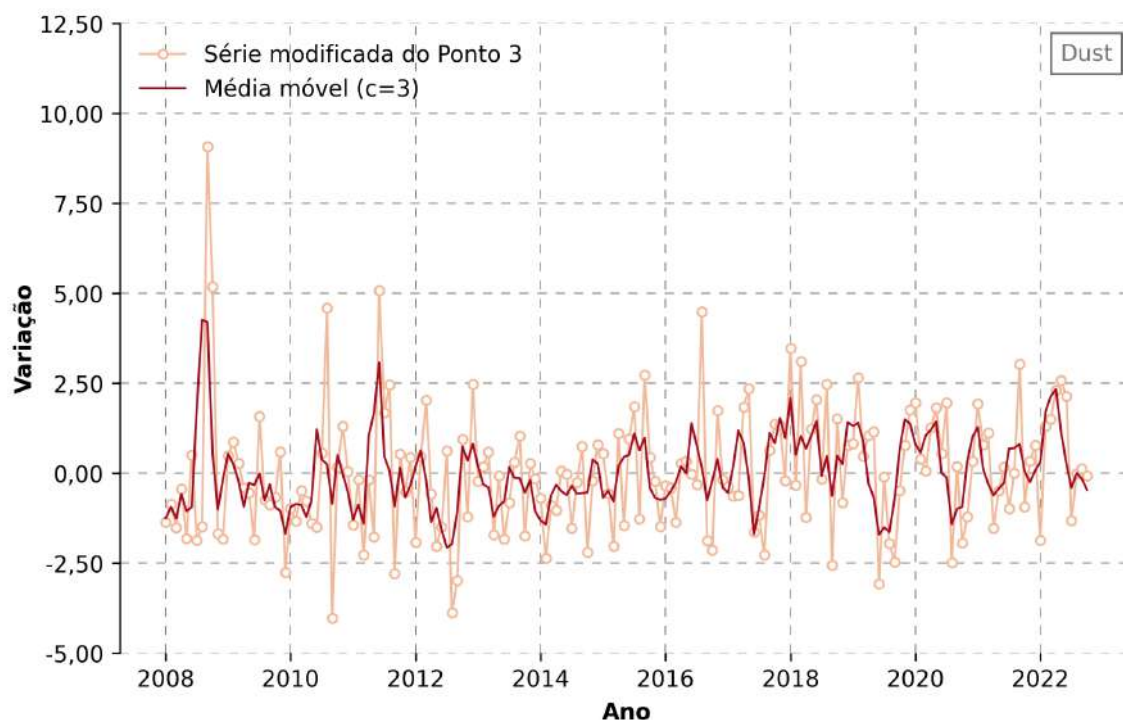
Ponto	Z	α	p-valor	τ	Tendência
1	3,726	0,05	<0,001	0,188	Ascendente
2	3,726	0,05	<0,001	0,188	Ascendente
3	4,028	0,05	<0,001	0,203	Ascendente
4	4,028	0,05	<0,001	0,203	Ascendente
5	5,286	0,05	<0,001	0,266	Ascendente
6	4,768	0,05	<0,001	0,241	Ascendente
7	4,089	0,05	<0,001	0,206	Ascendente
8	3,135	0,05	<0,001	0,158	Ascendente
9	4,016	0,05	<0,001	0,203	Ascendente
10	2,944	0,05	<0,001	0,149	Ascendente
11	2,944	0,05	<0,001	0,149	Ascendente
12	2,944	0,05	<0,001	0,149	Ascendente
13	3,135	0,05	<0,001	0,158	Ascendente
14	3,127	0,05	<0,001	0,158	Ascendente
15	3,661	0,05	<0,001	0,185	Ascendente

Tabela 3 – Análise de tendência *Mann-Kendall* do poluente *Black Carbon*

4.1.6.2 Dust

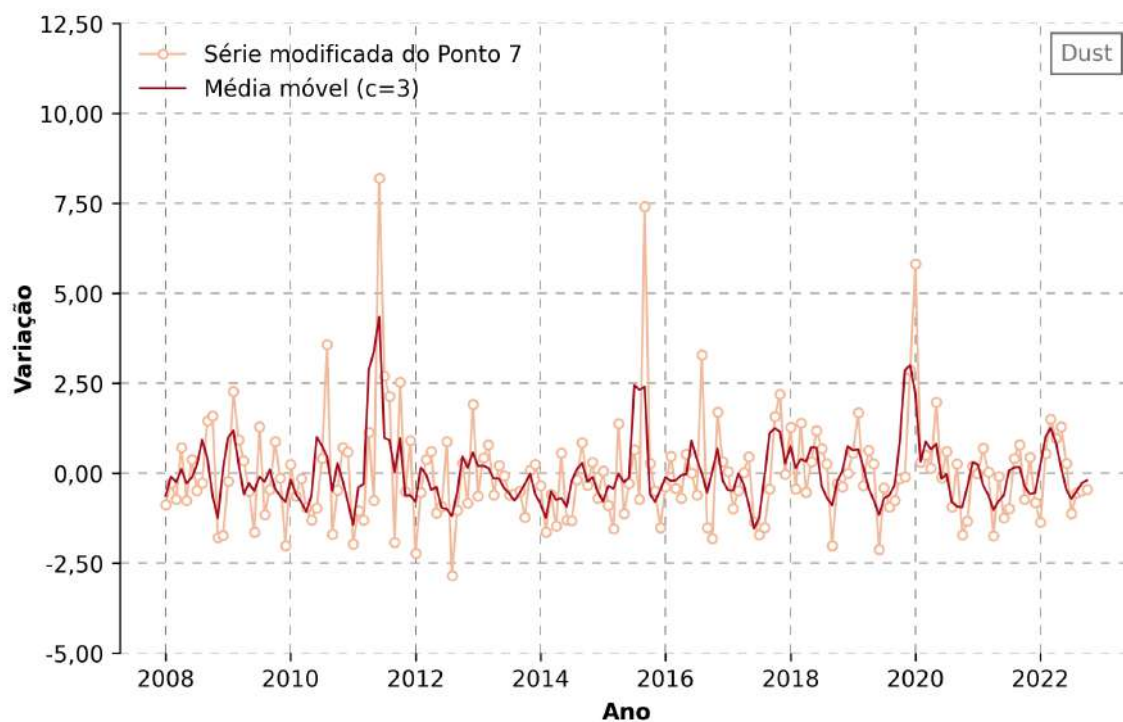
O gráfico representado na Figura 58 exibe a série histórica modificada correspondente ao Ponto 3 juntamente com a representação suavizada gerada pela média móvel.

Figura 58 – Gráfico da série histórica modificada do Ponto 3 do poluente *Dust*, no período de 2008 a 2022



Já o gráfico da Figura 59 ilustra a série histórica modificada do Ponto 7. Na série temporal, são observados três picos do poluente durante o período avaliado.

Figura 59 – Gráfico da série histórica modificada do Ponto 7 do poluente *Dust*, no período de 2008 a 2022



A Tabela 4 revela que em nove pontos foi identificada tendência positiva, enquanto em seis pontos não houve tendência. Vale destacar que os pontos que não exibiram tendência estão situados na região costeira de Santa Catarina.

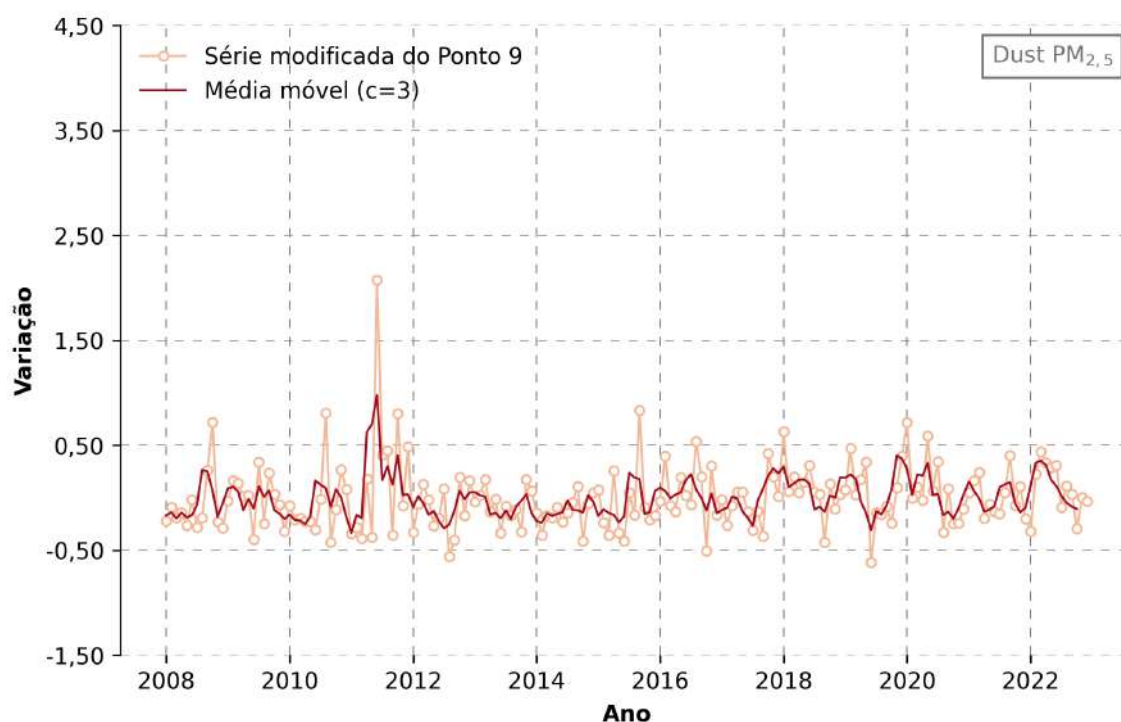
Ponto	Z	α	p-valor	τ	Tendência
1	4,569	0,05	<0,001	0,231	Ascendente
2	4,569	0,05	<0,001	0,231	Ascendente
3	4,310	0,05	<0,001	0,218	Ascendente
4	4,310	0,05	<0,001	0,218	Ascendente
5	3,743	0,05	<0,001	0,189	Ascendente
6	3,293	0,05	<0,001	0,166	Ascendente
7	0,785	0,05	0,432	0,040	Não há
8	2,579	0,05	0,010	0,130	Ascendente
9	2,954	0,05	0,003	0,149	Ascendente
10	1,761	0,05	0,078	0,089	Não há
11	1,761	0,05	0,078	0,089	Não há
12	1,761	0,05	0,078	0,089	Não há
13	2,579	0,05	0,010	0,130	Ascendente
14	1,544	0,05	0,122	0,078	Não há
15	1,057	0,05	0,291	0,053	Não há

Tabela 4 – Análise de tendência *Mann-Kendall* do poluente *Dust*

4.1.6.3 *Dust* $MP_{2,5}$

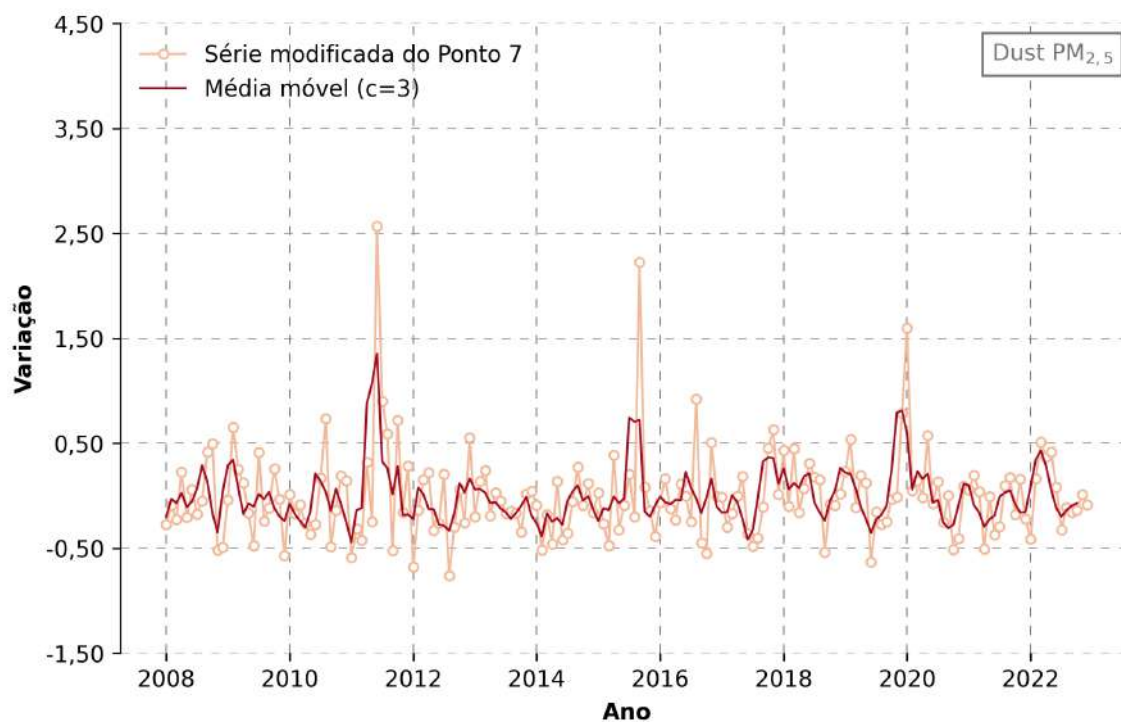
O gráfico representado na Figura 60 exibe a série histórica modificada do Ponto 9 do poluente *Dust* $MP_{2,5}$ juntamente com a representação suavizada gerada pela média móvel.

Figura 60 – Gráfico da série histórica modificada do Ponto 9 do poluente *Dust* $MP_{2,5}$, no período de 2008 a 2022



Já o gráfico da Figura 61 mostra a série histórica modificada do Ponto 7 e a suavização realizada pela média móvel. O Teste de *Mann-Kendall* não encontrou evidências suficientes para determinar aumento ou diminuição do poluente no período avaliado para esse ponto.

Figura 61 – Gráfico da série histórica modificada do Ponto 7 do poluente *Dust* $MP_{2,5}$, no período de 2008 a 2022



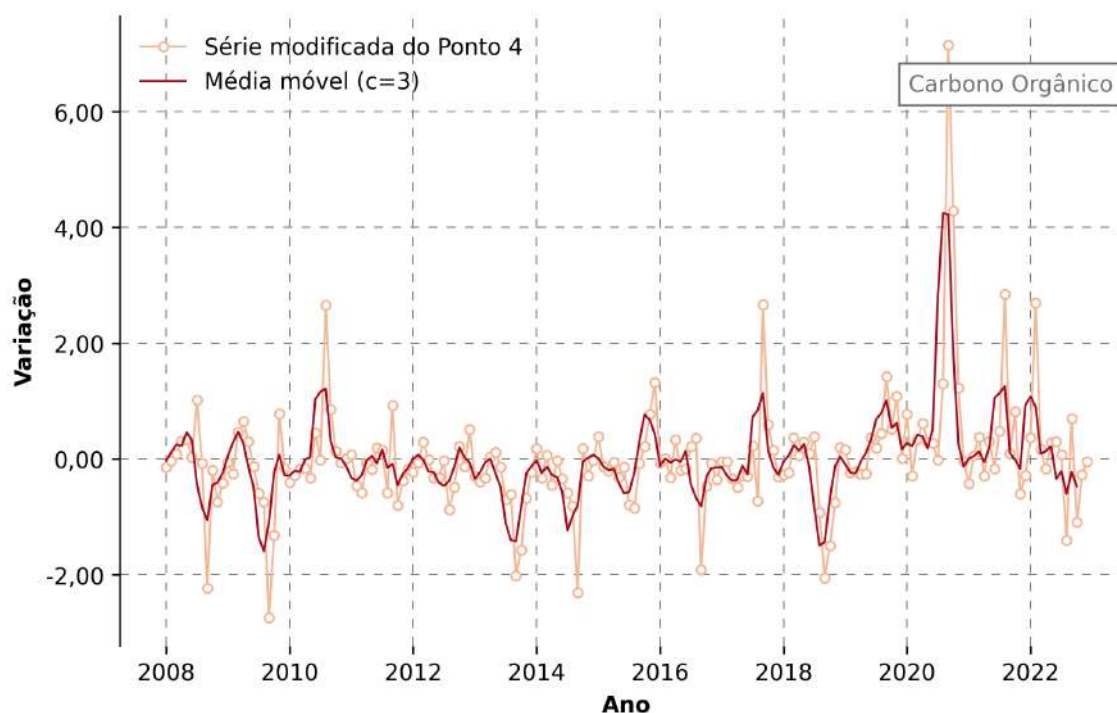
A Tabela 5 demonstra que em seis pontos não houve tendência e em nove pontos a tendência foi positiva para o poluente *Dust* no período de 15 anos. Todos os pontos em que não houve tendência estão localizados na zona costeira do Estado de Santa Catarina.

Ponto	Z	α	p-valor	τ	Tendência
1	4,675	0,05	<0,001	0,236	Ascendente
2	4,675	0,05	<0,001	0,236	Ascendente
3	4,458	0,05	<0,001	0,225	Ascendente
4	4,458	0,05	<0,001	0,225	Ascendente
5	3,998	0,05	<0,001	0,202	Ascendente
6	3,477	0,05	<0,001	0,176	Ascendente
7	0,868	0,05	0,385	0,044	Não há
8	2,722	0,05	0,006	0,137	Ascendente
9	3,319	0,05	<0,001	0,168	Ascendente
10	1,857	0,05	0,063	0,094	Não há
11	1,857	0,05	0,063	0,094	Não há
12	1,857	0,05	0,063	0,094	Não há
13	2,722	0,05	0,006	0,137	Ascendente
14	1,613	0,05	0,107	0,081	Não há
15	1,147	0,05	0,251	0,058	Não há

Tabela 5 – Análise de tendência *Mann-Kendall* do poluente *Dust* $MP_{2,5}$

4.1.6.4 Carbono Orgânico

O gráfico representado na Figura 62 exibe a série histórica modificada do Ponto 4 do poluente Carbono orgânico juntamente com a representação suavizada gerada pela média móvel. Houve um pico do poluente no segundo semestre de 2020.

Figura 62 – Gráfico da série histórica modificada do Ponto 4 do poluente Carbono Orgânico, no período de 2008 a 2022

A Tabela 6 demonstra que em todos os pontos houve tendência positiva para o poluente Carbono Orgânico no período de 15 anos.

Ponto	Z	α	p-valor	τ	Tendência
1	3,334	0,05	<0,001	0,168	Ascendente
2	3,334	0,05	<0,001	0,168	Ascendente
3	3,568	0,05	<0,001	0,180	Ascendente
4	3,568	0,05	<0,001	0,180	Ascendente
5	4,954	0,05	<0,001	0,250	Ascendente
6	4,114	0,05	<0,001	0,208	Ascendente
7	3,324	0,05	<0,001	0,168	Ascendente
8	2,959	0,05	0,003	0,149	Ascendente
9	3,875	0,05	<0,001	0,196	Ascendente
10	3,122	0,05	<0,001	0,158	Ascendente
11	3,122	0,05	<0,001	0,158	Ascendente
12	3,122	0,05	<0,001	0,158	Ascendente
13	2,959	0,05	<0,001	0,149	Ascendente
14	3,203	0,05	<0,001	0,162	Ascendente
15	3,238	0,05	<0,001	0,164	Ascendente

Tabela 6 – Análise de tendência *Mann-Kendall* do poluente Carbono Orgânico

4.1.6.5 Sulfato - SO_4

Os gráficos apresentados nas Figuras 63 e 64 exibem a série histórica modificada dos Pontos 4 e 5, respectivamente, do poluente Sulfato (SO_4), acompanhada da representação suavizada pela média móvel. Observa-se um pico do poluente no Ponto 4 no segundo semestre de 2020. Embora seja possível discernir uma tendência de queda em ambos os gráficos, esta só pode ser confirmada pelo teste de *Mann-Kendall*.

Figura 63 – Gráfico da série histórica modificada do Ponto 4 do poluente Sulfato, no período de 2008 a 2022

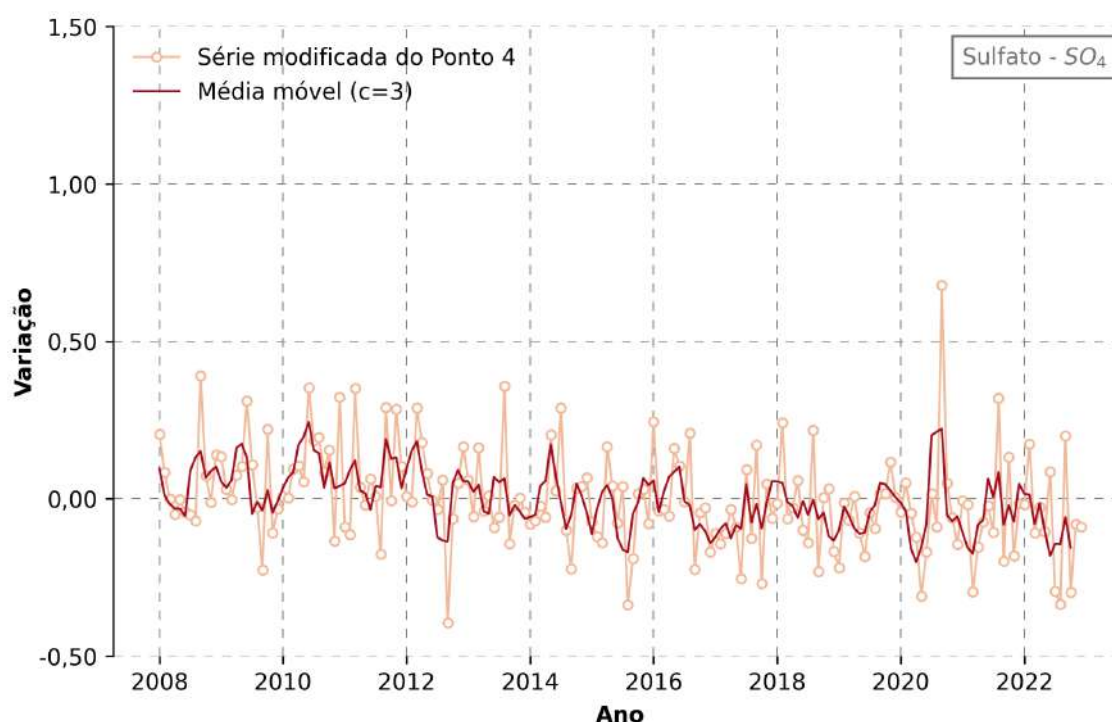
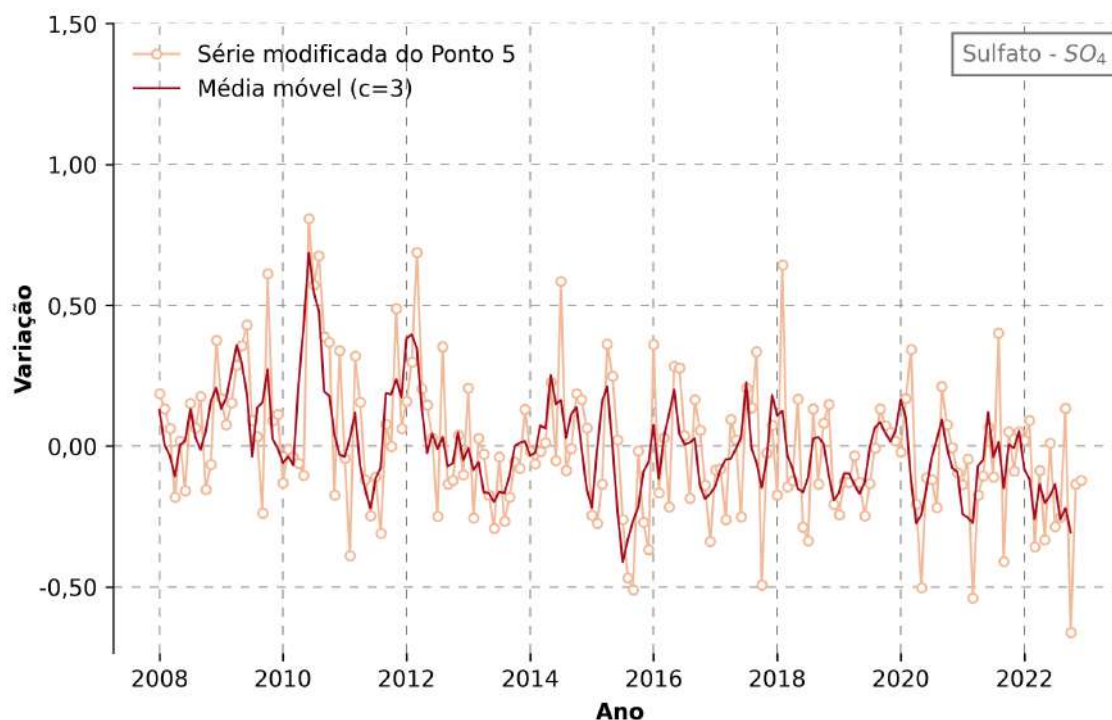


Figura 64 – Gráfico da série histórica modificada do Ponto 5 do poluente Sulfato, no período de 2008 a 2022

A Tabela 7 indica que em todos os pontos analisados houve uma tendência descendente para o poluente particulado sulfato ao longo do período estudado.

Ponto	Z	α	p-valor	τ	Tendência
1	-5,983	0,05	<0,001	-0,302	Descendente
2	-5,983	0,05	<0,001	-0,302	Descendente
3	-6,670	0,05	<0,001	-0,337	Descendente
4	-6,670	0,05	<0,001	-0,337	Descendente
5	-5,800	0,05	<0,001	-0,293	Descendente
6	-5,015	0,05	<0,001	-0,253	Descendente
7	-5,085	0,05	<0,001	-0,257	Descendente
8	-5,500	0,05	<0,001	-0,278	Descendente
9	-6,771	0,05	<0,001	-0,341	Descendente
10	-4,660	0,05	<0,001	-0,235	Descendente
11	-4,660	0,05	<0,001	-0,235	Descendente
12	-4,660	0,05	<0,001	-0,235	Descendente
13	-5,500	0,05	<0,001	-0,278	Descendente
14	-3,824	0,05	<0,001	-0,193	Descendente
15	-3,158	0,05	<0,001	-0,159	Descendente

Tabela 7 – Análise de tendência *Mann-Kendall* do poluente Sulfato

4.1.6.6 Sal Marinho

Os gráficos apresentados nas Figuras 65 e 66 exibem a série histórica modificada dos Pontos 1 e 13, respectivamente, do poluente Sal Marinho, acompanhada da representação suavizada pela média móvel. Observa-se a diferença dos pontos, sendo o primeiro localizado no oeste catarinense e o segundo na região litorânea.

Figura 65 – Gráfico da série histórica modificada do Ponto 1 do poluente Sal Marinho, no período de 2008 a 2022

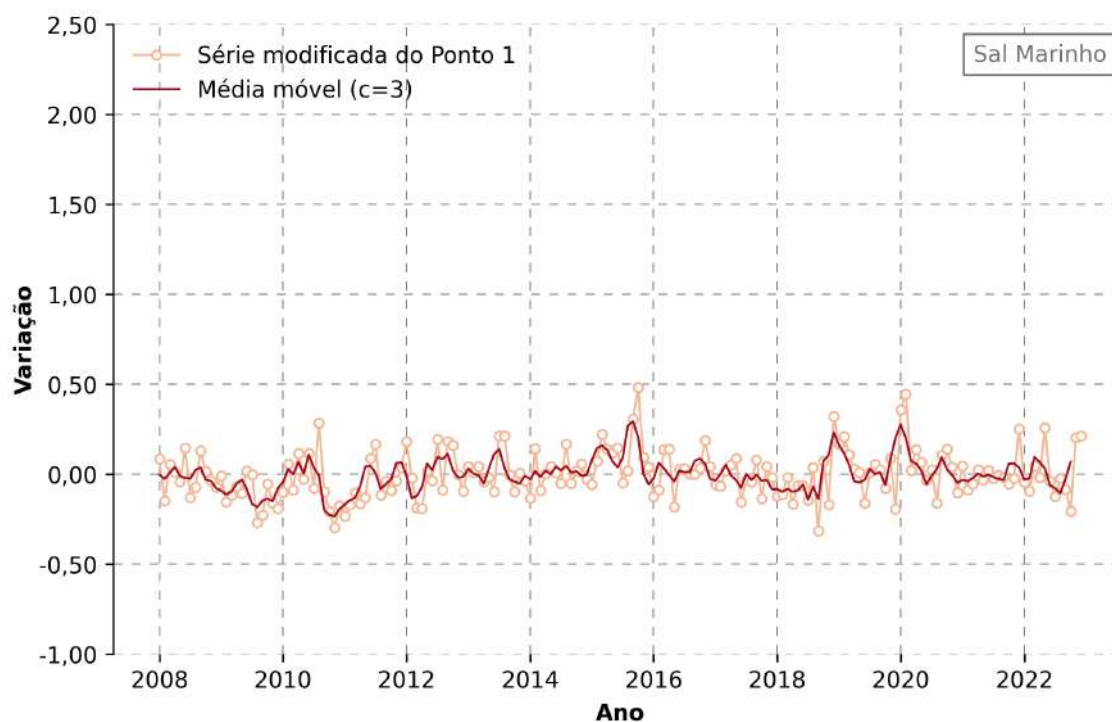
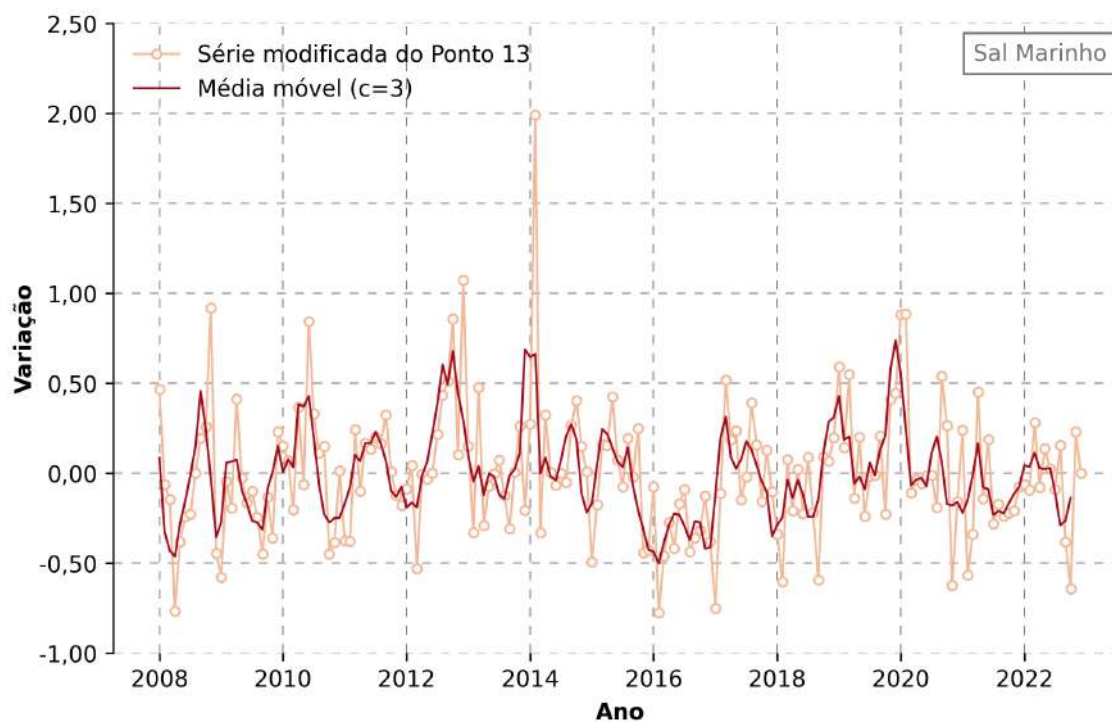


Figura 66 – Gráfico da série histórica modificada do Ponto 13 do poluente Sal Marinho, no período de 2008 a 2022



A Tabela 8 indica que houve seis pontos com tendência ascendente para o poluente sal marinho, três pontos com tendência descendente e seis pontos onde não houve tendência no período avaliado.

Ponto	Z	α	p-valor	τ	Tendência
1	2,380	0,05	0,017	0,120	Ascendente
2	2,380	0,05	0,017	0,120	Ascendente
3	2,305	0,05	0,021	0,116	Ascendente
4	2,305	0,05	0,021	0,116	Ascendente
5	3,185	0,05	0,001	0,161	Ascendente
6	2,468	0,05	0,013	0,124	Ascendente
7	-2,204	0,05	0,027	-0,111	Descendente
8	-0,448	0,05	0,654	-0,023	Não há
9	-1,228	0,05	0,219	-0,062	Não há
10	-1,832	0,05	0,067	-0,093	Não há
11	-1,832	0,05	0,067	-0,093	Não há
12	-1,832	0,05	0,067	-0,093	Não há
13	-0,448	0,05	0,654	-0,023	Não há
14	-2,126	0,05	0,033	-0,107	Descendente
15	-2,511	0,05	0,012	-0,127	Descendente

Tabela 8 – Análise de tendência *Mann-Kendall* do poluente Sal Marinho

4.1.6.7 $MP_{2,5}$

Os gráficos apresentados nas Figuras 67 e 68 exibem a série histórica modificada dos Pontos 4 e 15, respectivamente, do poluente particulado fino $MP_{2,5}$, acompanhada da representação suavizada pela média móvel.

Figura 67 – Gráfico da série histórica modificada do Ponto 4 do poluente particulado fino $MP_{2,5}$, no período de 2008 a 2022

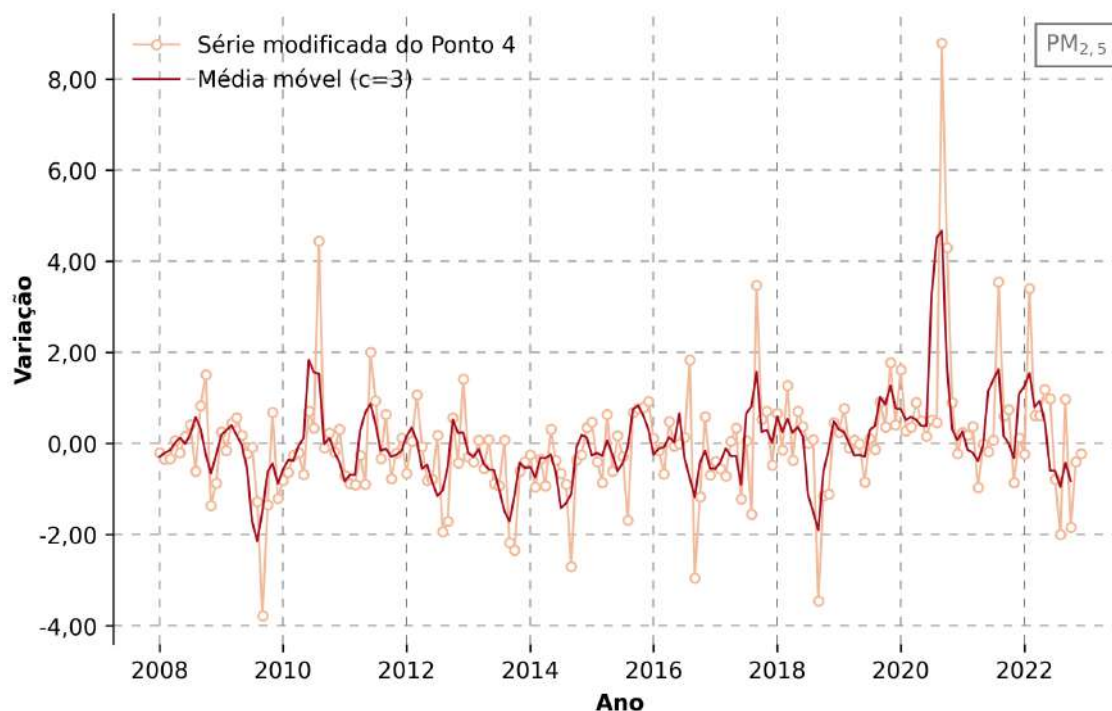
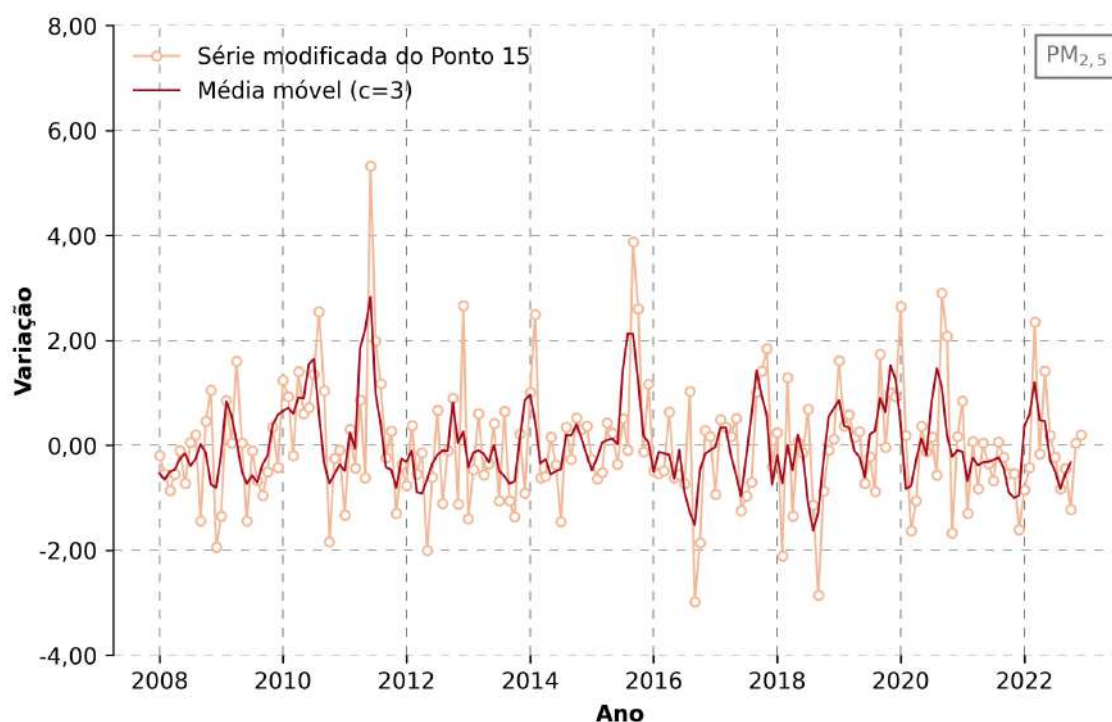


Figura 68 – Gráfico da série histórica modificada do Ponto 15 do poluente Sal Marinho, no período de 2008 a 2022



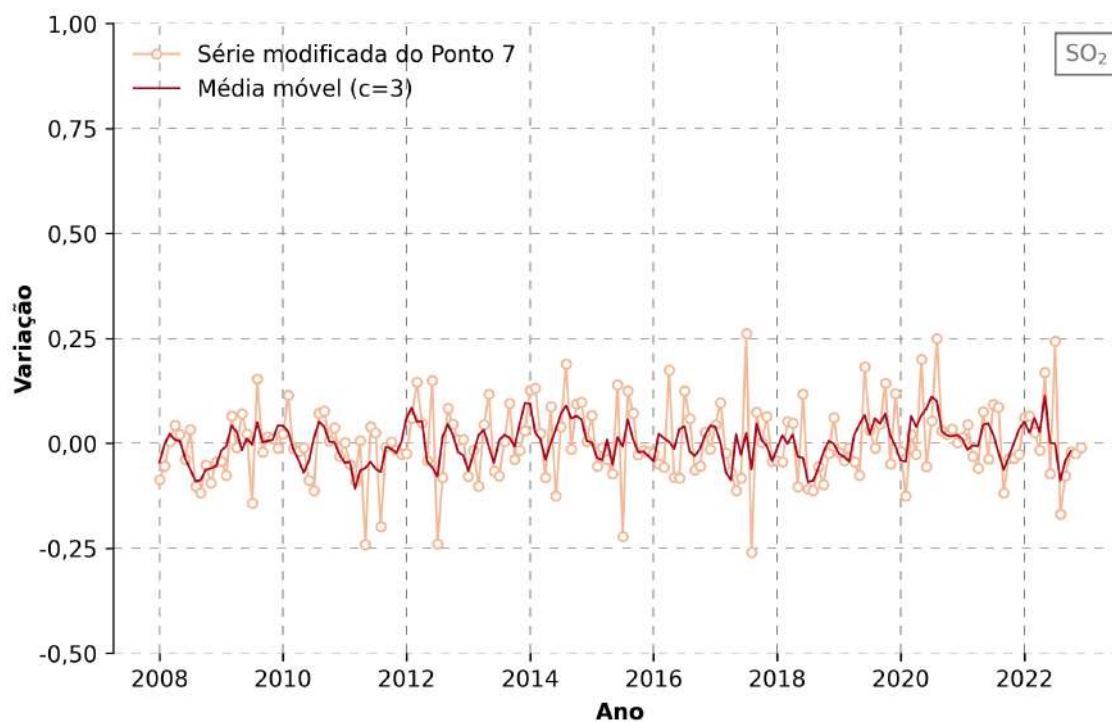
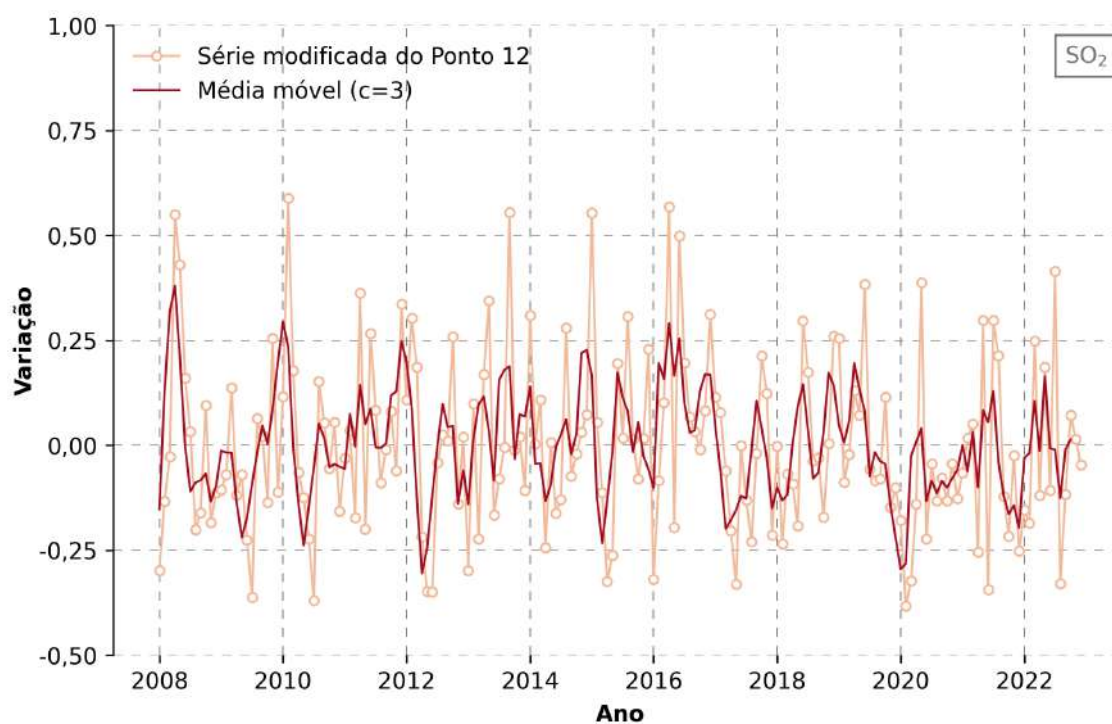
A Tabela 9 indica que houve oito pontos com tendência ascendente para o poluente $MP_{2,5}$ e em seis não houve tendência no período em estudo.

Ponto	Z	α	p-valor	τ	Tendência
1	3,814	0,05	<0,001	0,193	Ascendente
2	3,814	0,05	<0,001	0,193	Ascendente
3	3,867	0,05	<0,001	0,195	Ascendente
4	3,867	0,05	<0,001	0,195	Ascendente
5	4,632	0,05	<0,001	0,233	Ascendente
6	3,678	0,05	0,001	0,185	Ascendente
7	1,157	0,05	0,247	0,058	Não há
8	2,012	0,05	0,044	0,096	Ascendente
9	1,907	0,05	0,056	0,096	Não há
10	1,104	0,05	0,269	0,056	Não há
11	1,104	0,05	0,269	0,056	Não há
12	1,104	0,05	0,269	0,055	Não há
13	2,012	0,05	0,044	0,101	Ascendente
14	1,185	0,05	0,236	0,060	Não há
15	1,180	0,05	0,238	0,060	Não há

Tabela 9 – Análise de tendência *Mann-Kendall* do poluente $MP_{2,5}$

4.1.6.8 Dióxido de Enxofre

Os gráficos apresentados nas Figuras 69 e 70 exibem a série histórica modificada dos Pontos 7 e 12, respectivamente, do poluente SO_2 , acompanhada da representação suavizada pela média móvel.

Figura 69 – Gráfico da série histórica modificada do Ponto 7 do poluente SO_2 , no período de 2008 a 2022**Figura 70 – Gráfico da série histórica modificada do Ponto 12 do poluente SO_2 , no período de 2008 a 2022**

A Tabela 10 demonstra que cinco pontos houve tendência ascendente do poluente SO_2 , enquanto dez não houve tendência para o período analisado.

Ponto	Z	α	p-valor	τ	Tendência
1	1,635	0,05	0,102	0,083	Não há
2	1,635	0,05	0,102	0,083	Não há
3	2,481	0,05	0,013	0,125	Ascendente
4	2,481	0,05	0,013	0,125	Ascendente
5	2,992	0,05	0,003	0,151	Ascendente
6	2,654	0,05	0,003	0,134	Ascendente
7	2,521	0,05	0,012	0,127	Ascendente
8	0,136	0,05	0,892	0,007	Não há
9	-1,178	0,05	0,119	-0,060	Não há
10	-1,006	0,05	0,314	-0,051	Não há
11	-1,006	0,05	0,314	-0,051	Não há
12	-1,006	0,05	0,314	-0,051	Não há
13	0,136	0,05	0,892	0,007	Não há
14	-0,586	0,05	0,558	-0,030	Não há
15	1,009	0,05	0,313	0,051	Não há

Tabela 10 – Análise de tendência *Mann-Kendall* do poluente SO_2

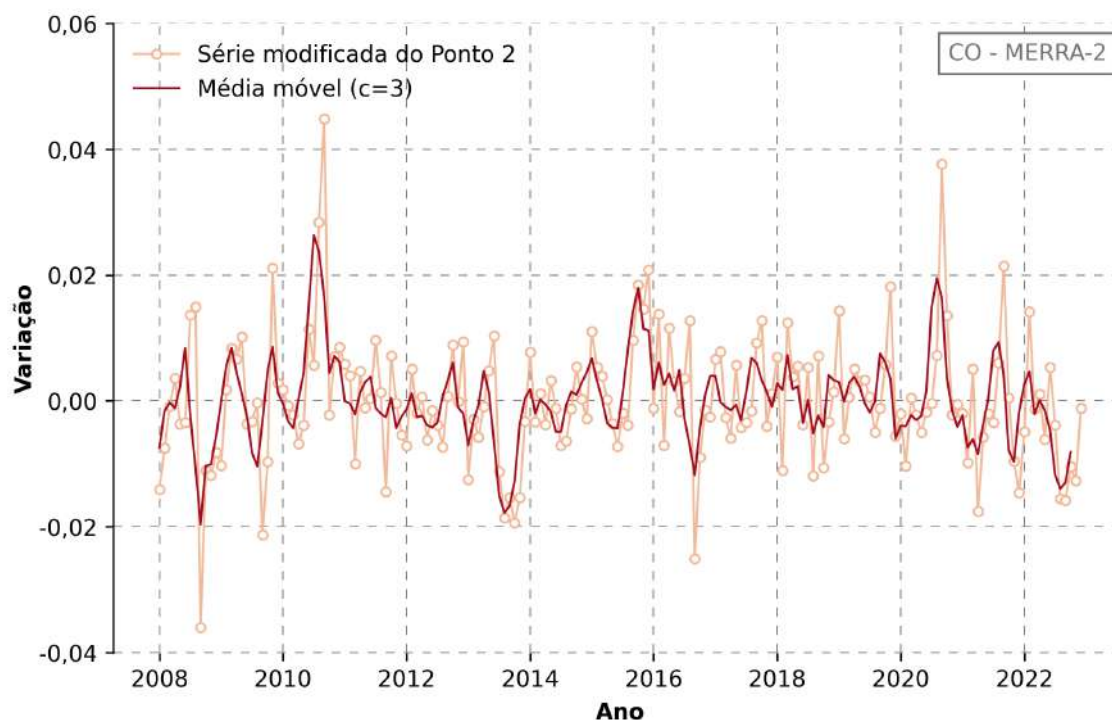
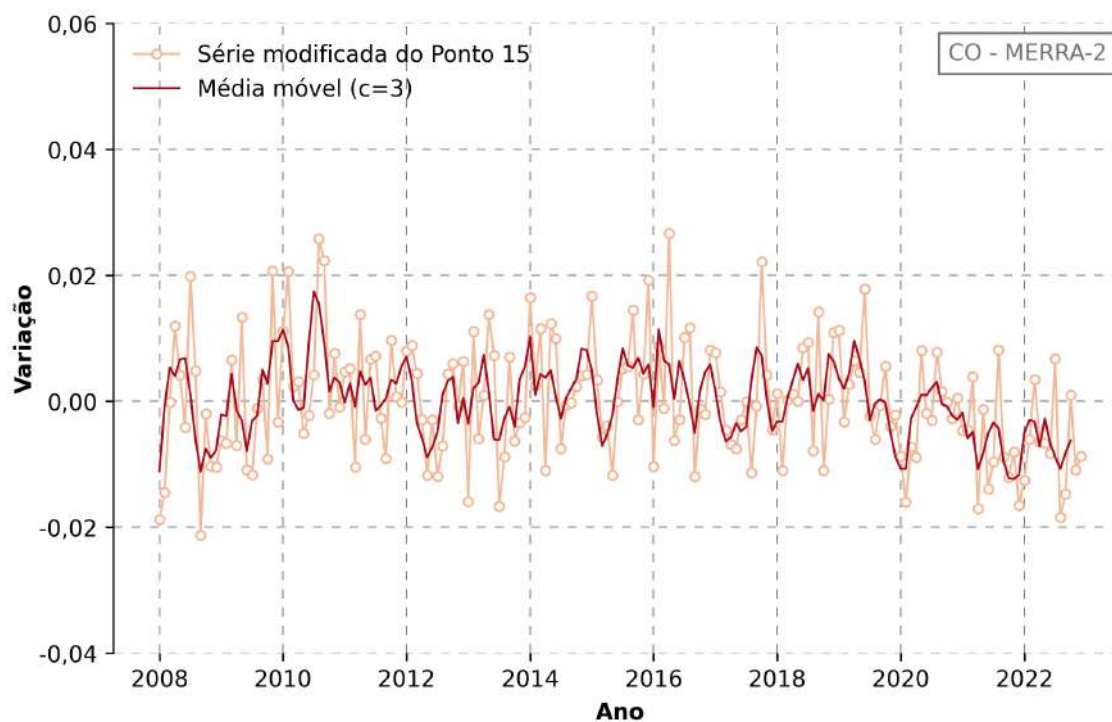
4.1.6.9 Monóxido de Carbono

Para a análise de tendência, foram utilizados os dados de MERRA-2, pois os dados de MOPPIT estavam disponíveis apenas de janeiro de 2008 até maio de 2022.

Os gráficos apresentados nas Figuras 71 e 72 mostram a série histórica modificada dos Pontos 2 e 15, respectivamente, do poluente CO , juntamente com a representação suavizada por média móvel.

No Ponto 2, a série histórica exibe dois picos, um no final de 2010 e outro no final de 2020.

No Ponto 15, a série é mais uniforme e sugere uma tendência descendente, que é confirmada pelo teste de *Mann-Kendall*.

Figura 71 – Gráfico da série histórica modificada do Ponto 2 do poluente CO , no período de 2008 a 2022**Figura 72 – Gráfico da série histórica modificada do Ponto 15 do poluente CO , no período de 2008 a 2022**

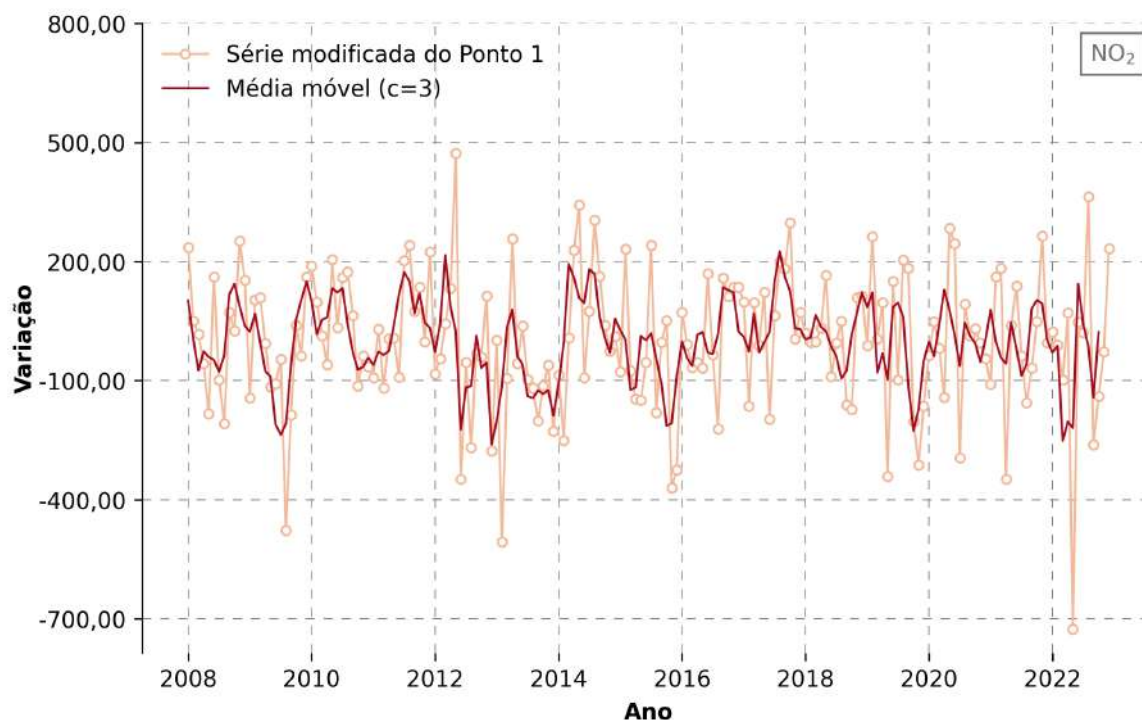
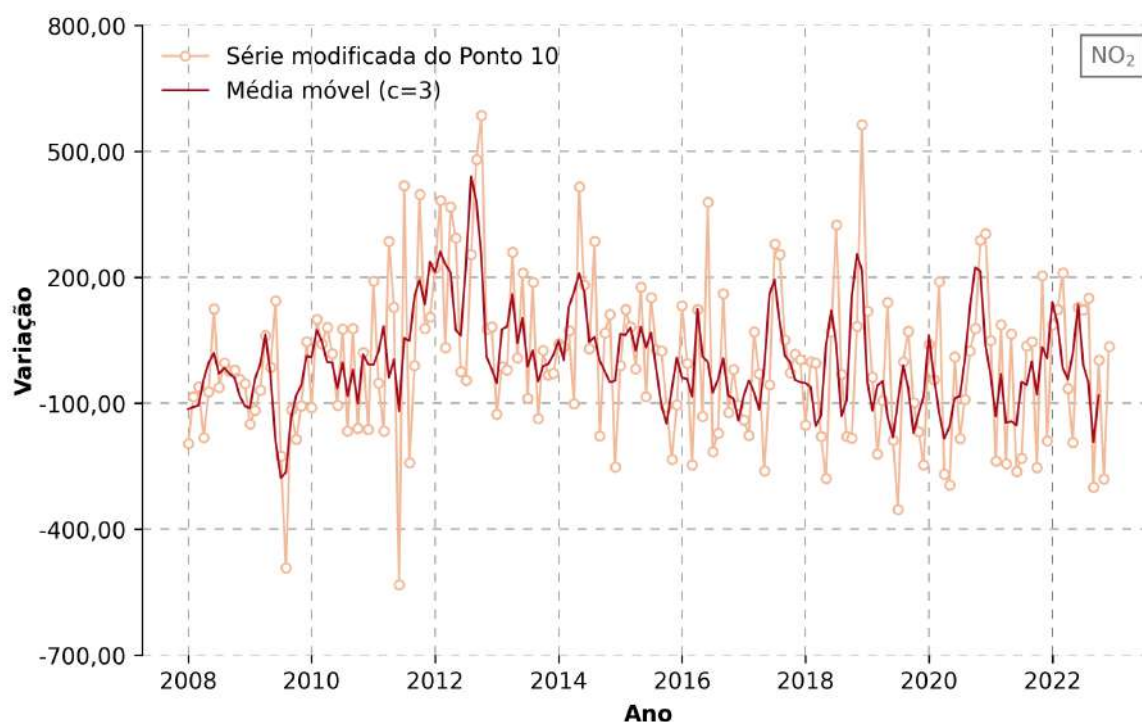
A Tabela 11 apresenta os primeiros sete pontos sem tendência e os oito pontos subsequentes com tendência descendente do poluente CO no período avaliado.

Ponto	Z	α	p-valor	τ	Tendência
1	-0,169	0,05	0,866	-0,009	Não há
2	-0,169	0,05	0,866	-0,009	Não há
3	-0,071	0,05	0,943	-0,004	Não há
4	-0,071	0,05	0,943	-0,004	Não há
5	0,516	0,05	0,606	0,026	Não há
6	0,211	0,05	0,833	0,011	Não há
7	-1,630	0,05	0,103	-0,082	Não há
8	-3,950	0,05	<0,001	-0,199	Descendente
9	-3,198	0,05	0,001	-0,161	Descendente
10	-4,189	0,05	<0,001	-0,211	Descendente
11	-4,189	0,05	<0,001	-0,211	Descendente
12	-4,189	0,05	<0,001	-0,211	Descendente
13	-3,950	0,05	<0,001	-0,199	Descendente
14	-4,151	0,05	<0,001	-0,210	Descendente
15	-3,731	0,05	<0,001	-0,188	Descendente

Tabela 11 – Análise de tendência *Mann-Kendall* do poluente Monóxido de Carbono (MERRA-2)

4.1.6.10 Dióxido de Nitrogênio

Os gráficos apresentados nas Figuras 73 e 74 mostram a série histórica modificada dos Pontos 1 e 10, respectivamente, do poluente NO_2 , juntamente com a representação suavizada por média móvel.

Figura 73 – Gráfico da série histórica modificada do Ponto 1 do poluente NO_2 , no período de 2008 a 2022**Figura 74 – Gráfico da série histórica modificada do Ponto 10 do poluente NO_2 , no período de 2008 a 2022**

A Tabela 12 apresenta cinco pontos com tendência descendente, um ponto ascendente e nove pontos sem tendência para o poluente NO_2 no período avaliado.

Ponto	Z	α	p-valor	τ	Tendência
1	-0,043	0,05	0,967	-0,002	Não há
2	-0,043	0,05	0,967	-0,002	Não há
3	-2,584	0,05	0,010	-0,131	Descendente
4	1,024	0,05	0,306	0,052	Não há
5	-2,931	0,05	0,004	-0,148	Descendente
6	0,400	0,05	0,689	0,020	Não há
7	-5,508	0,05	<0,001	-0,278	Descendente
8	-0,292	0,05	0,770	-0,015	Não há
9	-0,717	0,05	0,473	-0,036	Não há
10	-1,824	0,05	0,068	-0,092	Não há
11	-1,824	0,05	0,068	-0,092	Não há
12	-0,677	0,05	0,499	-0,034	Não há
13	-0,989	0,05	0,323	-0,050	Não há
14	0,627	0,05	0,531	0,032	Não há
15	2,881	0,05	0,004	0,145	Ascendente

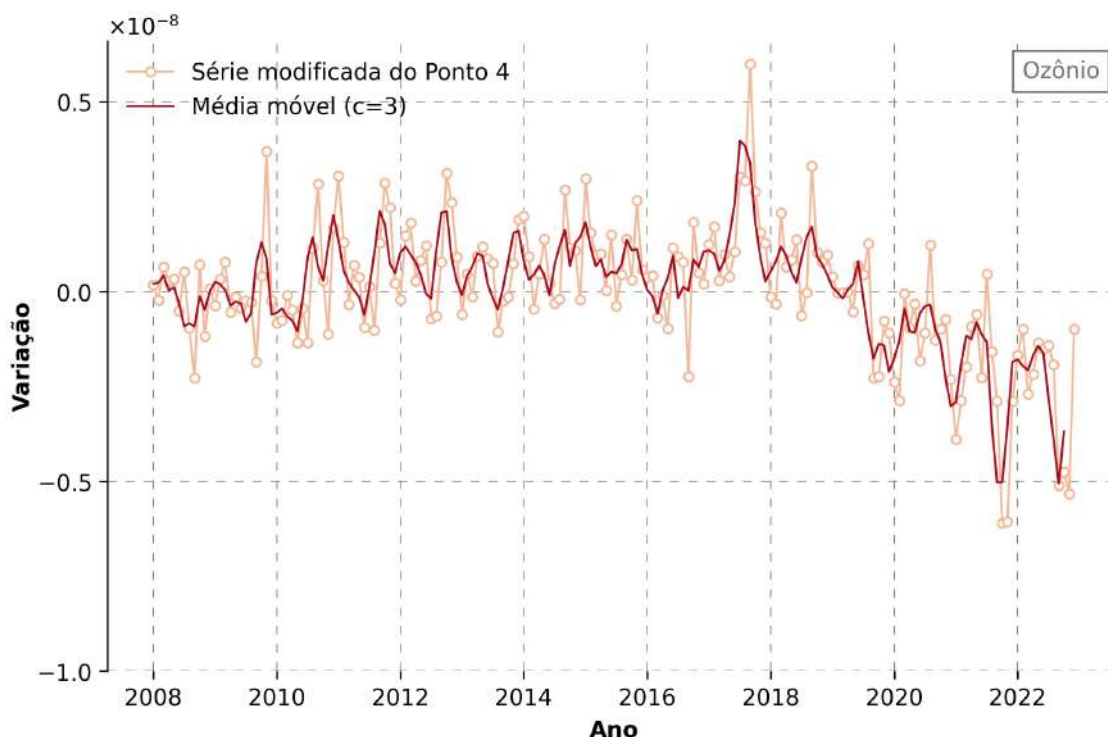
Tabela 12 – Análise de tendência *Mann-Kendall* do poluente NO_2

4.1.6.11 Ozônio

O gráfico apresentado na Figura 75 mostra a série histórica modificada do Ponto 4 do poluente O_3 , juntamente com a representação suavizada por média móvel. O gráfico demonstra visível queda do poluente a partir de 2018, que confirma tendência descendente pelo teste de *Mann-Kendall*.

Não apenas o Ponto 4, mas todos os outros pontos apresentaram comportamento semelhante.

A queda observada nas concentrações do poluente, pode ser atribuída a uma série de fatores inter-relacionados. Entre as possíveis razões para essa redução, destacam-se: políticas ambientais, iniciativas de mobilidade sustentável, mudanças na estrutura econômica (transição para indústrias menos poluentes na região), condições climáticas e meteorológicas, aumento da conscientização pública, entre outros. Esses fatores, individualmente ou em combinação, podem explicar a tendência de queda nas concentrações.

Figura 75 – Gráfico da série histórica modificada do Ponto 4 do poluente O_3 , no período de 2008 a 2022

A Tabela 13 demonstra que todos os pontos houve tendência descendente para o poluente Ozônio em nível de 875 hPa no período avaliado.

Ponto	Z	α	p-valor	τ	Tendência
1	-4,450	0,05	<0,001	-0.225	Descendente
2	-4,450	0,05	<0,001	-0.225	Descendente
3	-4,468	0,05	<0,001	-0.226	Descendente
4	-4,468	0,05	<0,001	-0.226	Descendente
5	-3.784	0,05	<0,001	-0.191	Descendente
6	-3.426	0,05	<0,001	-0.173	Descendente
7	-3.036	0,05	0,002	-0.153	Descendente
8	-4,012	0,05	<0,001	-0.203	Descendente
9	-3.812	0,05	<0,001	-0.192	Descendente
10	-4,148	0,05	<0,001	-0.209	Descendente
11	-4,148	0,05	<0,001	-0.209	Descendente
12	-4,148	0,05	<0,001	-0.209	Descendente
13	-4.012	0,05	<0,001	-0.203	Descendente
14	-4.191	0,05	<0,001	-0.212	Descendente
15	-3.824	0,05	<0,001	-0.193	Descendente

Tabela 13 – Análise de tendência Mann-Kendall do poluente Ozônio em 875 hPa (MERRA-2)

4.1.7 Escores de poluição atmosférica

Foram calculados os escores para cada poluente, considerando o coeficiente de correlação de *Kendall* (τ). Quando o τ é negativo, não é atribuído um escore, e o ponto correspondente é removido da análise para evitar influências no resultado final. Portanto, os poluentes que não obtiveram classificação são aqueles para os quais todos os pontos apresentam uma tendência descendente, como é o caso do sulfato e do ozônio. As tabelas seguintes estão em um formato padrão, exibindo as colunas de Ponto, o τ , o valor de poluição normalizado de 0 a 100, escore (calculado como o produto entre o τ e o valor de poluição), e a última coluna representando a posição, referida como “Rank”.

Quanto menor o Rank, maior o nível de poluição.

4.1.7.1 Escore do poluente *Black Carbon*

A Tabela 14 classifica o Ponto 7 em primeiro lugar quanto à concentração de *Black Carbon*, correspondendo à região de Criciúma, caracterizada por alto número de indústrias potenciais poluidoras. O segundo lugar é ocupado por São Bento do Sul (Ponto 9), que também tem indústria e sofre a influência de outras regiões, como Joinville e região industrial de Curitiba. O terceiro lugar ficou para a região de Joaçaba e Herval d'Oeste (Ponto 5).

Ponto	τ	Poluição	Escore	Rank
1	0,188	28,25	5,31	10°
2	0,188	28,25	5,31	10°
3	0,203	27,17	5,52	9°
4	0,203	27,17	5,52	9°
5	0,267	29,06	7,75	3°
6	0,241	32,03	7,71	4°
7	0,206	39,37	8,12	1°
8	0,158	38,18	6,04	7°
9	0,203	39,56	8,02	2°
10	0,149	42,02	6,24	6°
11	0,149	42,02	6,24	6°
12	0,149	42,02	6,24	6°
13	0,158	38,18	6,04	7°
14	0,158	37,79	5,97	8°
15	0,185	38,39	7,09	5°

Tabela 14 – Escore do poluente *Black Carbon*

4.1.7.2 *Escore do poluente Dust*

A Tabela 15 classifica os Pontos 1 e 2, em primeiro lugar quanto à concentração de *Dust*, correspondendo aos pontos mais extremos do oeste catarinense considerados nesta pesquisa, municípios de Maravilha e Pinhalzinho. O terceiro lugar ficou para a região de Joaçaba e Herval d'Oeste (Ponto 5), também localizados no oeste catarinense.

Ponto	τ	Poluição	Escore	Rank
1	0,231	35,33	8,15	1°
2	0,231	35,33	8,15	1°
3	0,218	32,90	7,16	3°
4	0,218	32,90	7,16	3°
5	0,189	38,83	7,34	2°
6	0,166	34,45	5,73	4°
7	0,040	26,15	1,04	10°
8	0,130	26,99	3,51	6°
9	0,149	26,60	3,97	5°
10	0,089	24,82	2,21	7°
11	0,089	24,82	2,21	7°
12	0,089	24,82	2,21	7°
13	0,130	26,99	3,51	6°
14	0,078	25,57	1,99	8°
15	0,053	24,87	1,33	9°

Tabela 15 – Escore do poluente *Dust*

4.1.7.3 *Escore do poluente Dust MP_{2,5}*

A Tabela 16, semelhante ao escore de *Dust* do item anterior, apresenta uma sutil alteração nos valores dos escores, mas mantém a mesma classificação. Os Pontos 1 e 2, em primeiro lugar quanto à concentração de *Dust*, correspondendo aos pontos mais extremos do oeste catarinense considerados nesta pesquisa, municípios de Maravilha e Pinhalzinho. O terceiro lugar ficou para a região de Joaçaba e Herval d'Oeste (Ponto 5), também localizados no oeste catarinense.

Ponto	τ	Poluição	Escore	Rank
1	0,236	33,75	7,96	1°
2	0,236	33,75	7,96	1°
3	0,225	30,11	6,78	3°
4	0,225	30,11	6,78	3°
5	0,202	35,67	7,20	2°
6	0,176	31,39	5,51	4°
7	0,044	24,74	1,09	10°
8	0,137	26,45	3,63	6°
9	0,168	25,70	4,31	5°
10	0,094	23,65	2,22	7°
11	0,094	23,65	2,22	7°
12	0,094	23,65	2,22	7°
13	0,137	26,45	3,63	6°
14	0,081	22,87	1,86	8°
15	0,058	21,95	1,27	9°

Tabela 16 – Escore do poluente *Dust* $MP_{2,5}$

4.1.7.4 Escore do poluente Carbono Orgânico

A Tabela 17 classifica o Ponto 9 em primeiro lugar quanto à concentração de *Carbono Orgânico*, correspondendo à região de São Bento do Sul. O segundo lugar é ocupado por Joaçaba e Herval d'Oeste (Ponto 5). O terceiro lugar ficou para a região de Lages (Ponto 6).

Ponto	τ	Poluição	Escore	Rank
1	0,168	28,22	4,75	10°
2	0,168	28,22	4,75	10°
3	0,180	27,37	4,93	9°
4	0,180	27,37	4,93	9°
5	0,250	29,53	7,38	2°
6	0,208	32,46	6,74	3°
7	0,168	38,75	6,50	4°
8	0,149	35,67	5,33	8°
9	0,196	39,15	7,66	1°
10	0,158	38,27	6,03	5°
11	0,158	38,27	6,03	5°
12	0,158	38,27	6,03	5°
13	0,149	35,67	5,33	8°
14	0,162	34,53	5,58	7°
15	0,163	35,75	5,84	6°

Tabela 17 – Escore do poluente Carbono Orgânico

4.1.7.5 Escore do poluente Sulfato

Não há classificação para sulfato, pois o coeficiente tau de Kendall apresentou valores negativos para todos os pontos, resultando em escores zero.

4.1.7.6 Escore do poluente Sal Marinho

A Tabela 18 classifica o Ponto 5 em primeiro lugar quanto à concentração de *Sal Marinho*, correspondendo a região de Joaçaba e Herval d'Oeste. O segundo lugar é ocupado pela região de Maravilha e Pinhalzinho, situadas no extremo oeste catarinense e muito próximas entre si (Pontos 1 e 2). A tabela apresenta apenas seis pontos, pois o tau de *kendall* foi negativo para os demais.

Ponto	τ	Poluição	Escore	Rank
1	0,120	44,14	5,30	2°
2	0,120	44,14	5,30	2°
3	0,116	42,88	4,99	3°
4	0,116	42,88	4,99	3°
5	0,161	36,52	5,87	1°
6	0,125	33,34	4,15	4°

Tabela 18 – Escore do poluente Sal Marinho

4.1.7.7 *Escore do poluente $MP_{2,5}$*

A Tabela 19 classifica o Ponto 5 em primeiro lugar quanto à concentração de $MP_{2,5}$, correspondendo a região de Joaçaba e Herval d'Oeste. O segundo lugar é ocupado pela região de Lages (Ponto 6). E o terceiro lugar é ocupado pelos Pontos 1 e 2, região de Maravilha e Pinhalzinho.

Ponto	τ	Poluição	Escore	Rank
1	0,193	31,58	6,08	3°
2	0,193	31,58	6,08	3°
3	0,195	29,85	5,83	4°
4	0,195	29,85	5,83	4°
5	0,234	29,62	6,93	1°
6	0,186	35,05	6,51	2°
7	0,058	43,91	2,57	10°
8	0,102	41,05	4,17	6°
9	0,096	44,80	4,31	5°
10	0,056	46,58	2,60	8°
11	0,056	46,58	2,60	8°
12	0,056	46,58	2,60	8°
13	0,102	41,05	4,17	6°
14	0,060	43,42	2,60	9°
15	0,060	44,33	2,64	7°

Tabela 19 – Escore do poluente $MP_{2,5}$

4.1.7.8 *Escore do poluente Dióxido de Enxofre*

A Tabela 20 classifica o Ponto 7 em primeiro lugar quanto à concentração de SO_2 , correspondendo a região de Criciúma. O segundo lugar é ocupado pela região de Lages (Ponto 6). E o terceiro lugar é ocupado pelo Ponto 5, região de Joaçaba e Herval d'Oeste. A tabela apresenta apenas dez pontos, pois o tau de *kendall* foi negativo para os demais.

Ponto	τ	Poluição	Escore	Rank
1	0,083	43,22	3,57	5°
2	0,083	43,22	3,57	5°
3	0,125	36,88	4,62	4°
4	0,125	36,88	4,62	4°
5	0,151	33,26	5,02	3°
6	0,134	42,09	5,64	2°
7	0,127	49,11	6,25	1°
8	0,007	46,63	0,32	7°
13	0,007	46,63	0,32	7°
15	0,051	49,59	2,53	6°

Tabela 20 – Escore do poluente SO_2

4.1.7.9 Escore do poluente Monóxido de Carbono

A Tabela 21 classifica o Ponto 5 em primeiro lugar quanto à concentração de CO , correspondendo a região de Joaçaba e Herval d'Oeste e o segundo lugar é ocupado pela região de Lages (Ponto 6). A tabela apresenta apenas dois pontos, pois o tau de *kendall* foi negativo para os demais.

Ponto	τ	Poluição	Escore	Rank
5	0,026	46,25	1,07	1°
6	0,011	40,92	0,39	2°

Tabela 21 – Escore do poluente CO

4.1.7.10 Escore do poluente Dióxido de Nitrogênio

A Tabela 22 classifica o Ponto 15 em primeiro lugar quanto à concentração de NO_2 , correspondendo ao município de São José, localizado na Grande Florianópolis. O segundo lugar é ocupado pela região de Chapecó (Ponto 4) e o terceiro lugar é ocupado por Itajaí (Ponto 14). A tabela apresenta apenas dois pontos, pois o tau de *kendall* foi negativo para os demais.

Ponto	τ	Poluição	Escore	Rank
4	0,052	50,35	2,60	2°
6	0,020	50,01	4,00	4°
14	0,032	43,49	1,38	3°
15	0,145	52,68	7,66	1°

Tabela 22 – Escore do poluente NO_2

4.1.7.11 *Escore do poluente Ozônio*

Não há classificação para O_3 , pois o coeficiente tau de *Kendall* apresentou valores negativos para todos os pontos, resultando em escores zero.

4.1.7.12 *Escore final*

A Tabela 23 demonstra o escore final, que é a soma de todos o escores anteriores. Onde Joaçaba e Herval d'Oeste ocuparam o primeiro lugar. O segundo lugar foi ocupado por Lages e o terceiro lugar por Chapecó.

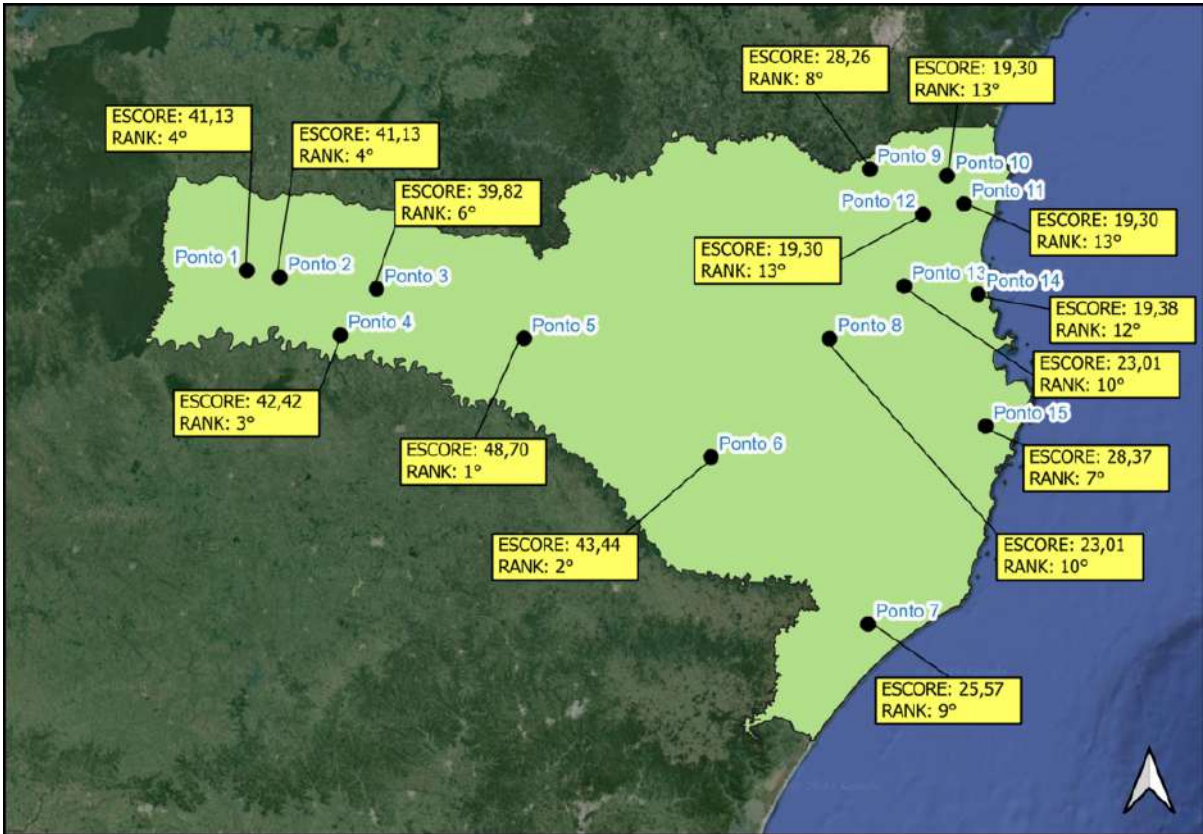
Ponto	Poluição Média	Escore	Rank
1	39,91	41,13	4°
2	39,91	41,13	4°
3	38,70	39,82	5°
4	38,45	42,42	3°
5	38,41	48,70	1°
6	37,53	43,44	2°
7	41,24	25,57	8°
8	39,55	23,01	9°
9	39,79	28,26	7°
10	41,42	19,30	11°
11	41,42	19,30	11°
12	42,76	19,30	11°
13	40,31	23,01	9°
14	40,83	19,38	10°
15	41,83	28,37	6°

Tabela 23 – Escore final dos poluentes atmosféricos

O escore determina as áreas prioritárias para a implantação de estações de monitoramento da qualidade do ar. Este índice foi calculado utilizando a força do tau de *Kendall*, empregado para projetar o aumento da concentração do poluente ao longo do tempo, permitindo uma identificação mais precisa das áreas com maior potencial de degradação da qualidade do ar.

O mapa da Figura 76 indica a localização dos pontos e seus respectivos escores finais.

Figura 76 – Escores finais



5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Aspectos gerais

O estudo se concentrou em um tema de elevada relevância contemporânea que é a Poluição Atmosférica, conforme as Diretrizes da Organização Mundial da Saúde (OMS), com ênfase no Estado de Santa Catarina.

Através de uma análise dos registros de licenciamento ambiental, foi constatada a existência de 51 atividades potencialmente poluidoras (categorizadas como “Nível Grande” em relação à qualidade do ar) e um total de 1.398 empresas envolvidas nessas atividades em todo o território catarinense. Isso revelou a presença de quinze locais críticos em termos de poluição do ar.

Apesar da ausência de dados de estações terrestres de monitoramento da qualidade do ar, o estudo utilizou dados de reanálises e sensores de satélite para analisar o fenômeno da poluição atmosférica em Santa Catarina no período de 2008 a 2022.

A pesquisa avaliou as tendências utilizando um teste estatístico não paramétrico: o Teste de *Mann-kendall*, e atribuiu escores aos poluentes empregando uma ferramenta de normalização de dados em conjunto com o coeficiente tau de *kendall*.

Resposta ao problema da pesquisa

Em resposta à definição do problema da pesquisa sobre a relação entre a distribuição geográfica de empresas identificadas como potenciais fontes de poluição e os níveis de poluição atmosférica observados no Estado de Santa Catarina, além de identificar os pontos mais críticos em termos de poluição do ar, tem-se:

- i. Para o dióxido de nitrogênio, observou-se uma forte relação entre as concentrações desse poluente e a presença de indústrias na região de Sangão (próximo a Criciúma), indicando que a atividade industrial local contribui significativamente para os níveis desse poluente.
- ii. Em relação aos particulados (*MPs*), não foi possível estabelecer uma relação direta entre a distribuição geográfica das empresas e os níveis de poluição observados. Isso ocorre porque a maioria dos particulados são de origem externa, influenciados por fatores como transporte de longa distância e outras fontes externas à área de estudo. Essas partículas são transportadas das regiões Norte e Centro-Oeste do Brasil para o Sul e Sudeste. Com um tempo de vida maior na atmosfera em comparação aos gases poluentes e, por estarem em estado sólido, essas partículas

apresentam maior persistência durante o transporte atmosférico. Esse processo se intensifica nos meses de agosto, setembro e outubro, período marcado pelo aumento das queimadas no Norte e Centro-Oeste do país, levando poluentes atmosféricos em direção ao Sul e Sudeste.

- iii. Para o dióxido de enxofre, embora se saiba que a fonte principal é industrial, a concentração do poluente é observada em locais diferentes da origem das emissões. Isso sugere que os padrões de dispersão atmosférica e as condições meteorológicas influenciam significativamente a distribuição espacial desse poluente, resultando em áreas de alta concentração distantes das fontes industriais.

A análise das tendências dos poluentes

A análise das tendências dos poluentes revelou variações significativas nas concentrações de diferentes poluentes ao longo dos pontos de avaliação. Observou-se que dois poluentes, o *Black Carbon* e o carbono orgânico, apresentaram uma tendência ascendente consistente em todos os pontos. Isso indica um aumento generalizado na concentração desses poluentes, possivelmente refletindo mudanças nas fontes de emissão ou condições ambientais que favorecem seu acúmulo.

Em contraste, dois outros poluentes, o SO_4 e o O_3 , mostraram uma tendência descendente em todos os pontos avaliados. Essa queda pode estar associada a melhorias nas práticas de controle de emissões ou a mudanças nas condições atmosféricas que facilitam a dispersão desses poluentes.

Para os demais poluentes, a análise mostrou uma variação mista. Na região dos pontos 1 ao 6 (oeste e centro oeste de Santa Catarina), a maioria dos poluentes apresentou uma tendência ascendente, sugerindo um aumento local das fontes de poluição ou condições que favorecem a concentração desses poluentes. Em particular, o SO_2 mostrou uma tendência ascendente do ponto 3 ao 7, enquanto nos demais pontos não houve variação significativa, permanecendo estável.

O comportamento do monóxido de carbono (CO) foi peculiar, apresentando uma tendência descendente do ponto 8 ao 15, especialmente na região costeira. Isso pode indicar uma eficácia regional nas políticas de controle de emissões ou condições atmosféricas específicas que promovem a dispersão do CO nessa área. O NO_2 , por sua vez, teve uma tendência descendente nos pontos 3, 5 e 7, enquanto mostrou um aumento apenas no ponto 15 (Região de São José).

A análise do $MP_{2,5}$ incluiu cinco poluentes, já detalhados no corpo do trabalho. Já a análise do MP_{10} foi limitada ao *Dust* (poeira). Os pontos que apresentaram o maior número de poluentes com tendência ascendente foram os Pontos 3, 4, 5 e 6, com sete

dos onze poluentes avaliados mostrando aumento. Em contraste, os Pontos 14 e 15 mostraram o maior número de poluentes com tendência descendente, com quatro dos onze poluentes apresentando redução. Essas variações indicam a necessidade de políticas específicas de controle de poluição adaptadas a cada região avaliada.

Climatologia sazonal dos poluentes

Com relação à sazonalidade dos poluentes, a análise dos dados no período de 2008 a 2022 levou às seguintes conclusões:

- i. A concentração de diversos poluentes, incluindo *Black Carbon* (BC), *Dust*, *Dust MP_{2,5}*, carbono orgânico, *SO₄*, *MP_{2,5}* e monóxido de carbono (*CO*), é maior na primavera. Esta tendência pode estar relacionada a fatores sazonais específicos, como mudanças nas condições meteorológicas, aumento de atividades agrícolas e industriais, além de variações nos padrões de transporte atmosférico que favorecem o acúmulo desses poluentes durante essa estação.
- ii. Durante o inverno, observou-se que os níveis de dióxido de enxofre (*SO₂*) e dióxido de nitrogênio (*NO₂*) são mais elevados. Isso pode ser atribuído ao aumento das emissões de fontes estacionárias, como sistemas de aquecimento e combustão de combustíveis fósseis, que são mais utilizados durante os meses mais frios, além das condições atmosféricas que dificultam a dispersão desses poluentes.
- iii. No verão, a concentração de sal marinho é mais alta. Esta elevação está associada à maior temperatura que favorece a evaporação da água do mar. Em contraste, os níveis de *Black Carbon*, *Dust*, *Dust MP_{2,5}*, *SO₄* e *NO₂* são mais baixos no verão, o que pode ser explicado pela maior dispersão atmosférica, pela precipitação mais elevada que acaba limpando a atmosfera e pela redução de algumas fontes de emissão típicas de outras estações.
- iv. No outono, as concentrações de carbono orgânico, *MP_{2,5}*, *CO* e *O₃* são mais baixas. As condições meteorológicas desta estação, como temperaturas mais amenas e maior estabilidade atmosférica, podem favorecer a dispersão dos poluentes e reduzir a formação de ozônio troposférico.
- v. Por fim, a concentração de sal marinho é menor durante o inverno, o que pode ser devido à menor intensidade dos ventos marítimos e menor agitação das ondas durante essa estação, além da temperatura mais baixa. Essas observações sazonais são fundamentais para compreender as

dinâmicas ambientais e para o desenvolvimento de estratégias eficazes de controle e mitigação da poluição atmosférica ao longo do ano.

Climatologia mensal dos poluentes

Pela análise da climatologia mensal dos poluentes no período de 2008 a 2022, o trabalho chegou às seguintes constatações:

- i. Em janeiro, observam-se as menores concentrações de *Black Carbon* e NO_2 . Essa redução pode ser atribuída a condições meteorológicas que favorecem a dispersão dos poluentes, além de possíveis reduções nas atividades emissoras típicas desse mês.
- ii. No mês de maio, as menores concentrações registradas foram de SO_4 , $MP_{2,5}$, CO e O_3 . As condições climáticas do final do outono, provavelmente contribuem para essa diminuição nos níveis de poluentes atmosféricos.
- iii. Junho apresenta menores concentrações de carbono orgânico e sal marinho, enquanto a concentração de SO_2 é a mais alta. As condições atmosféricas mais estáveis e temperaturas mais baixas podem explicar a baixa presença de partículas de sal marinho, enquanto o aumento de SO_2 pode estar ligado a fatores como a combustão de combustíveis.
- iv. Em julho, há um pico na concentração de NO_2 . Esse aumento pode estar relacionado à intensificação de atividades industriais e agrícolas que emitem NO_2 durante o inverno.
- v. Setembro destaca-se de todos os meses por apresentar as maiores concentrações de oito poluentes: *Black Carbon*, *Dust*, *Dust* $MP_{2,5}$, carbono orgânico, SO_4 , $MP_{2,5}$, CO e O_3 . Esse fenômeno pode ser resultado de uma combinação de atividades antropogênicas aumentadas e condições meteorológicas que favorecem o acúmulo desses poluentes na atmosfera.
- vi. Em novembro, observam-se as menores concentrações de *Dust*, *Dust* $MP_{2,5}$ e SO_2 . A redução nas atividades emissoras e as condições meteorológicas que promovem a dispersão dos poluentes contribuem para essas menores concentrações.
- vii. Dezembro é caracterizado pela menor concentração de *Black Carbon* novamente e as maiores concentrações de sal marinho. As condições climáticas de fim de ano, incluindo ventos mais intensos, podem dispersar

o *Black Carbon* e aumentar a quantidade de partículas de sal marinho transportadas para a atmosfera.

Essas observações mensais são essenciais para compreender as variações dos poluentes e para desenvolver estratégias de controle e mitigação da poluição do ar adaptadas a cada período do ano.

Oceanic Niño Index - ONI

Foi observado um aumento significativo nos níveis de poluentes atmosféricos durante os períodos de 2010/2011 e 2021/2022, provavelmente influenciado pelo fenômeno climático *La Niña*. Este fenômeno é conhecido por causar estiagem (seca) na região Sul do Brasil, o que pode intensificar a concentração de poluentes no ar devido à redução das chuvas que normalmente auxiliam na dispersão e remoção de partículas da atmosfera. Durante esses períodos, a estação com os maiores valores de poluição atmosférica abrangeu uma área mais extensa na ordem das estações JJA (Inverno), seguida por MAM (Outono) e DJF (Verão).

Escore de poluição atmosférica

A avaliação dos escores dos poluentes foi realizada em duas etapas. A primeira etapa consistiu na atribuição de um escore individual para cada poluente em cada ponto de amostragem. A segunda etapa envolveu o cálculo de um escore final, que é a soma dos escores de todos os poluentes.

Com base no escore final, o Ponto 5 (região de Joaçaba e Herval d'Oeste) foi identificado como o ponto com maior índice de poluição atmosférica. Em seguida, o Ponto 6 (região de Lages) ocupa a segunda posição, e o Ponto 4 (região de Chapecó) a terceira posição em termos de poluição do ar.

A pesquisa indica os pontos pela ordem crescente de escores, sendo o primeiro o pior, para a instalação de estações de monitoramento da qualidade do ar em Santa Catarina.

A instalação de estações de monitoramento nesses locais permitirá um acompanhamento mais preciso e contínuo da qualidade do ar na região.

6 FUTUROS TRABALHOS

A pesquisa sobre poluição e qualidade do ar é abrangente e contínua. Portanto, recomenda-se que futuros trabalhos abordem aspectos que esta pesquisa não pôde investigar ou que estão fora do escopo do estudo.

A composição da matéria particulada depende da fonte, das transformações químicas na atmosfera, dos efeitos do transporte em longas distâncias e dos processos de remoção. As medições tendem a ser de concentrações médias, o que pode ocultar eventos extremos ou episódios importantes. Tendências diurnas e sazonais podem ser aparentes, mas ainda há muito trabalho de pesquisa a ser realizado antes que se alcance uma compreensão completa.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Sugere-se para trabalhos futuros abordar os seguintes pontos.

- i. Aprofundar a análise das fontes potenciais responsáveis pelo incremento das concentrações de dióxido de enxofre nas coordenadas geográficas latitude $-26,5^\circ$ e longitude $-50,0^\circ$, situadas no território do município de Itaiópolis.
- ii. Realizar um estudo sobre as condições mais desfavoráveis a poluição atmosférica em Santa Catarina e emitir alertas, principalmente no mês de setembro.
- iii. Aprofundar nos poluentes NO_2 e O_3 na unidade da OMS, uma vez que o presente trabalho alcançou apenas as unidades $\mu g m^{-2}$ e $kg kg^{-1}$, respectivamente.
- iv. Aprofundar os poluentes e suas fontes no Estado de Santa Catarina.
- v. Estudar a influência latitudinal que pode ser um fator climático significativo nas análises. A topografia também desempenha um papel relevante nas variações de temperatura observadas. A interação entre latitude e topografia é complexa e merece atenção.
- vi. Será que o campo do vento na serra é bem resolvido pela reanálise ERA5, principalmente no inverno? Nos meses de inverno diminui o contraste oceano-continente, e prejudica a solução da simulação?
- vii. A diminuição da Camada Limite Planetária (CLP) na região topográfica pode ter relação com a magnitude mais fraca do vento? E isso é realístico na reanálise ou não?
- viii. Analisar o papel da poeira na chuva (precipitação), como núcleos de condensação.

- ix. O Sal Marinho pode adentrar o continente?
- x. Validar os dados de $MP_{2,5}$ do MERRA-2 calculados, comparando-os com dados de uma estação de monitoramento da qualidade do ar em algum município do Estado de Santa Catarina. Além disso, é relevante realizar uma comparação entre os dados de $MP_{2,5}$ de resolução mais baixa e os do MERRA-2, a fim de avaliar a consistência e a precisão das medições.
- xi. Analisar a razão pela qual as concentrações de SO_4 apresentaram tendência descendente em todas as medições, enquanto as concentrações de SO_2 exibiram comportamentos variados, com algumas mostrando tendência ascendente e outras sem tendência definida.
- xii. Investigar as causas da redução nas concentrações de O_3 a partir de 2018.

7 PRODUTO TÉCNICO TECNOLÓGICO - PTT

O Produto Técnico Tecnológico (PTT) é um resultado prático e aplicável derivado de projetos de pesquisa e desenvolvimento, com o objetivo de promover a inovação e o avanço tecnológico em diversas áreas. No contexto do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), o PTT representa a materialização do conhecimento adquirido durante o mestrado profissional, podendo manifestar-se na forma de tecnologias, métodos, protocolos, publicações, *software*, modelos ou protótipos. Essa produção não apenas contribui para a formação acadêmica do discente, mas também atende a demandas sociais, econômicas e ambientais, visando a solução de problemas concretos.

Neste Mestrado Profissional em Clima e Ambiente, o PTT desenvolvido abrange:

- i. **Mapeamento da concentração de empresas potencialmente poluidoras no estado de Santa Catarina:** Este mapeamento é uma ferramenta fundamental para identificar e visualizar as áreas mais impactadas pela poluição de atividades potencialmente poluidoras, permitindo uma abordagem direcionada para ações de mitigação e fiscalização ambiental. Os dados coletados são essenciais para a formulação de políticas públicas que visam melhorar a qualidade do ar e proteger a saúde da população.
- ii. **Priorização dos locais para a instalação de estações de monitoramento da Qualidade do Ar em Santa Catarina:** Compreendeu o cálculo do escore final e *ranking* onde foram identificadas áreas mais poluídas, permitindo determinar quais locais são prioritários para a instalação de uma estação de monitoramento da qualidade do ar. O Escore final significa o índice de poluição considerando a expectativa da série histórica da poluição se tornar mais ascendente, ou seja, considera o cenário da poluição piorar no futuro.
- iii. **Criação de um canal no YouTube:** O canal disponível em <https://www.youtube.com/@eng-ana-marcon-hanada>, foi desenvolvido para demonstrar os procedimentos adotados na elaboração da dissertação, com a utilização de ferramentas como: *QGIS*, *GrADS*, *CDO*, planilhas eletrônicas, *Python* e *Linux for Windows*, entre outros, visando o compartilhamento com a comunidade acadêmica e todas as pessoas que se interessarem. O canal possui 142 inscritos, 28 vídeos, 8.438 visualizações e 58 comentários (consulta realizada em 15/09/2024).

REFERÊNCIAS

- Ayoade, J. O. (1998). ***Introdução à Climatologia para os Trópicos*** (5 ed.). Bertrand Brasil. 332 p. 55, 63
- Balogun, A. L., Tella, A., Baloo, L., & Adebisi, N. (2021). **A review of the inter-correlation of climate change, air pollution and urban sustainability using novel machine learning algorithms and spatial information science.** *Urban Climate*, 40. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100989> 23
- Barry, R. G. & Chorley, R. J. (2010). ***Atmosphere Weather and Climate*** (9 ed.). Routledge. 41, 46, 54, 56, 57
- Boubel, R. W., Fox, D. L., Turner, D. B., & Stern, A. C. (1994). ***Fundamentals of Air Pollution*** (3 ed.). Academic Press. 29, 30, 31, 32, 34, 35, 36, 37, 41, 42, 43, 47, 53, 64, 67, 68
- BRASIL (1997). **Resolução CONAMA n° 237**. Dispõe sobre os procedimentos e critérios utilizados no licenciamento ambiental e no exercício da competência, bem como as atividades e empreendimentos sujeitos ao licenciamento ambiental. *Diário Oficial da União n° 247, de 22 de dezembro de 1997, Seção 1*. 23
- BRASIL (2018). **Resolução CONAMA n° 491**, Dispõe sobre padrões de qualidade do ar. *Diário Oficial da União n° 223 de 21/11/2018*. 39, 76
- Brasil. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Qualidade Ambiental (2020). ***Guia técnico para o monitoramento e avaliação da qualidade do ar***. 136 p. 77
- Brasseur, G. P. & Jacob, D. J. (2017). ***Modeling of Atmospheric Chemistry*** (1 ed.). Cambridge University Press. 48, 49, 54, 55, 57, 58, 59
- Brimblecombe, P. (2002). ***The Effects of Air Pollution on the Built Environment*** (1 ed.), volume 2. Air Pollution Reviews. 29, 30, 31, 50, 51, 54, 67, 69, 70
- Camara, V. F., Lisboa, H. M., Hoinaski, L., & David, P. C. (2015). Levantamento das emissões atmosféricas da indústria da cerâmica vermelha no sul do estado de santa catarina, brasil. *Cerâmica*, 61(358), 213–218. <https://doi.org/10.1590/0366-69132015613581872> 65
- Carpenter, L. J., Simpson, I. J., & Cooper, O. R. (2023). ***Ground-Based Reactive Gas Observations Within the Global Atmosphere Watch (GAW) Network***, 97–117. Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-2760-9_8 44
- Carslaw, K. S. (2022). ***Aerosols and Climate*** (1 ed.). Elsevier. 27

- Carvalho, V. S. B., Freitas, E. D., Martins, L. D., Martins, J. A., Mazzoli, C. R., & de Fátima Andrade, M. (2014). **Air quality status and trends over the Metropolitan Area of São Paulo, Brazil as a result of emission control policies.** *Environment Science & Policy*, 47, 68–79 61
- CAS Common Chemistry (2024). **CAS Common Chemistry.** <https://commonchemistry.cas.org>. CAS, a division of the American Chemical Society 45
- CETESB (2022). **Sistema QUALAR.** <https://cetesb.sp.gov.br/ar/qualar/>. Acesso em <10/06/2022> 26
- Chimurkar, N. D., Vinoy, V., & Pandey, S. K. (2020). **Evaluation of PM_{2.5} Surface Concentrations Simulated by NASA's MERRA Version 2 Aerosol Reanalysis over India and its Relation to the Air Quality Index.** *Aerosol and Air Quality Research*, 1329–1339. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2019.12.0615>. Acesso em <16/02/2024> 112
- Claudino, C., Herdies, D. L., de Quadro, M. F. L., & de Sales Filho, P. C. (2021). **Validação da reanálise do MERRA-2 com dados observados: Estudo de caso de Itajaí - Santa Catarina.** *RMA*, 1, 106–111. <<https://forecast.weather.gov/glossary.php>> 72
- Derwent, R. G. (1995). **Volatile Organic Compounds in the Atmosphere**, (Chapter Sources, Distributions, and Fates of VOCs in the Atmosphere, 140). The Royal Society of Chemistry, (1 ed.). 23, 44, 57
- DETRAN-SC (2024). **Veículos em circulação em Santa Catarina.** <https://www.detransc.gov.br/estatisticas-veiculos-transparencia/> 25
- Drummond, J. R. & Worden, H. M. (2023). **Measurements of Pollution in the Troposphere (MOPITT) Observations from EOS/Terra**, 295–306. Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-2760-9_61 73
- ECMWF (2024). **ECMWF Reanalysis v5** 75
- Finlayson-Pitts, B. J. & James N. Pitts, J. (2000). **Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere**. Academic Press. 47, 48, 50
- Fuller, R., Landrigan, P. J., Balakrishnan, K., Bathan, G., Bose-O'Reilly, S., Brauer, M., Caravanos, J., Chiles, T., Cohen, A., Corra, L., Cropper, M., Ferraro, G., Hanna, J., Hanrahan, D., Hu, H., Hunter, D., Janata, G., Kupka, R., Lanphear, B., Lichtveld, M., Martin, K., Mustapha, A., Sanchez-Triana, E., Sandilya, K., Schaeffli, L., Shaw, J., Seddon, J., Suk, W., Téllez-Rojo, M. M., & Yan, C. (2022). **Pollution and health: a progress update.** *Lancet Planet Health*. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(22\)00090-0](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(22)00090-0) 23

- Garratt, J. R. (1992). **The atmospheric boundary layer**. *Earth-Science Reviews* 60
- Gelaro, R., McCarty, W., Suárez, M. J., Todling, R., Molod, A., Takacs, L., Randles, C. A., Darmenov, A., Bosilovich, M. G., Reichle, R., Wargan, K., Coy, L., Cullather, R., Draper, C., Akella, S., Buchard, V., Conaty, A., da Silva, A. M., Gu, W., Kim, G.-K., Koster, R., Lucchesi, R., Merkova, D., Nielsen, J. E., Partyka, G., Pawson, S., Putman, W., Rienecker, M., Schubert, S. D., Sienkiewicz, M., & Zhao, B. (2017). **The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2)**. *J. Clim.* <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.1> 72, 73
- Gheleri, L. C. (2003). **Amostragem passiva de benzeno presente na atmosfera**. *Repositório Unicamp*. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Engenharia Química. 44
- Ginoux, P., Prospero, J. M., Gill, T. E., Hsu, N. C., & Zhao, M. (2012). Global-scale attribution of anthropogenic and natural dust sources and their emission rates based on modis deep blue aerosol products. *Reviews of Geophysics*, 50(3). <https://doi.org/10.1029/2012rg000388> 99
- Global Modeling and Assimilation Office (GMAO), Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC) (2015). **MERRA-2 tavgM 2d chm Nx: 2d, Monthly mean, Time-Averaged, Single-Level, Assimilation, Carbon Monoxide and Ozone Diagnostics V5.12.4**. Technical report, GES DISC. <https://doi.org/10.5067/WMT31RKEK8ITo>. Acesso em <10/10/2022> 73
- Gorney, C. (2020). **Decades ago, this pollution disaster exposed the perils of dirty air** 33, 34
- Guerra, C. (2023). **Regionalização do Clima em Santa Catarina**. *Repositório IFSC*. Dissertação de Mestrado - Instituto Federal de Santa Catarina. 62
- Herdies, D. L., Kousky, V. E., & Ebisuzaki, W. (2007). **The Impact of High-Resolution SALLJEX Data on Global NCEP Analyses**. *Journal of Climate*. <https://doi.org/10.1175/2007JCLI1375.1> 65
- Hester, R. E. & Harrison, R. M. (1995). **Volatile Organic Compounds in the Atmosphere** (1 ed.). Royal Society of Chemistry. 61
- IBGE (2022). **Censo Brasileiro de 2022**. *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística*. 25, 71
- IEMA (2022). **Plataforma da Qualidade do Ar**. Technical report, IEMA. <<http://energiaeambiente.org.br/qualidadedoar>>. Acesso em <18/06/2022> 26

- IMA (2022). **Instituto do Meio Ambiente de Santa Catarina**. Technical report, IMA. <https://ima.sc.gov.br/index.php/o-instituto/o-que-e>. Acesso em <14/07/2022> 24
- INPE (2024). **Monitoramento dos Focos Ativos por Estado**. https://terrabrasilis.dpi.inpe.br/queimadas/situacao-atual/estatisticas/estatisticas_estados/ 26, 104
- Jacob, D. J. (1999). **Introduction to Atmospheric Chemistry** (1 ed.). Princeton University Press. 52
- Jacobson, M. Z. (2002). **Atmospheric Pollution** (1 ed.). Cambridge University Press. 30, 31, 57, 64
- Jacobson, M. Z. (2012). **Air Pollution and Global Warming** (2 ed.). Cambridge University Press. 45, 62
- Khomenko, S., Cirach, M., Pereira-Barboza, E., Mueller, N., Barrera-Gómez, J., Rojas-Rueda, D., de Hoogh, K., Hoek, G., & Nieuwenhuijsen, M. (2021). **Health impacts of the new WHO air quality guidelines in European cities**. *The Lancet Planetary Health*, 5(11), e764. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(21\)00288-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S2542-5196(21)00288-6) 39
- Krotkov, N. A., Lamsal, L. N., Marchenko, S. V., Celarier, E. A., J. Bucsela, E., Swartz, W. H., Joiner, J., & the OMI core team (2019). **OMI/Aura NO2 Cloud-Screened Total and Tropospheric Column L3 Global Gridded 0.25 degree x 0.25 degree V3, NASA Goddard Space Flight Center, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC)**. Technical report, NASA Goddard Space Flight Center, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC). <https://doi.org/10.5067/Aura/O-MI/DATA3007>. Acesso em <16/09/2023> 73
- Lazaridis, M. (2011). **First Principles of Meteorology and Air Pollution**, volume 19. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-0162-5> 23, 27, 55, 58, 59, 60, 61, 67, 68, 69
- Lazarus, R. J. (2004). **The making of environmental law**. The University of Chicago Press 36, 37
- Lenzi, E. & Favero, L. O. B. (2011). **Química da Atmosfera** (1 ed.). LTC. 27, 46, 48, 53
- Levelt, P., van den Oord, G., Dobber, M., Malkki, A., Visser, H., de Vries, J., Stammes, P., Lundell, J., & Saari, H. (2006). **The ozone monitoring instrument**. *IEEE*

- Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(5), 1093–1101. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.872333> 73
- Lu, X., Liu, Y., Zhang, Q., Chen, Y., & Yao, J. (2022). **Online detection and source tracing of VOCs in the air**. *Optics and Laser Technology*, 149. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107826> 23
- Mann, H. B. (1945). **Nonparametric Tests Against Trend**. *Econometrica*, 13, 245–259. <https://doi.org/10.2307/1907187> 81
- Marengo, J. A., Douglas, M. W., & Dias, P. L. S. (2002). **The South American low-level jet east of the Andes during the 1999 LBA-TRMM and LBA-WET AMC campaign**. *Journal of Geophysical Research*, 107. <https://doi.org/10.1029/2001JD001188> 64
- Mayer, H. (1999). **Air pollution in cities**. *Atmospheric Environment*, 33, 4029–4037. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00144-2](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00144-2) 23
- Mendonça, F. & Danni-Oliveira, I. M. (2007). **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil** (1 ed.). Oficinas de Textos. 50, 64
- Nagtzaam, G. & Brady, U. (2023). *Global Biodiversity: Trends and Regulation*, 583–604. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-01949-4_39 38
- NASA (2024). **MOPITT- Measurement of Pollution in the Troposphere**. *NASA Terra*. <<https://terra.nasa.gov/about/terra-instruments/mopitt>> 73
- National Weather Service (2024). **NOAA's National Weather Service Glossary**. *National Weather Service*. <<https://forecast.weather.gov/glossary.php>>. Acesso em <21/05/2024> 67, 69, 78
- NOAA (2022a). **Cold & Warm Episodes by Season - Oceanic Niño Index (ONI)**. Technical report, NOAA. <https://www.arl.noaa.gov/hysplit/>. Acesso em 02/02/2024 95
- NOAA (2022b). **HYSPLIT models simulate the dispersion and trajectory of substances transported and dispersed through our atmosphere, over local to global scales**. Technical report, NOAA. <https://www.arl.noaa.gov/hysplit/>. Acesso em <14/07/2022> 78
- Oliveira, R. (2022). **Sistema de Detecção de Frentes Frias associadas a eventos meteorológicos de médio e alto impacto no Centro Sul da América do Sul**. *Repositório IFSC*. Dissertação de Mestrado - Instituto Federal de Santa Catarina. 62

- Payus, C. M., Syazni, M. S. N., & Sentian, J. (2022). **Extended air pollution index (API) as tool of sustainable indicator in the air quality assessment: El-Nino events with climate change driven.** *Heliyon*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09157> 77
- Penalba, O. C. & Rivera, J. A. (2016). Precipitation response to el niño/la niña events in southern south america – emphasis in regional drought occurrences. *Advances in Geosciences*, 42, 1–14. <https://doi.org/10.5194/adgeo-42-1-2016> 95
- Pitiriciu, M. & Tansel, B. (2021). **Volatile organic contaminants (VOCs) emitted from sewer networks during wastewater collection and transport.** *Journal of Environmental Management*, 285. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112136> 23
- Polivka, B. J. (2018). **The Great London Smog of 1952.** *American Journal of Nursing*, 57–61. <https://doi.org/10.1097/01.NAJ.0000532078.72372.c3> 35
- Prospero, J. M., Ginoux, P., Torres, O., Nicholson, S. E., & Gill, T. E. (2002). Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the nimbus 7 total ozone mapping spectrometer (toms) absorbing aerosol product. *Reviews of Geophysics*, 40(1). <https://doi.org/10.1029/2000rg000095> 99
- Pérez Velasco, R. & Jarosińska, D. (2022). **Update of the WHO global air quality guidelines: Systematic reviews – An introduction.** *Environment International*, 170, 107556. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107556> 39
- Reboita, M. S., Ambrizzi, T., Silva, B. A., Pinheiro, R. F., & da Rocha, R. P. (2019). **The South Atlantic Subtropical Anticyclone: Present and Future Climate.** *Frontiers in Earth Science*, 7, 6. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00008> 62, 63
- Reboita, M. S., Krusche, N., Ambrizzi, T., & da Rocha, R. P. (2012). **Entendendo o Tempo e o Clima na América do Sul.** *TERRAE DIDATICA*, 8, 34–50 64
- Ribeiro, F. N. D., Salinas, D. T. P., Soares, J., de Oliveira, A. P., de Miranda, R. M., & Souza, L. A. T. (2016). **The Evolution of Temporal and Spatial Patterns of Carbon Monoxide Concentrations in the Metropolitan Area of Sao Paulo, Brazil.** *Hindawi Publishing Corporation*, 2016, 1–13. <https://doi.org/10.1155/2016/8570581> 62
- Rozante, J. R., Moreira, D. S., de Goncalves, L. G. G., & Vila, D. A. (2010). **Combining TRMM and Surface Observations of Precipitation: Technique and Validation over South America.** *Weather and Forecasting*, 25(3), 885–894. <https://doi.org/10.1175/2010waf2222325.1> 75

- Rozante, J. R., Ramirez, E., & de Almeida Fernandes, A. (2021). **A newly developed South American Mapping of Temperature with estimated lapse rate corrections.** *International Journal of Climatology*, 42(4), 2135–2152. <https://doi.org/10.1002/joc.7356> 74
- Rozante, J. R., Rozante, V., Alvim, D. S., Manzi, A. O., Chiquetto, J. B., D'Amelio, M. T. S., & Moreira, D. S. (2017). **Variations of Carbon Monoxide Concentrations in the Megacity of São Paulo from 2000 to 2015 in Different Time Scales.** *MDPI atmosphere* 48, 61
- SANTA CATARINA (2017). **Resolução CONSEMA n° 98**, Aprova, nos termos do inciso xiii, do art. 12, da lei n° 14.675, de 13 de abril de 2009, a listagem das atividades sujeitas ao licenciamento ambiental, define os estudos ambientais necessários e estabelece outras providências. *Diário Oficial do Estado/SC n° 21.686 de 12/01/2022 (atualizada até a Resolução CONSEMA n° 185/2021.* 23
- Schnelle, K. B. (2003). **Atmospheric Diffusion Modeling**, 679–705. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-12-227410-5/00036-3> 57, 70
- Seinfeld, J. H. & Pandis, S. N. (1998). **Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change** (1 ed.). Issues in Environmental Science and Technology. 43, 44, 48, 49, 52, 53, 55
- Seinfeld, J. H. & Pandis, S. N. (2006). **Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change** (2 ed.). J. Wiley. 41, 42, 47, 64, 65, 66, 67, 68, 69
- Simoni, W. F. D., Sant'Anna, A., Alencar, A., Pinheiro, B., Araújo, C., Vormittag, E., Wicher, H., Borges, K., Faria, M., de Fátima Andrade, M., Porto, P., Artaxo, P., Rocha, R., & Esturba, T. (2021). **O Estado da Qualidade do Ar no Brasil.** <https://www.wribrasil.org.br/publicacoes/o-estado-da-qualidade-do-ar-no-brasil> 27
- Stull, R. (1988). **An Introduction to Boundary Layer Meteorology.** Atmospheric and Oceanographic Sciences Library. Springer Netherlands. <https://books.google.com.br/books?id=eRRz9RNvN0kC> 60
- Tan, X., Han, L., Zhang, X., Zhou, W., Li, W., & Qian, Y. (2021). **A review of current air quality indexes and improvements under the multi-contaminant air pollution exposure.** *Journal of Environmental Management*, 279. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111681> 23
- Theodore, L. (2008). **Air Pollution Control Equipment Calculations** (1 ed.). Wiley. 29, 35, 41, 42, 43, 49, 51

- Trenberth, K. E. & Stepaniak, D. P. (2001). Indices of el niño evolution. *Journal of Climate*, 14(8), 1697–1701. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014<1697:liaoeno>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<1697:liaoeno>2.0.co;2) 94
- UNEP (1972). **Report of the United Nations Conference on the Human Environment - Stockholm, 5-16 June 1972**. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/30829> 38
- Vara-Vela, A. L., Herdies, D. L., Alvim, D. S., Éder Paulo Vendrasco, Figueroa, S. N., Pendharkar, J., & Fernandez, J. P. R. (2021). **A New Predictive Framework for Amazon Forest Fire Smoke Dispersion over South America**. *Bulletin of the American Meteorological Society*. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-21-0018.2> 68
- Walter, J. M. (2023). *Introduction to Environmental Regulation, 1913–1924*. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-01949-4_117 36
- Wellcome (2024). **Wellcome Trust**. *Wellcome Trust*. <<https://wellcome.org/who-we-are>>. Acesso em <31/03/2024> 38
- WHO (2021). **WHO Global Air Quality Guidelines - Update 2021**. *WHO Regional Office for Europe (2021)*. 23, 38, 40, 45, 46, 48, 49, 50, 53, 54, 72, 96
- WHO (2023). **History of WHO**. <https://www.who.int/about/history> 37, 38
- WHO et al. (2021). **WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide**. World Health Organization. 39
- Yin, Z., Zhang, L., Roradeh, H., Baaghdeh, M., Yang, Z., Hu, K., Liu, L., Zhang, Y., Mayvaneh, F., & Zhang, Y. (2022). **Reduction in daily ambient PM2.5 pollution and potential life gain by attaining WHO air quality guidelines in Tehran**. *Environmental Research*, 209, 112787. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.112787> 39

APÊNDICES

APÊNDICE A – OBTENÇÃO DE DADOS DE PARTICULADOS E DIÓXIDO DE ENXOFRE

Fonte: NASA, GES DISC – MERRA-2.

Site: <http://disc.gsfc.nasa.gov>.

Data de coleta: 21/02/2023.

Grupo de produto: Proporção de mistura de aerossol.

Conjunto de Dados: tavg1_2d_aer_Nx (M2T1NXAER): Aerosol Diagnostics.

Nome abreviado: M2T1NXAER.

Nome completo: MERRA-2 tavg1_2d_aer_Nx: 2d,1-Hourly, Time-averaged, Single-Level, Assimilation, Aerosol Diagnostics V5.12.4.

DOI: 10.5067/KLICLTZ8EM9D.

Versão: 5.12.4. **Formato:** NetCDF.

Cobertura espacial: -180,0°; -90,0°; 180,0°; 90,0°.

Cobertura temporal: De 01/01/1980 até 01/01/2024.

Período utilizado: De 01/01/2008 até 31/12/2022 (15 anos).

Resolução dos dados: **Temporal:** 1 hora ; **Espacial:** 0,5 x 0,625°.

Referência:

Global Modeling and Assimilation Office (GMAO) (2015), MERRA-2 tavg1_2d_aer_Nx: 2d,1-Hourly, Time-averaged, Single-Level, Assimilation, Aerosol Diagnostics V5.12.4, Greenbelt, MD, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), Acesso em 21/02/2023, DOI: 10.5067/KLICLTZ8EM9D

Quadro resumo de variáveis:

Nome da variável	Dimensão	Descrição	Unidade
BCSMASS	tyx	Concentração de massa em superfície de <i>Black Carbon</i>	$kg\ m^{-3}$
DUSMASS	tyx	Concentração de massa em superfície de Poeira	$kg\ m^{-3}$
DUSMASS25	tyx	Concentração de massa em superfície de Poeira $MP_{2,5}$	$kg\ m^{-3}$
OCSMASS	tyx	Concentração de massa em superfície de Carbono Orgânico	$kg\ m^{-3}$
SO2SMASS	tyx	Concentração de massa em superfície de Dióxido de Enxofre	$kg\ m^{-3}$

Conversão de unidades:

Unidade utilizada: $\mu g\ m^{-3}$. Para converter foi utilizado o multiplicador 1×10^9 .

APÊNDICE B – OBTENÇÃO DE DADOS DE OZÔNIO

Fonte: National Aeronautics and Space Administration (NASA), Goddard Earth Science Data Information and Services Center (GES DISC) – MERRA-2.

Site: <http://disc.gsfc.nasa.gov>.

Data de coleta: 03/11/2023.

Grupo de produto: Produto de análise direta.

Conjunto de Dados: instM_3d_ana_Np (M2IMNPANA).

Nome abreviado: M2IMNPANA.

Nome completo: MERRA-2 instM_3d_ana_Np: 3d, Monthly mean, Instantaneous, Pressure-Level, Analysis, Analyzed Meteorological Fields V5.12.4.

DOI: 10.5067/V92O8XZ30XBI.

Versão: 5.12.4.

Formato: NetCDF.

Cobertura espacial: -180,0°; -90,0°; 180,0°; 90,0°.

Cobertura temporal: De 01/01/1980 até 31/12/2023.

Período utilizado: De 01/01/2008 até 31/12/2022 (15 anos).

Resolução dos dados: **Temporal:** 1 mês ; **Espacial:** 0,5 x 0,625°; **Vertical:** 42 níveis de pressão.

Nível de pressão utilizado: Z 6, 875 hPa.

Referência:

Global Modeling and Assimilation Office (GMAO) (2015), MERRA-2 instM_3d_ana_Np: 3d, Monthly mean, Instantaneous, Pressure-Level, Analysis, Analyzed Meteorological Fields V5.12.4, Greenbelt, MD, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), Accessed: 03/11/2023, 10.5067/V92O8XZ30XBI.

Quadro resumo de variáveis:

Nome da variável	Dimensão	Descrição	Unidade
O3	tzyx	ozone mass mixing ratio (proporção de mistura em massa de ozônio)	kg kg ⁻¹

APÊNDICE C – OBTENÇÃO DE DADOS DE DIÓXIDO DE NITROGÊNIO

Fonte: Earth Observing System (EOS), Aura.

Site: <https://aura.gsfc.nasa.gov>.

Data de coleta: 16/09/2023.

Grupo de produto: -

Conjunto de Dados: NO₂ Tropospheric Column (30% Cloud Screened) (OMNO2d v003).

Nome abreviado: OMNO2d v003.

Nome completo: OMI/Aura NO₂ Cloud-Screened Total and Tropospheric Column L3 Global .

DOI: 10.5067/Aura/OMI/DATA3007.

Versão: 003.

Formato: HDF-EOS5.

Cobertura espacial: -180,0°; -90,0°; 180,0°; 90,0°.

Cobertura temporal: De 01/10/2004 até 06/02/2024.

Período utilizado: De 01/01/2008 até 31/12/2022 (15 anos).

Resolução dos dados: **Temporal:** 1 dia ; **Espacial:** 0,25 x 0,25°.

Referência:

Nickolay A. Krotkov, Lok N. Lamsal, Sergey V. Marchenko, Edward A. Celarier, Eric J. Bucsela, William H. Swartz, Joanna Joiner and the OMI core team (2019), OMI/Aura NO₂ Cloud-Screened Total and Tropospheric Column L3 Global Gridded 0.25 degree x 0.25 degree V3, NASA Goddard Space Flight Center, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), Accessed: 16/09/2023, 10.5067/Aura/OMI/DATA3007.

Quadro resumo de variáveis:

Nome da variável	Dimensão	Descrição	Unidade
columnamountno2	tyx	Estimativas da densidade de NO ₂ da coluna vertical da troposfera	mol cm ⁻²

Conversão de unidades:

Unidade utilizada: $\mu\text{g m}^{-2}$. Para converter ver Apêndice W.

APÊNDICE D – OBTENÇÃO DE DADOS DE MONÓXIDO DE CARBONO

D.1 MERRA-2

Fonte: National Aeronautics and Space Administration Goddard Earth Science Data Information and Services Center (GES DISC) – MERRA-2.

Site: <http://disc.gsfc.nasa.gov>.

Data de coleta: 31/08/2023.

Grupo de produto: Forçamento químico.

Conjunto de Dados: tavgM_2d_chm_Nx (M2TMNXCHM).

Nome abreviado: M2TMNXCHM.

Nome completo: MERRA-2 tavgM_2d_chm_Nx: 2d, Monthly mean, Time-Averaged, Single-Level, Assimilation, Carbon Monoxide and Ozone Diagnostics V5.12.4.

DOI: 10.5067/WMT31RKEXK8I.

Versão: 5.12.4.

Formato: NetCDF.

Cobertura espacial: -180,0°; -90,0°; 180,0°; 90,0°.

Cobertura temporal: De 01/10/2004 até 31/12/2023.

Período utilizado: De 01/01/2008 até 31/12/2022 (15 anos).

Resolução dos dados: **Temporal:** 1 mês ; **Espacial:** 0,5 x 0,625°.

Referência:

Global Modeling and Assimilation Office (GMAO) (2015), MERRA-2 tavgM_2d_chm_Nx: 2d, Monthly mean, Time-Averaged, Single-Level, Assimilation, Carbon Monoxide and Ozone Diagnostics V5.12.4, Greenbelt, MD, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), Accessed: 31/08/2023, 10.5067/WMT31RKEXK8I.

Quadro resumo de variáveis:

Nome da variável	Dimensão	Descrição	Unidade
COSC	tyx	Concentração de CO em superfície	ppbv

Conversão de unidades:

Unidade utilizada: ppm (partes por milhão). Para converter foi utilizado o multiplicador $\times 10^{-4}$.

D.2 MOPPIT

Fonte: NASA/LARC/SD/ASDC.

Site: <https://asdc.larc.nasa.gov/project/MOPITT/MOP03J8>.

Data de coleta: 16/09/2023.

Grupo de produto: -

Conjunto de Dados: MOP03JM v008.

Nome abreviado: MOP03JM v008.

Nome completo: Multispectral CO Surface Mixing Ratio (Daytime/Descending).

DOI: 10.5067/TERRA/MOPITT/MOP03J_L3.008.

Versão: 008.

Formato: HDF-EOS5.

Cobertura espacial: -180,0°; -90,0°; 180,0°; 90,0°.

Cobertura temporal: De 03/03/2000 até o presente.

Período utilizado: De 01/01/2008 até 31/12/2022 (15 anos).

Resolução dos dados: **Temporal:** 1 mês ; **Espacial:** 1,0°.

Referência:

NASA/LARC/SD/ASDC. (2000). MOPITT CO gridded daily means (Near and Thermal Infrared Radiances) V008 [Data set]. NASA Langley Atmospheric Science Data Center DAAC. Retrieved from https://doi.org/10.5067/TERRA/MOPITT/MOP03J_L3.008.

Quadro resumo de variáveis:

Nome da variável	Dimensão	Descrição	Unidade
retrievedcosurf	txy	Retrieved CO Surface Mixing Ratio Day	ppbv

Conversão de unidades:

Unidade utilizada: ppm (partes por milhão). Para converter utilizar o multiplicador $\times 10^{-4}$.

APÊNDICE E – OBTENÇÃO DE DADOS DE PRECIPITAÇÃO

Fonte: Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos/ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE)

Site: <http://ftp.cptec.inpe.br/modelos/tempo/MERGE/GPM>

Data de coleta: 11/02/2024.

Grupo de produto: Produto de precipitação MERGE

Conjunto de Dados: -

Nome abreviado: -

Nome completo: -

DOI: <https://doi.org/10.1175/2010WAF2222325.1>.

Versão: -

Formato: NetCDF.

Cobertura espacial: -81.95°; -34.65°; 56.15°; 12.85°.

Cobertura temporal: De 2001 até o presente.

Período utilizado: De 01/01/2008 até 31/12/2022 (15 anos).

Resolução dos dados: **Temporal:** 30 minutos ; **Espacial:** 0,1°.

Referência:

Rozante, J. R.; Moreira, D. S. ; Gonçalves., L. G. G. ; Vila, Daniel A.. Combining TRMM and Surface Observations of Precipitation: Technique and Validation Over South America. Weather and Forecasting, v. 25, p. 885-894, 2010. DOI: 10.1175/2010WAF2222325.1.

Quadro resumo de variáveis:

Nome da variável	Dimensão	Descrição	Unidade
pm	tyx	precipitação média diária	mm

APÊNDICE F – OBTENÇÃO DE DADOS DE VENTO A 10 METROS E ALTURA DA CAMADA LIMITE

Fonte: Reanálise ERA5, ECMWF.

Site: <https://cds.climate.copernicus.eu>.

Data de coleta: 12/02/2024.

Grupo de produto: Reanálise

Conjunto de Dados: -

Nome abreviado: -

Nome completo: -

DOI: 10.24381/cds.adbb2d47.

Versão: 5.

Formato: NetCDF.

Cobertura espacial: -180,0°; -90,0°; 180,0°; 90,0°.

Cobertura temporal: De 1940 até o presente.

Período utilizado: De 01/01/2008 até 31/12/2022 (15 anos).

Resolução dos dados: **Temporal:** 1 hora ; **Espacial:** 0.25 ° x 0.25 °.

Referência:

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., Thépaut, J-N. (2023): ERA5 monthly averaged data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), DOI: 10.24381/cds.f17050d7.

Quadro resumo de variáveis:

Nome da variável	Dimensão	Descrição	Unidade
u10	tyx	Componente U do vento a 10 metros	$m s^{-1}$
v10	tyx	Componente V do vento a 10 metros	$m s^{-1}$
blh	tyx	Altura da Camada Limite	m

Conversão de unidades:

- Para a temperatura foi convertido de Kelvin para Celsius (°C), subtraindo 273,15 dos valores.

APÊNDICE G – MAPAS PARA DUST (POEIRA) PARA O PERÍODO 2008 - 2022, ATRAVÉS DA REANÁLISE MERRA-2

Figura 77 – Valores médios sazonais para *Dust* (Poeira) para o período 2008 - 2022, na América do Sul, através da Reanálise MERRA-2. Unidade: $\mu g m^{-3}$.

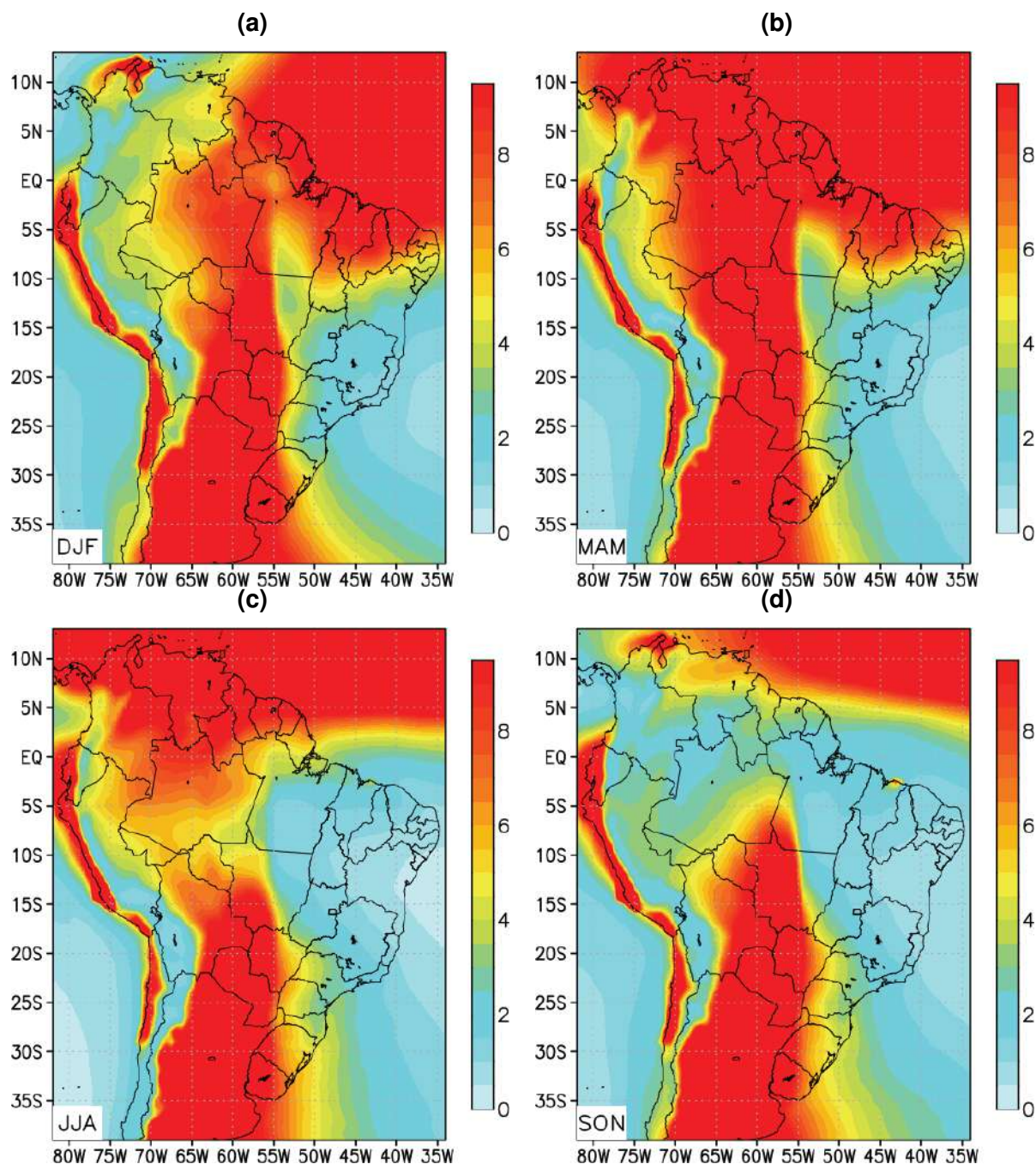
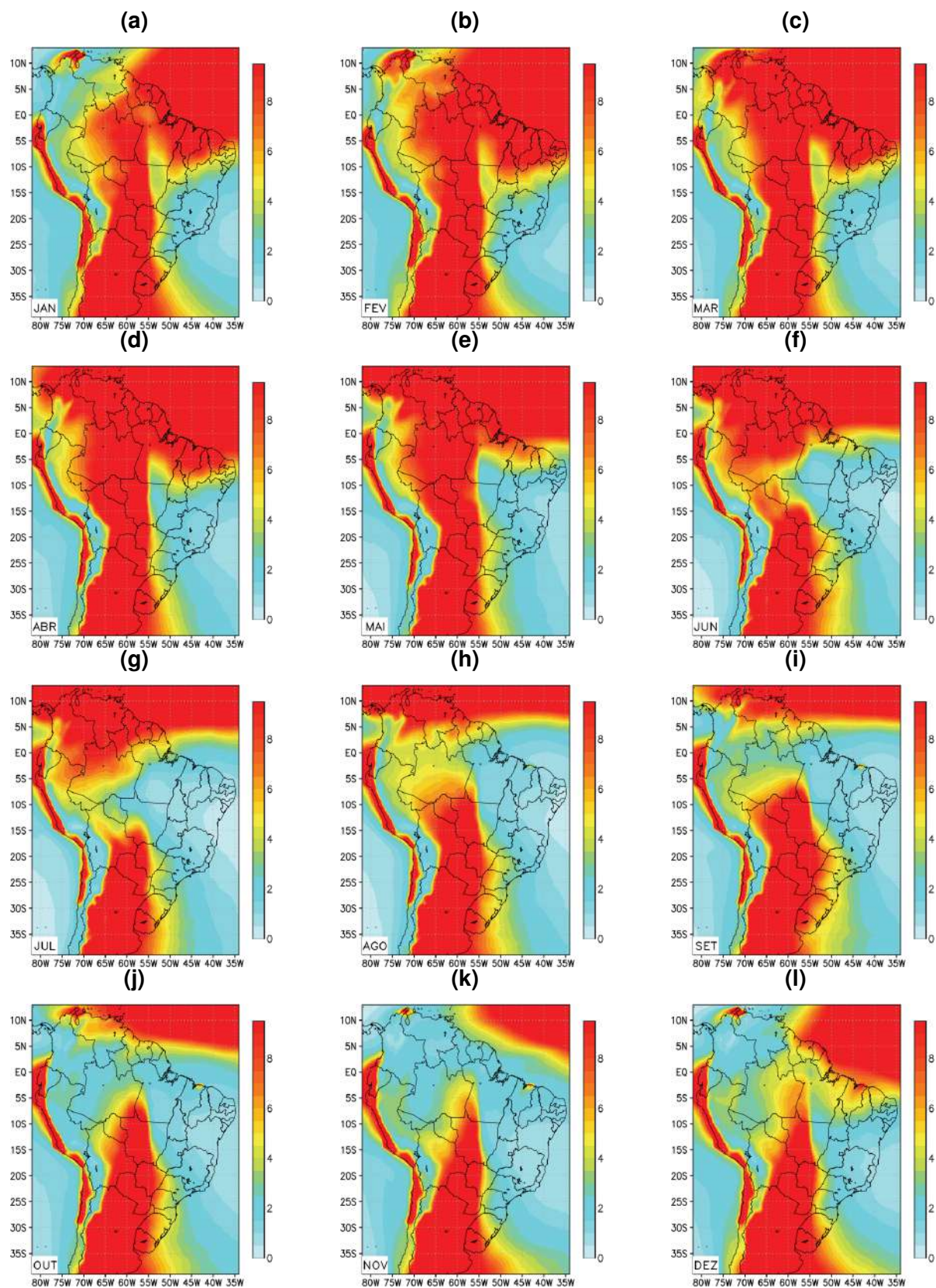
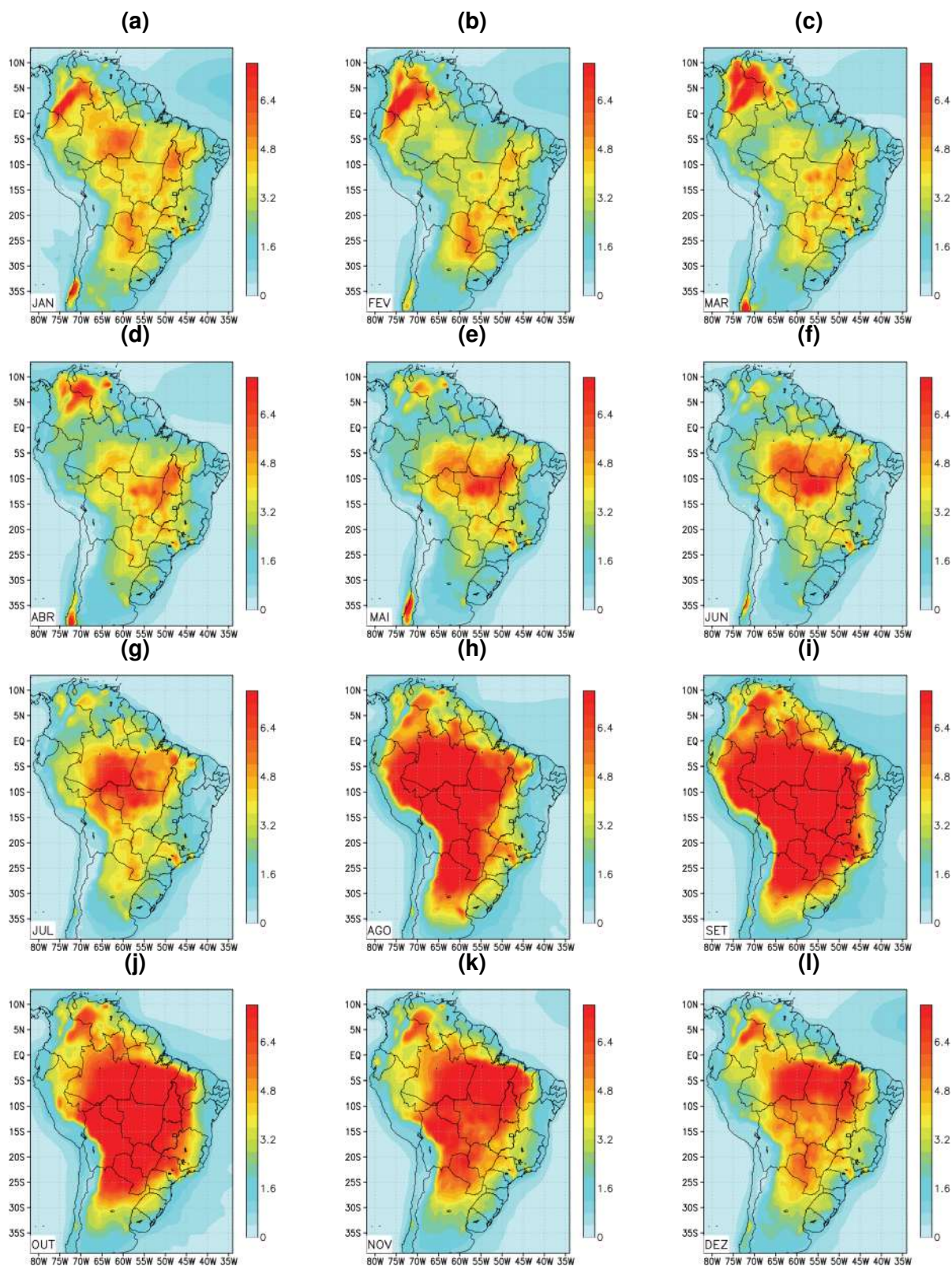


Figura 78 – Valores médios mensais para *Dust* no período de 2008 a 2022, na América do Sul, através da Reanálise MERRA-2. Unidade: $\mu\text{g m}^{-3}$



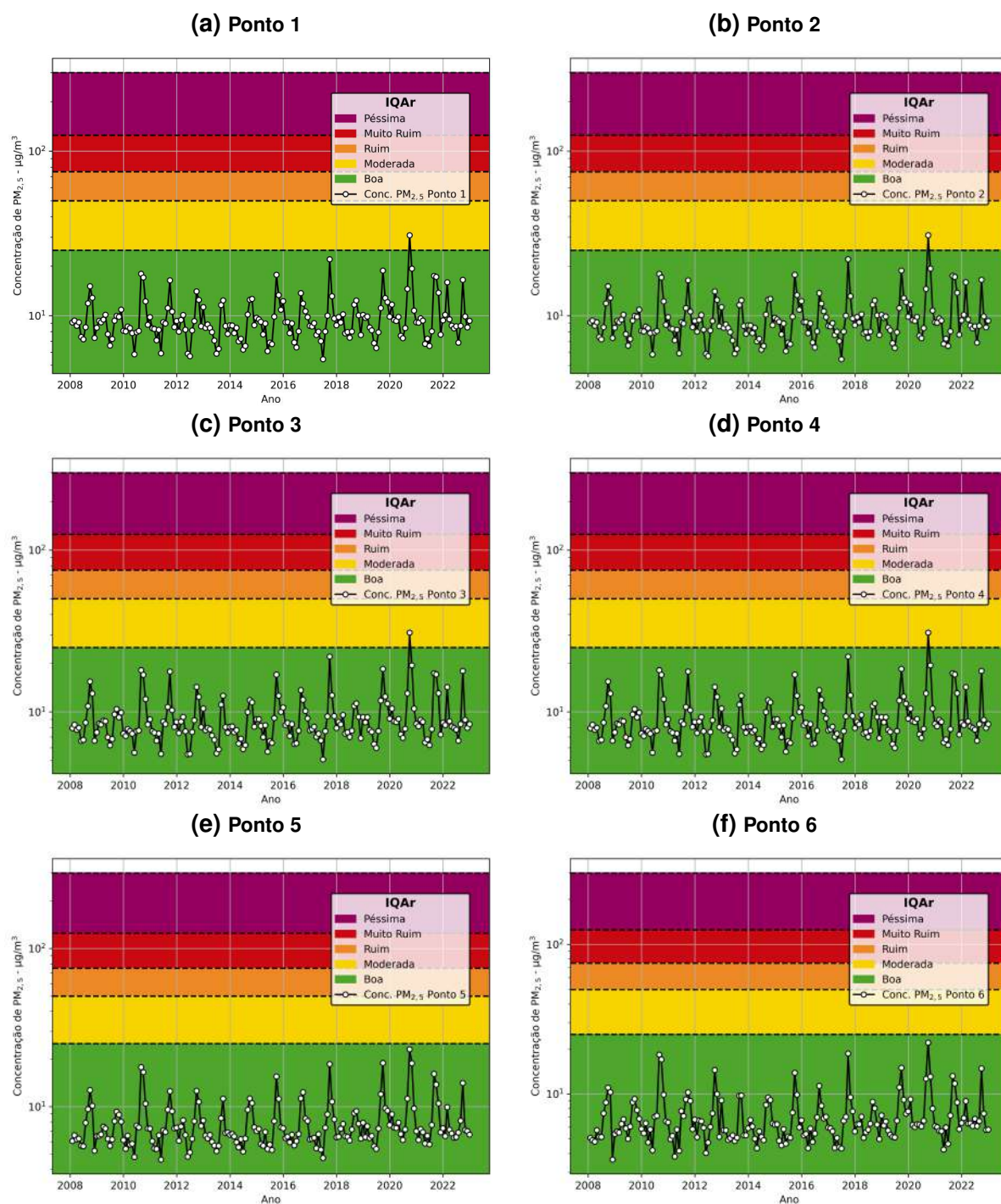
APÊNDICE H – MAPAS MENSAIS PARA CARBONO ORGÂNICO NO PERÍODO DE 2008 A 2022, ATRAVÉS DA REANÁLISE MERRA-2

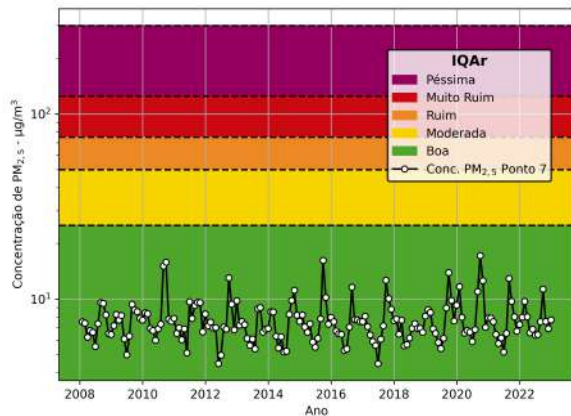
Figura 79 – Valores médios mensais para Carbono Orgânico no período de 2008 a 2022, na América do Sul, através da Reanálise MERRA-2. Unidade: $\mu g m^{-3}$



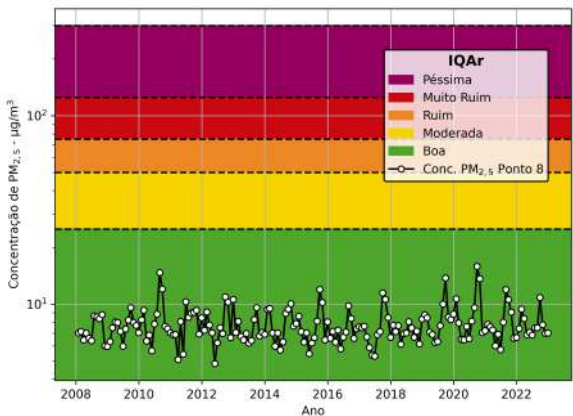
APÊNDICE I – GRÁFICOS DE CONCENTRAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO FINO E IQAR

Figura 80 – Gráficos de concentração do Poluente PM_{2,5} e a Relação com o Índice de Qualidade do Ar

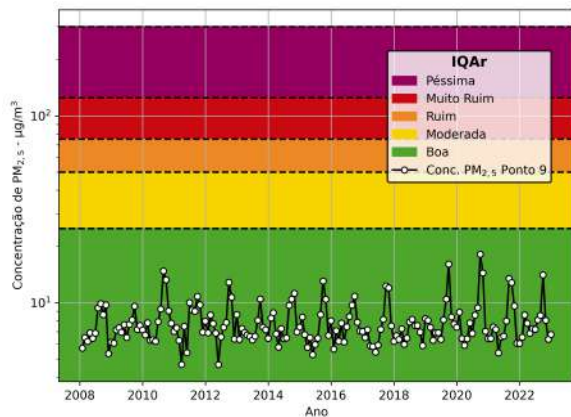




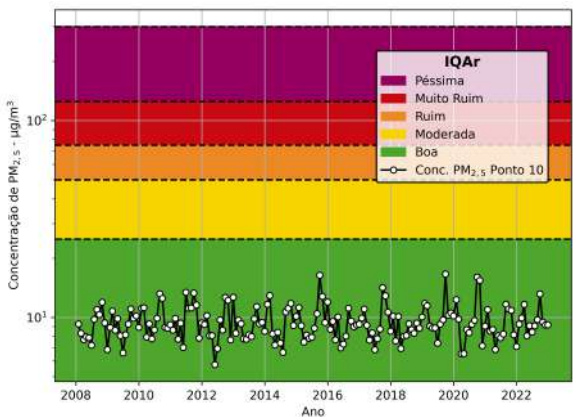
(g) Ponto 7



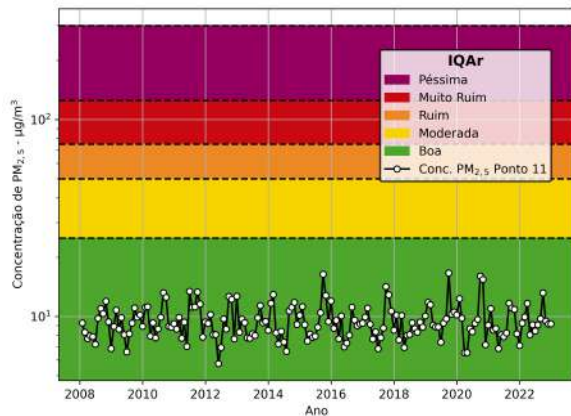
(h) Ponto 8



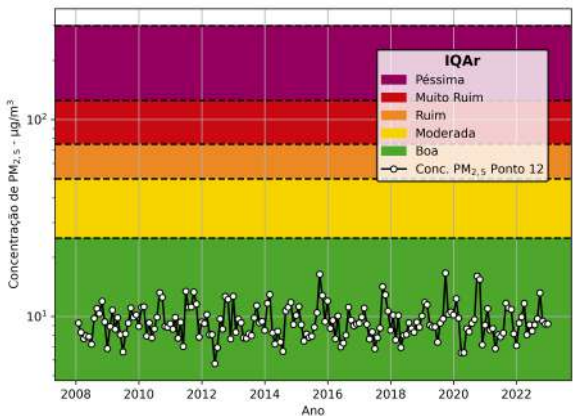
(i) Ponto 9



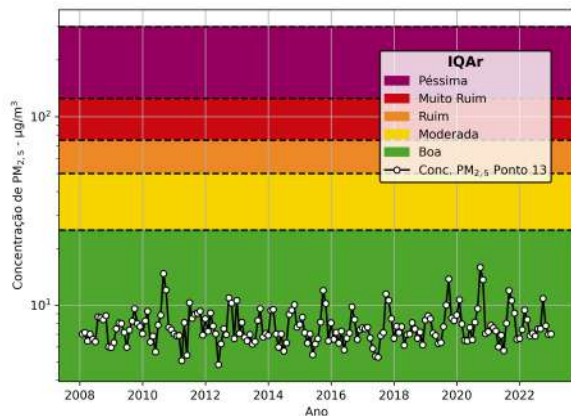
(j) Ponto 10



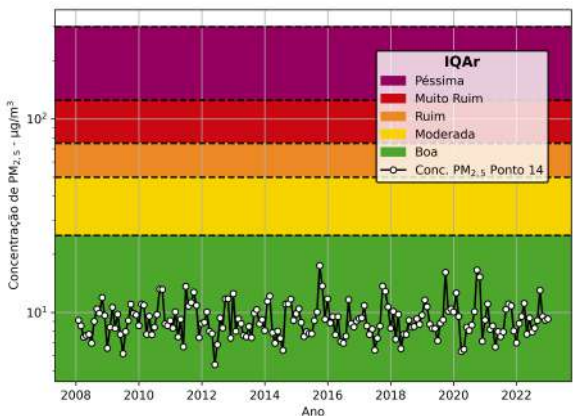
(k) Ponto 11



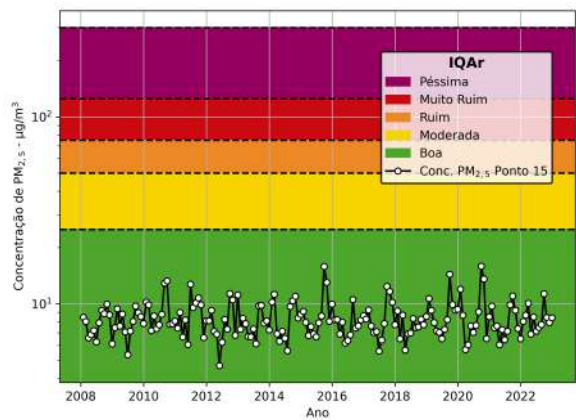
(l) Ponto 12



(m) Ponto 13



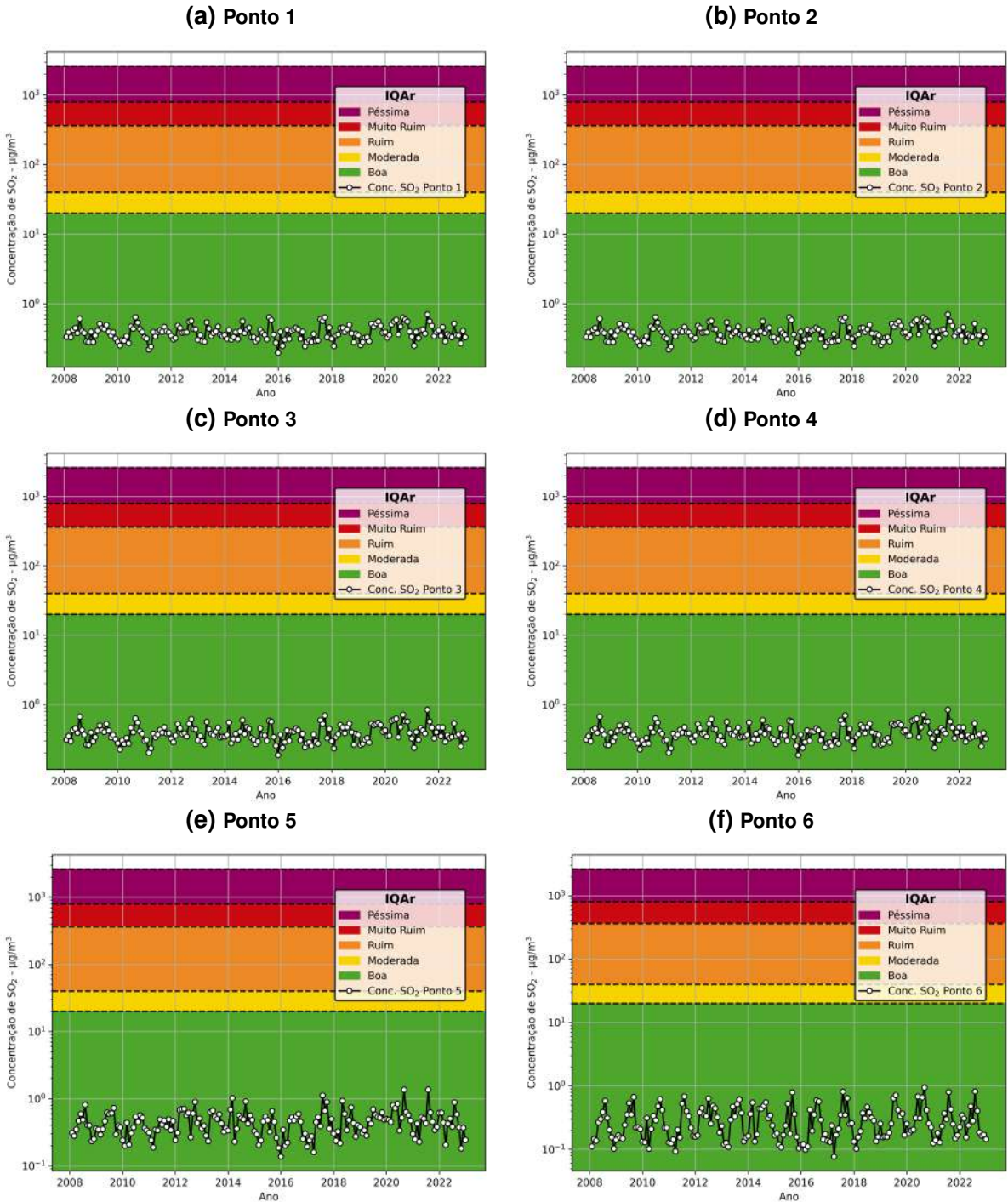
(n) Ponto 14

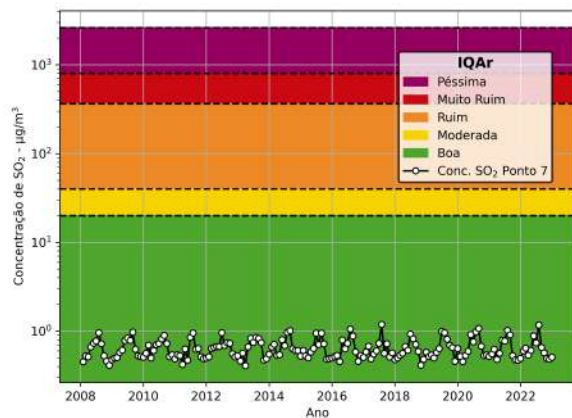


(o) Ponto 15

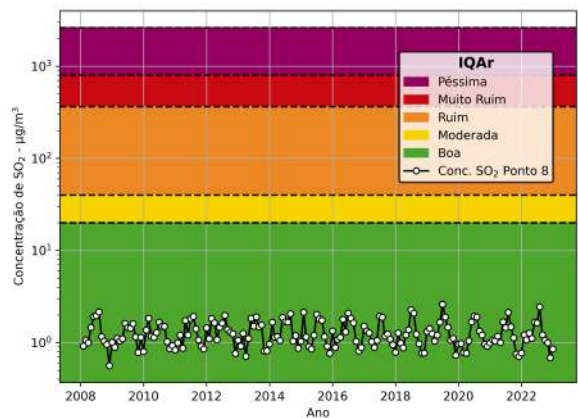
APÊNDICE J – GRÁFICOS DE CONCENTRAÇÃO DO SO₂ RELACIONANDO COM O ÍNDICE DE QUALIDADE DO AR (IQAr), PARA OS 15 PONTOS

Figura 81 – Concentração do Poluente SO₂ e a Relação com o Índice de Qualidade do Ar

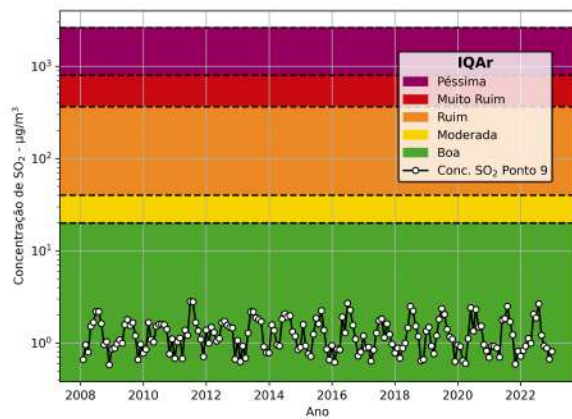




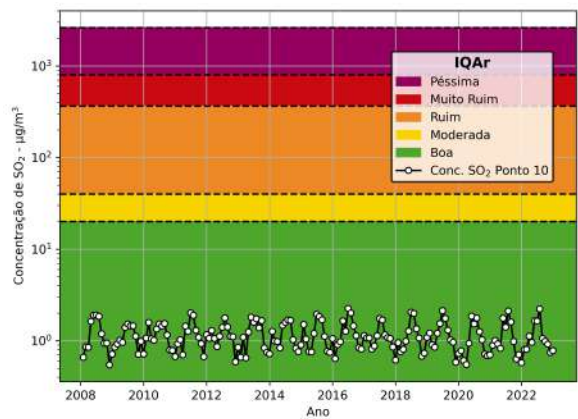
(g) Ponto 7



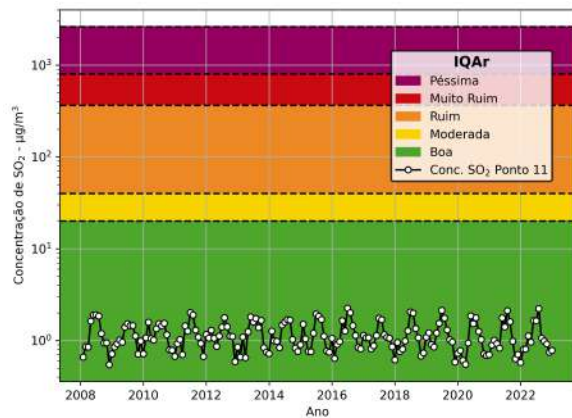
(h) Ponto 8



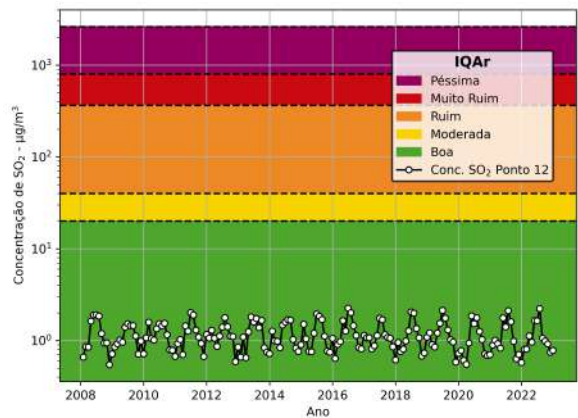
(i) Ponto 9



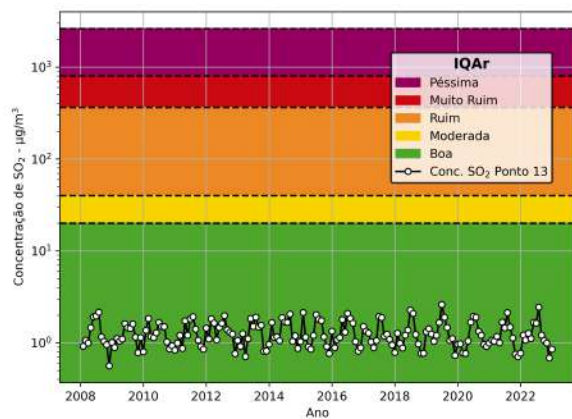
(j) Ponto 10



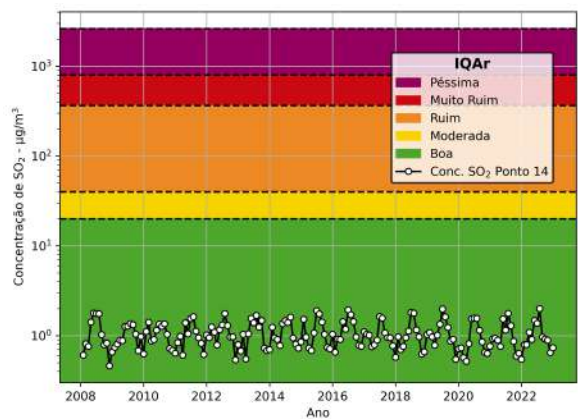
(k) Ponto 11



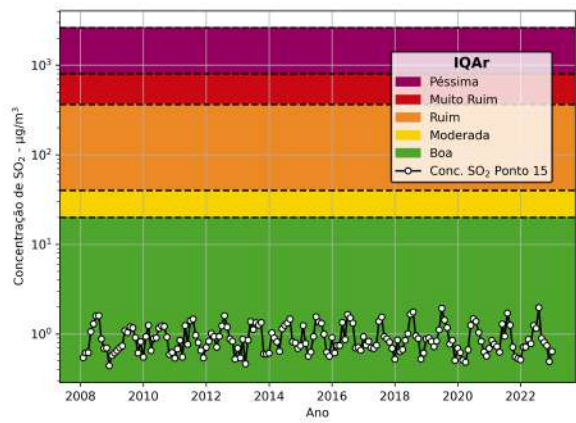
(l) Ponto 12



(m) Ponto 13



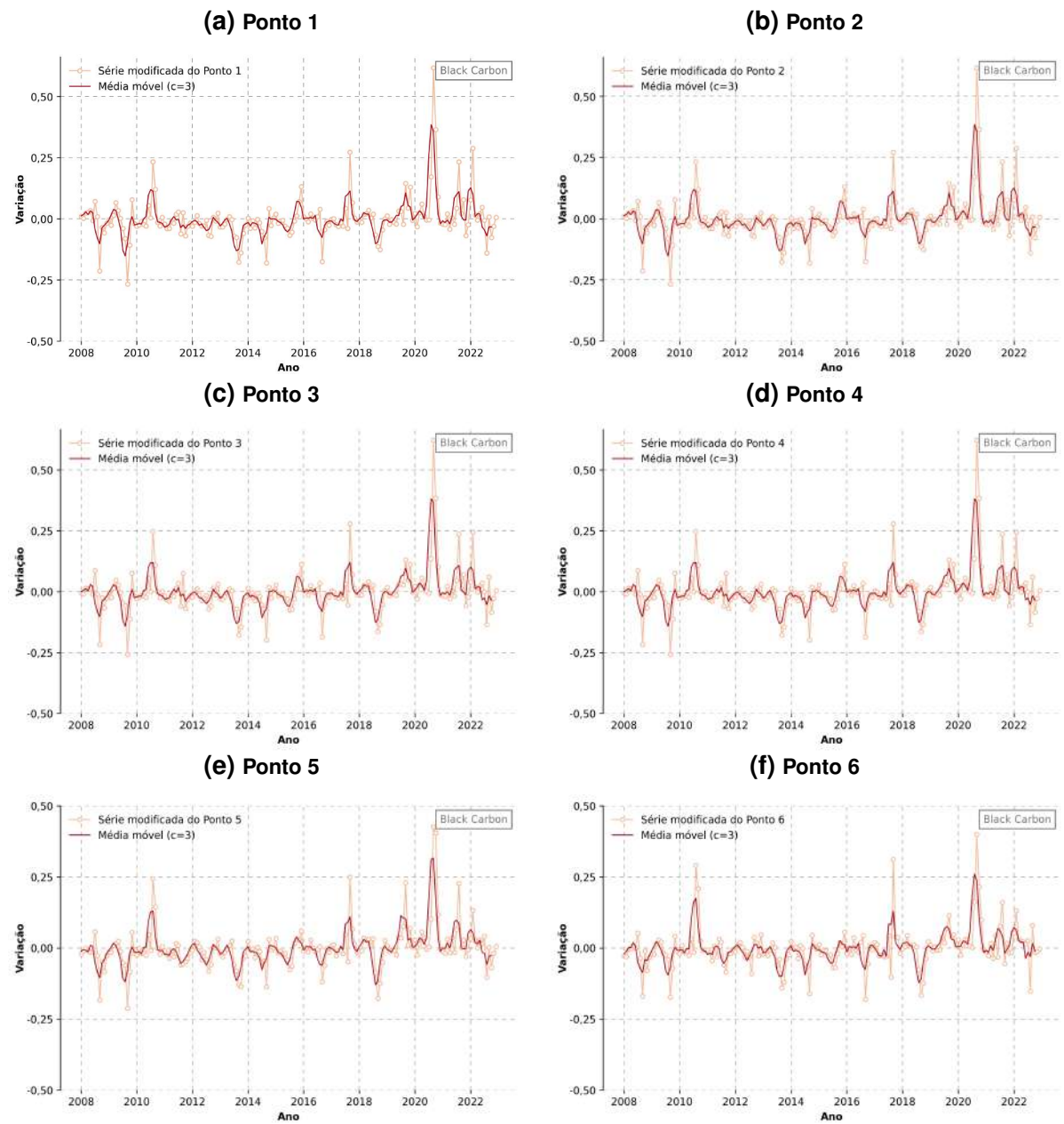
(n) Ponto 14

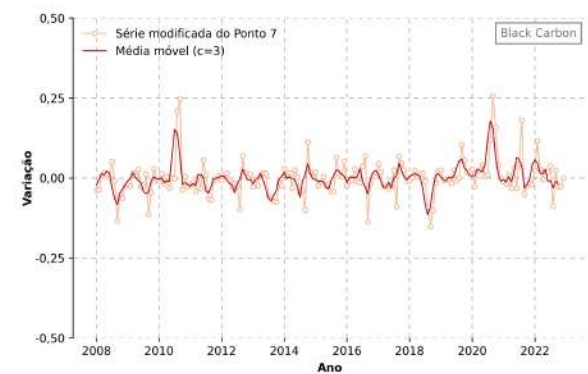


(o) Ponto 15

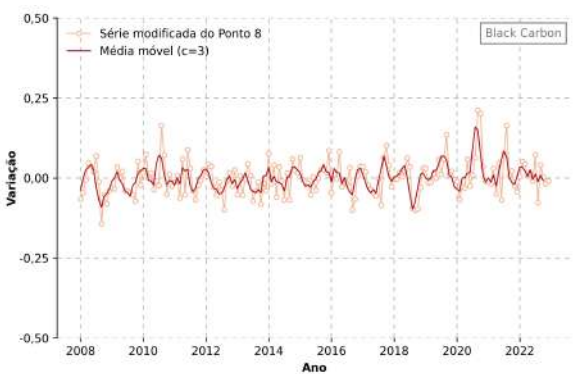
APÊNDICE K – GRÁFICOS DE SÉRIES HISTÓRICAS DE BLACK CARBON, PARA OS 15 PONTOS

Figura 82 – Séries históricas de Black Carbon

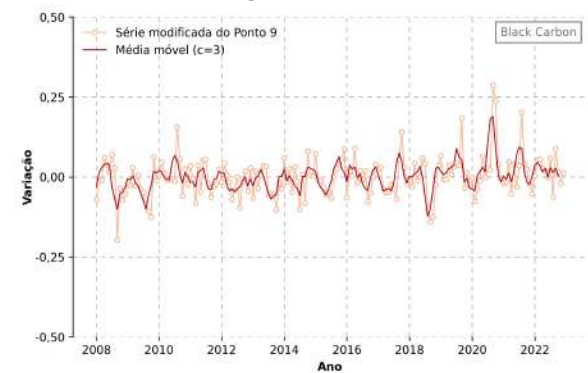




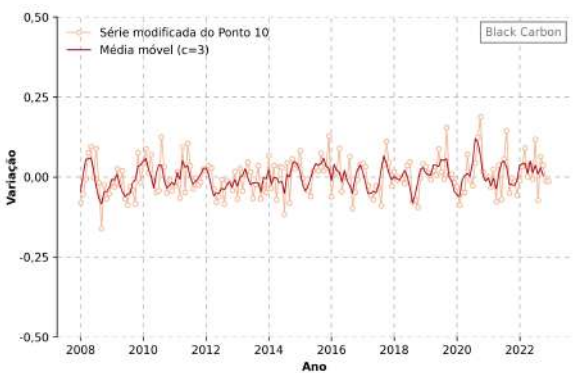
(g) Ponto 7



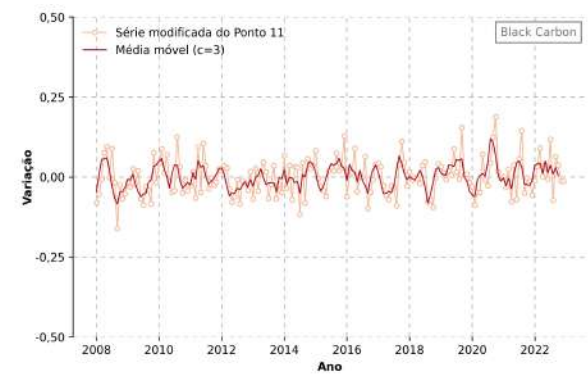
(h) Ponto 8



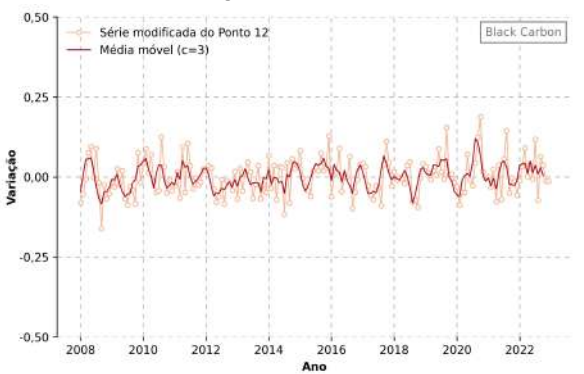
(i) Ponto 9



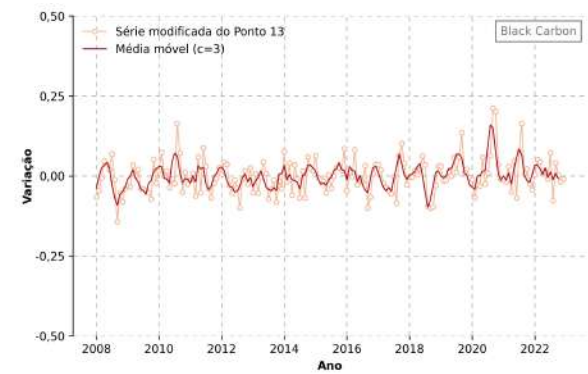
(j) Ponto 10



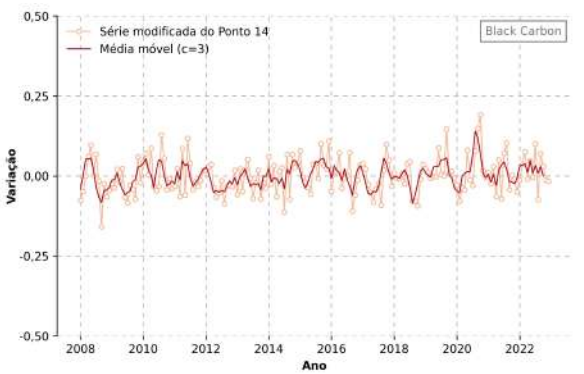
(k) Ponto 11



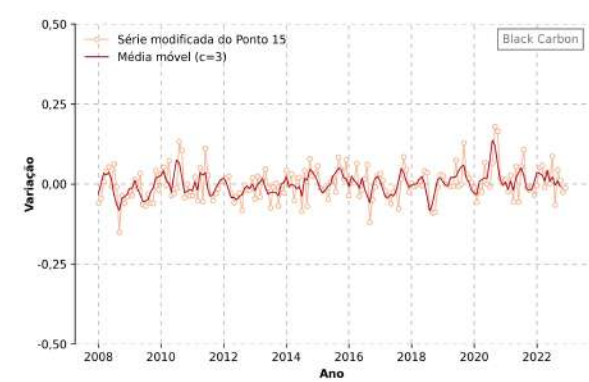
(l) Ponto 12



(m) Ponto 13



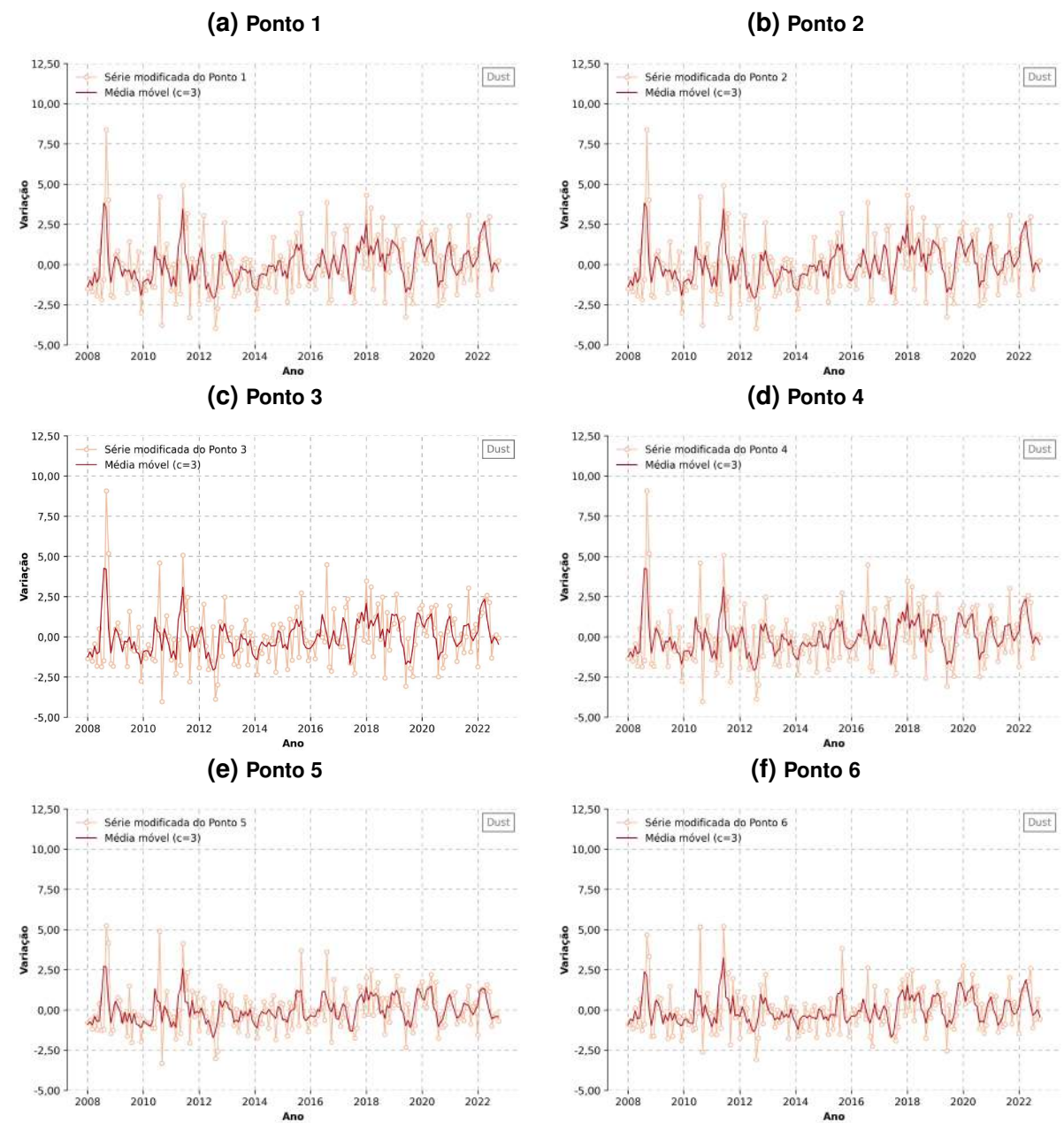
(n) Ponto 14

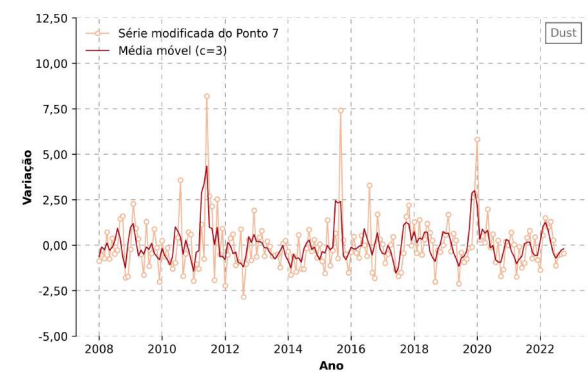


(o) Ponto 15

APÊNDICE L – GRÁFICOS DE SÉRIES HISTÓRICAS DE DUST, PARA OS 15 PONTOS

Figura 83 – Séries históricas de Dust (Poeira)

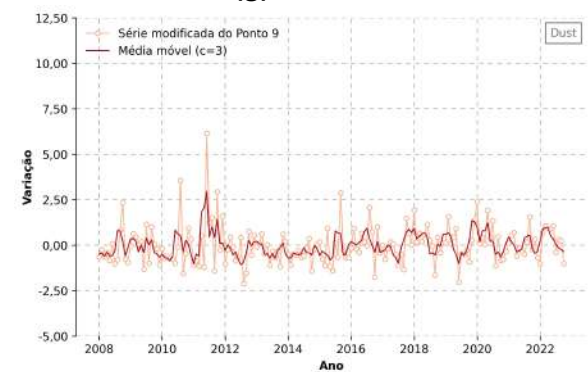




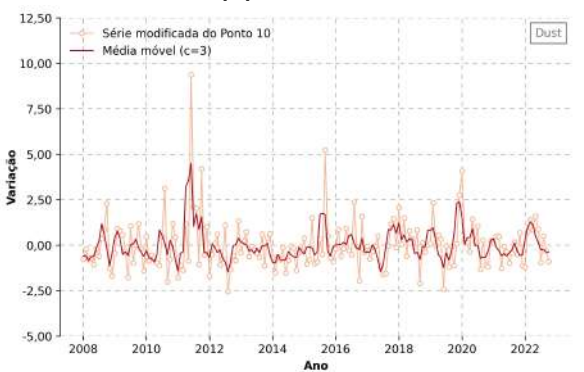
(g) Ponto 7



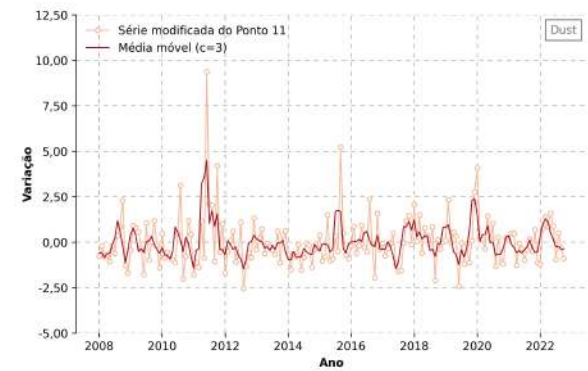
(h) Ponto 8



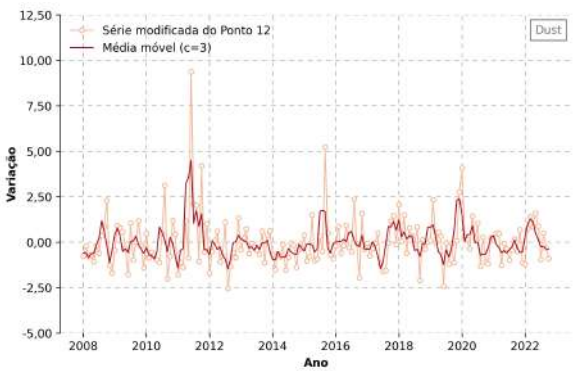
(i) Ponto 9



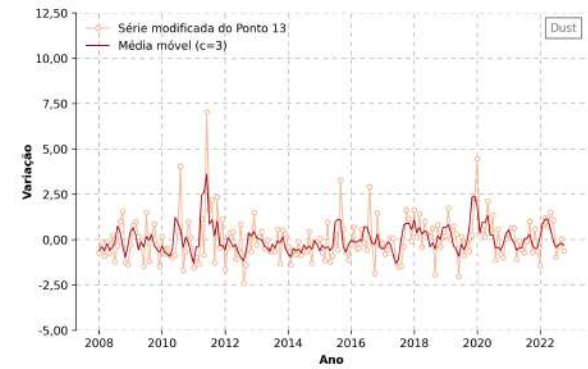
(j) Ponto 10



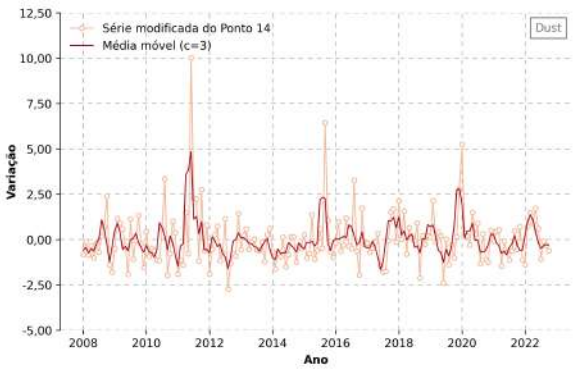
(k) Ponto 11



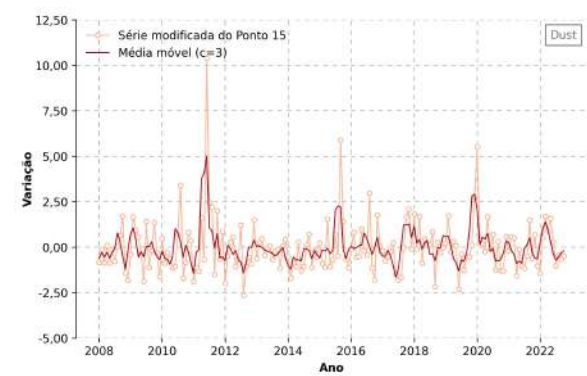
(l) Ponto 12



(m) Ponto 13



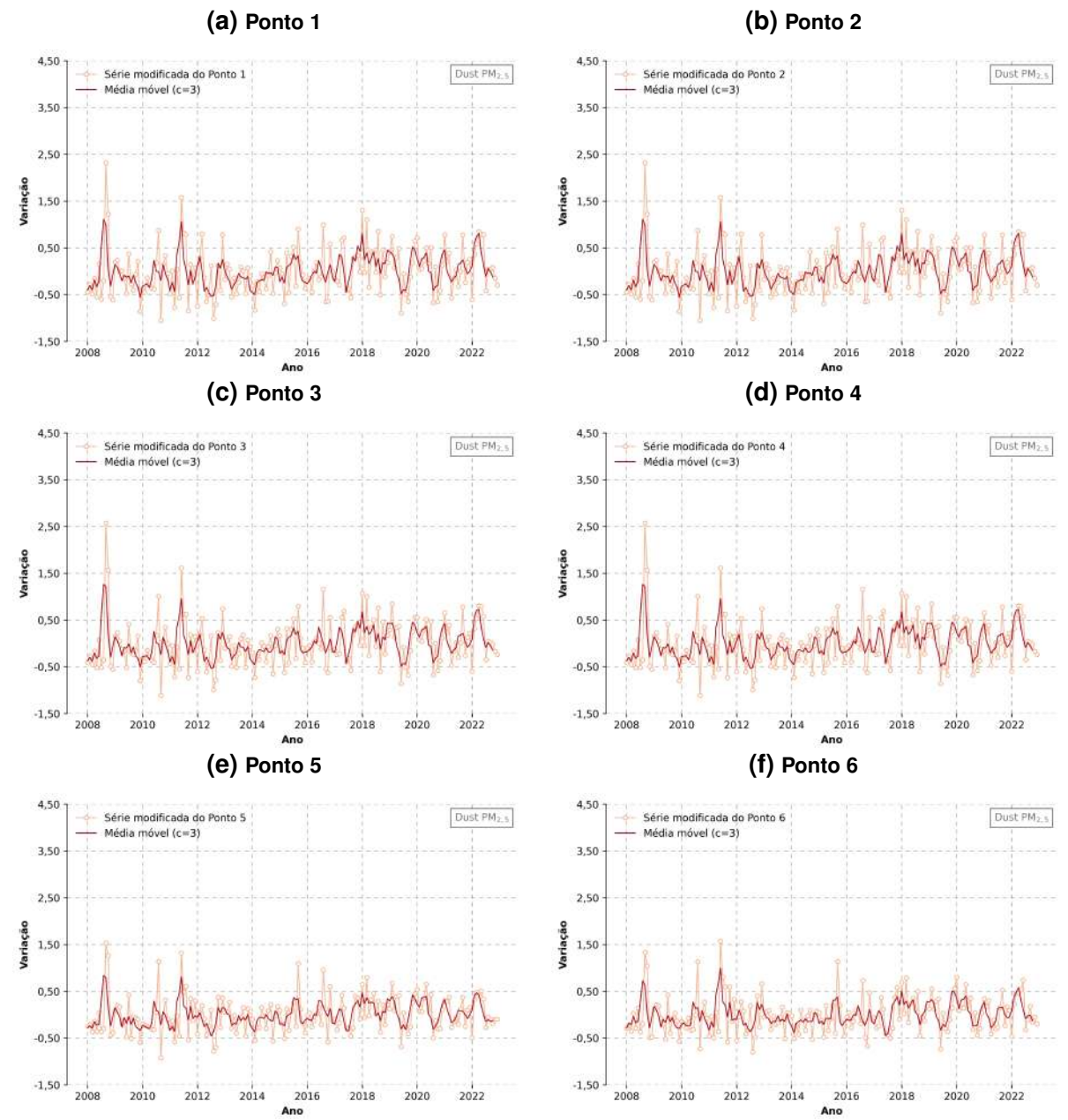
(n) Ponto 14

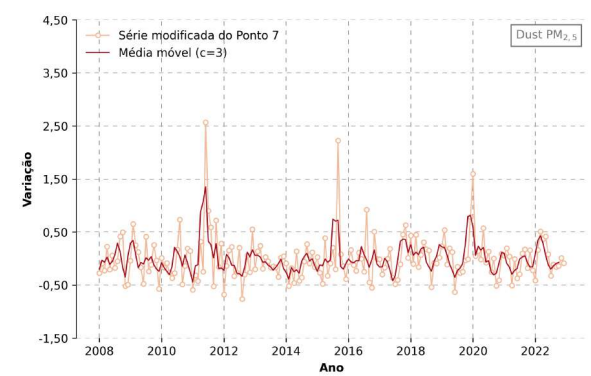


(o) Ponto 15

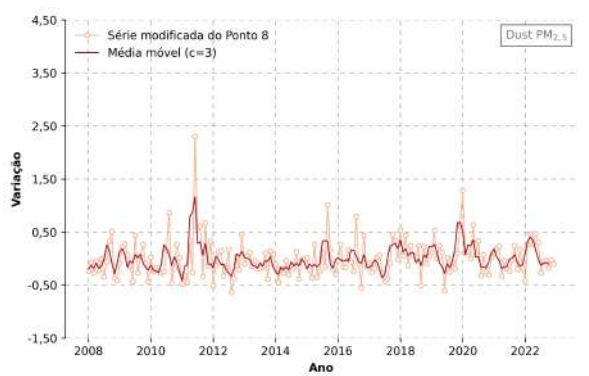
APÊNDICE M – GRÁFICOS DE SÉRIES HISTÓRICAS DE DUST MP 2,5, PARA OS 15 PONTOS

Figura 84 – Séries históricas de Dust (Poeira) $MP_{2,5}$

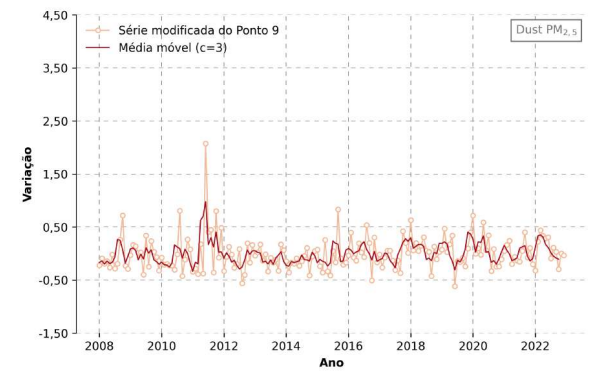




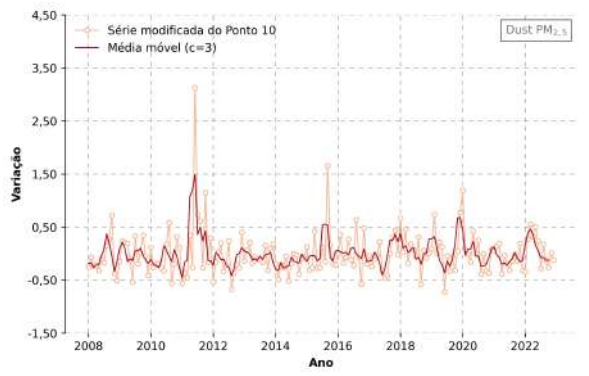
(g) Ponto 7



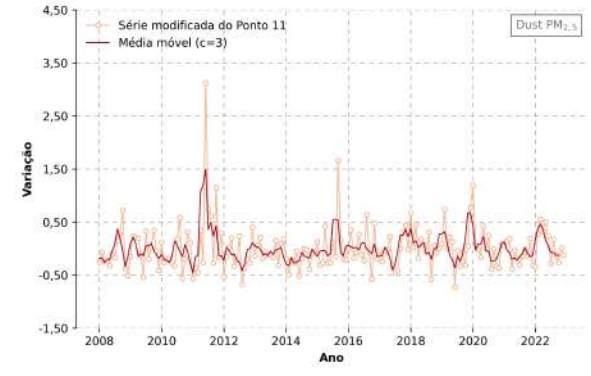
(h) Ponto 8



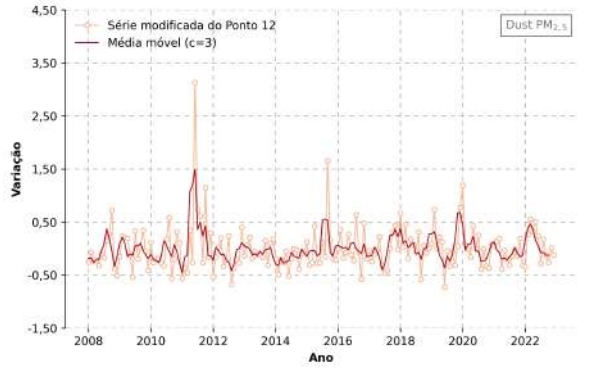
(i) Ponto 9



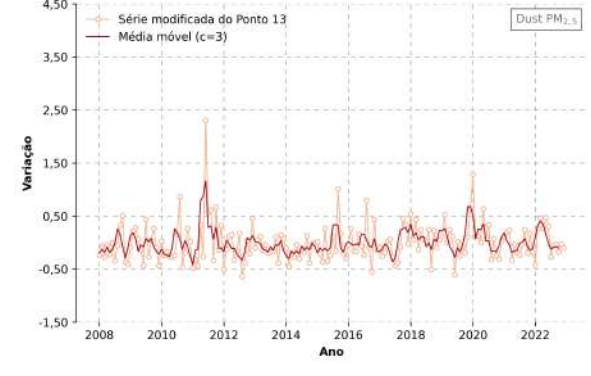
(j) Ponto 10



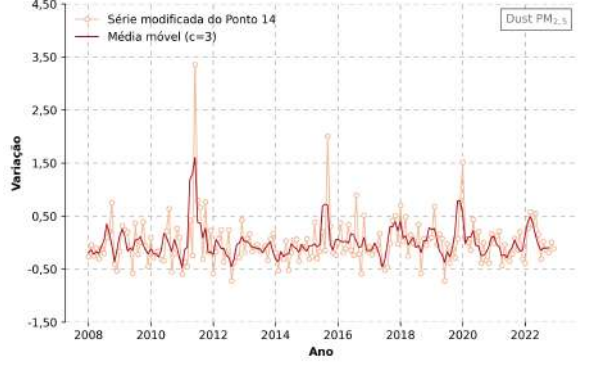
(k) Ponto 11



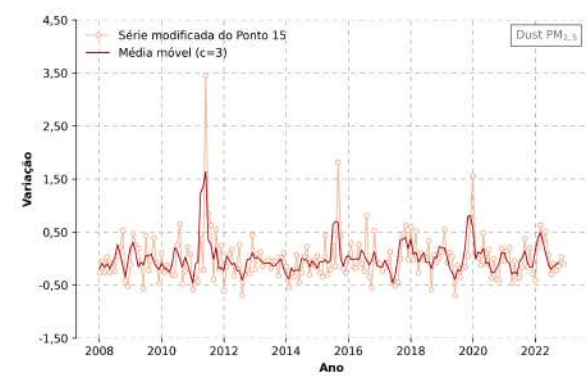
(l) Ponto 12



(m) Ponto 13



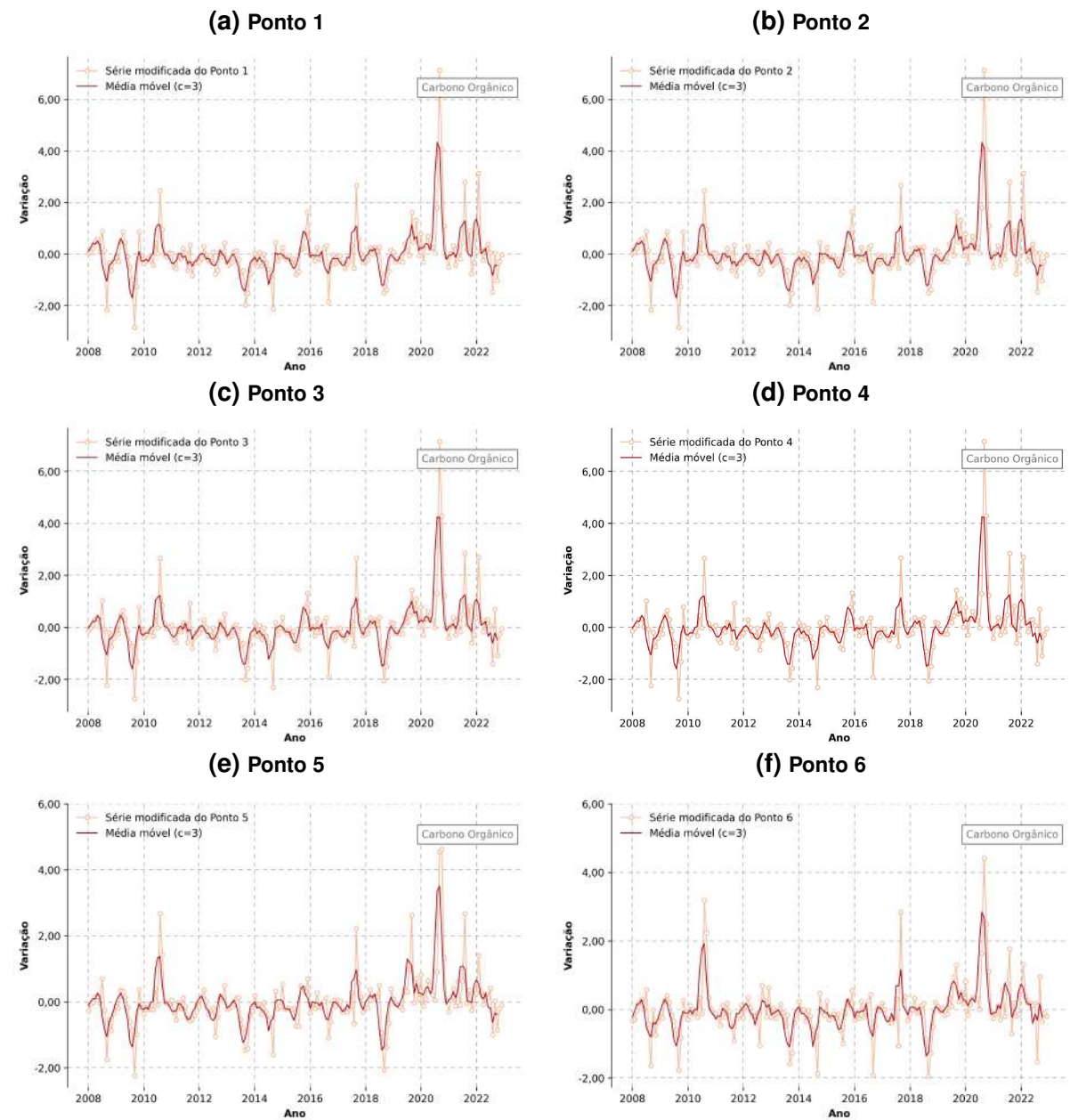
(n) Ponto 14

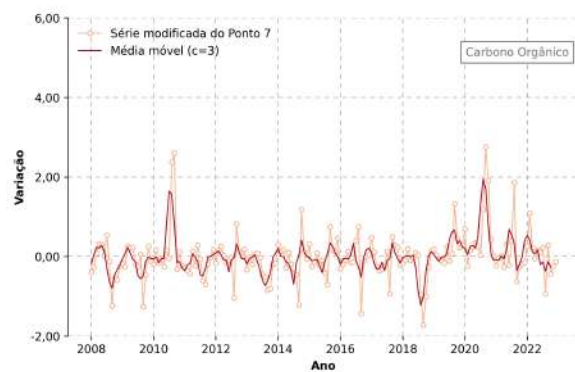


(o) Ponto 15

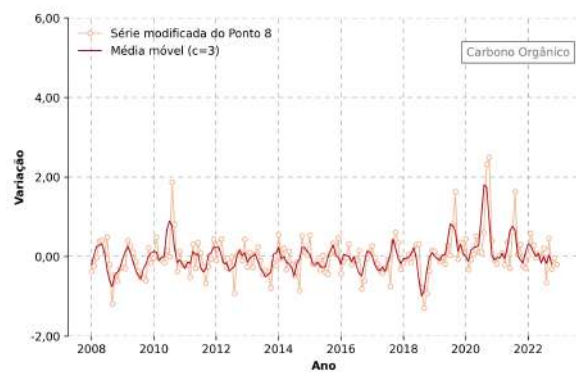
APÊNDICE N – GRÁFICOS DE SÉRIES HISTÓRICAS DE CARBONO ORGÂNICO, PARA OS 15 PONTOS

Figura 85 – Séries históricas de Carbono Orgânico

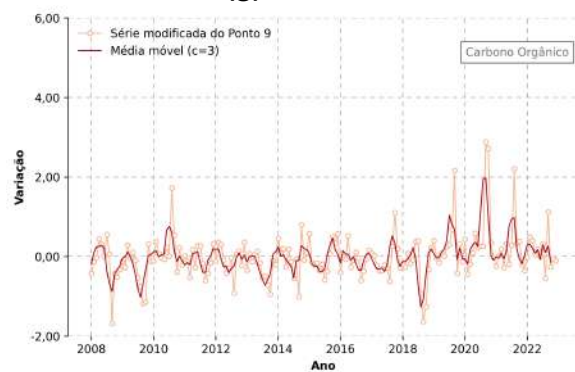




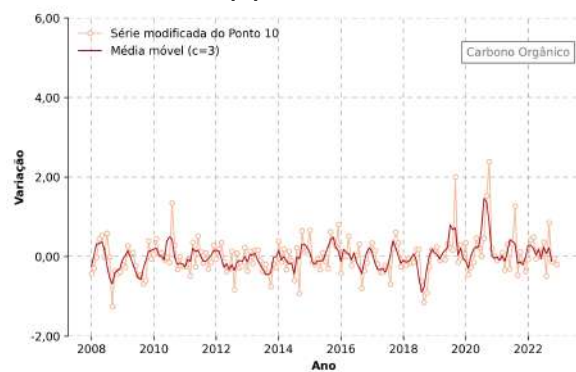
(g) Ponto 7



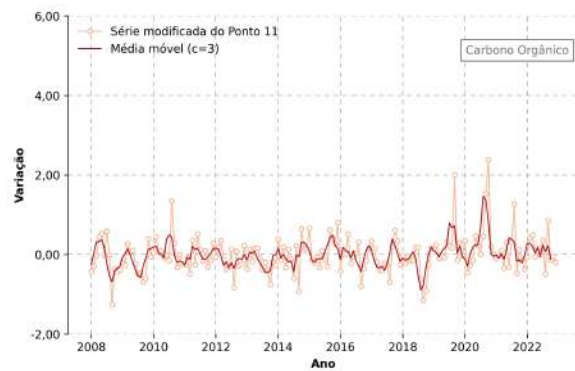
(h) Ponto 8



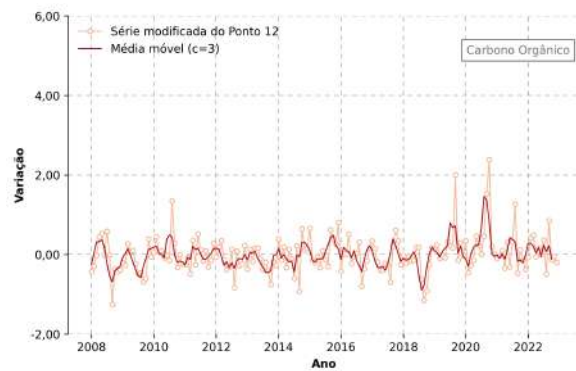
(i) Ponto 9



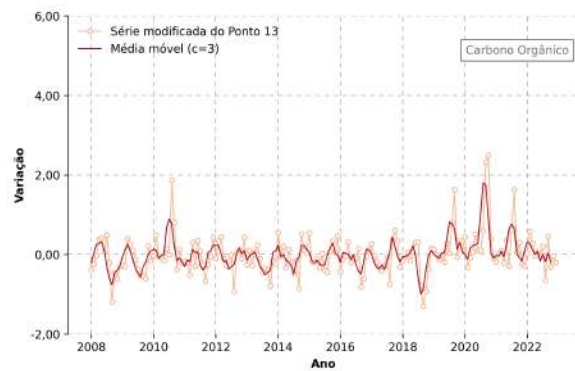
(j) Ponto 10



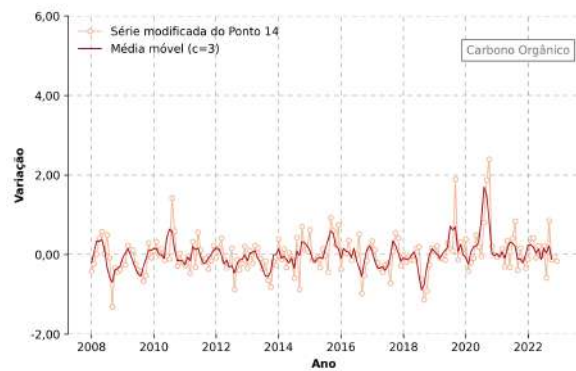
(k) Ponto 11



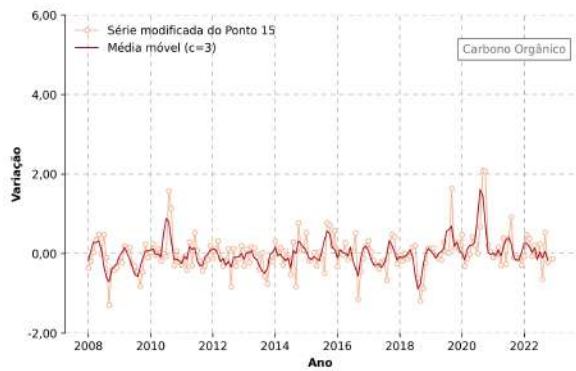
(l) Ponto 12



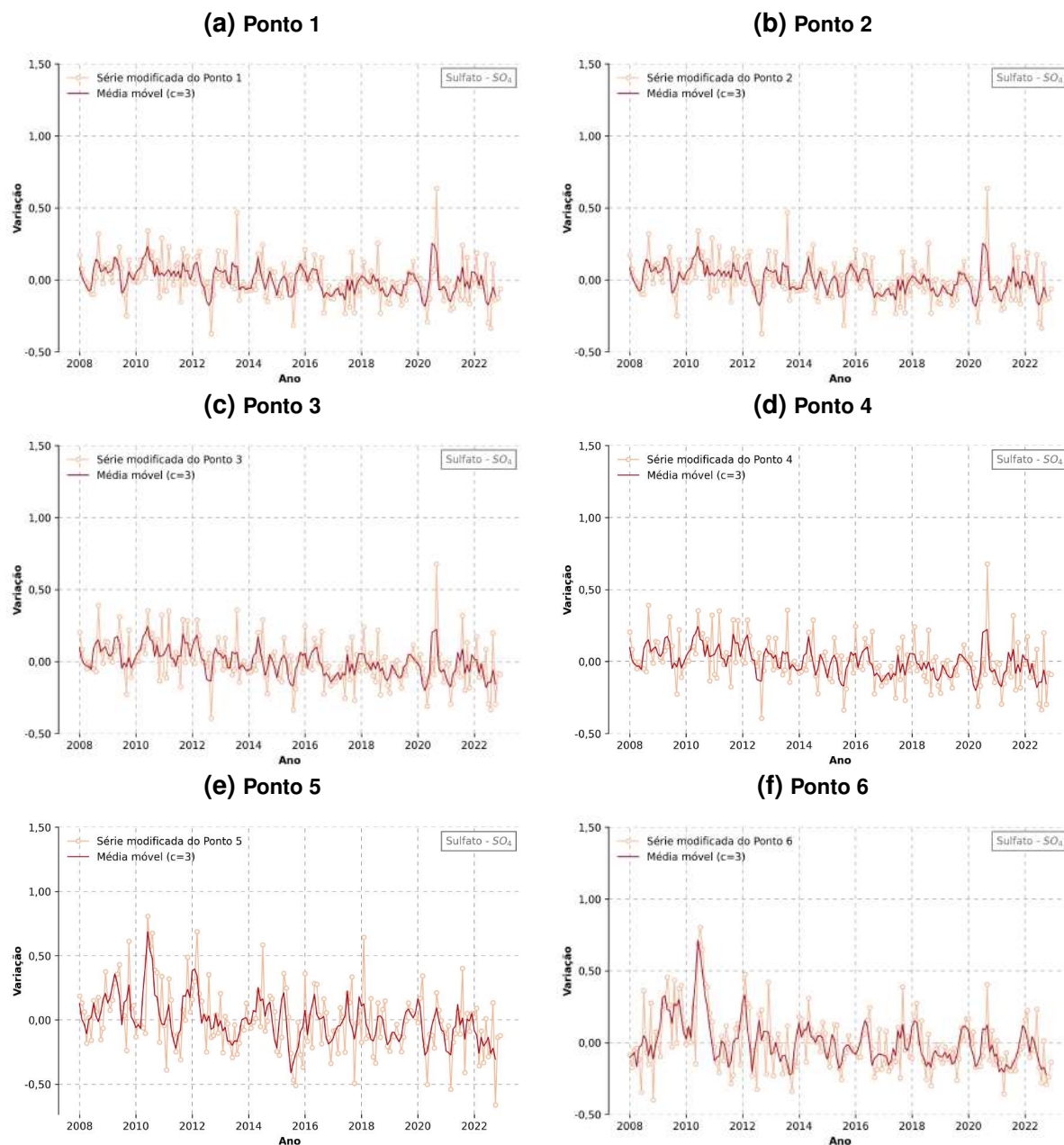
(m) Ponto 13

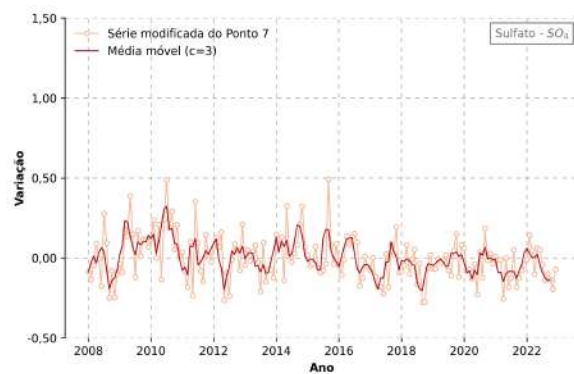
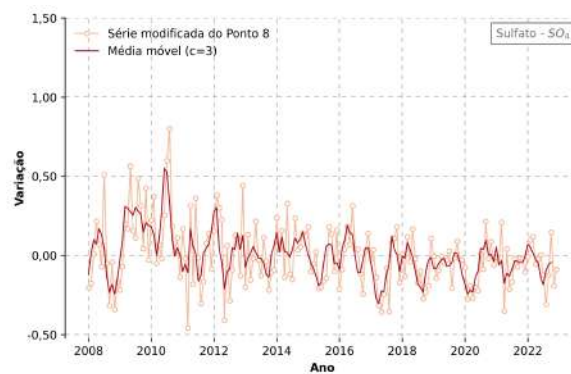
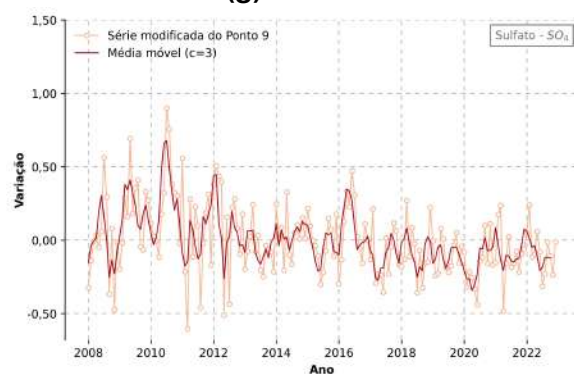
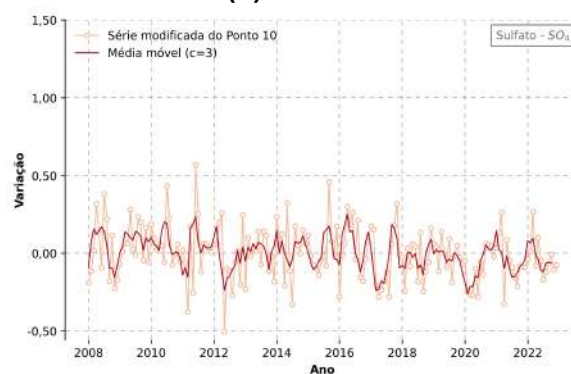
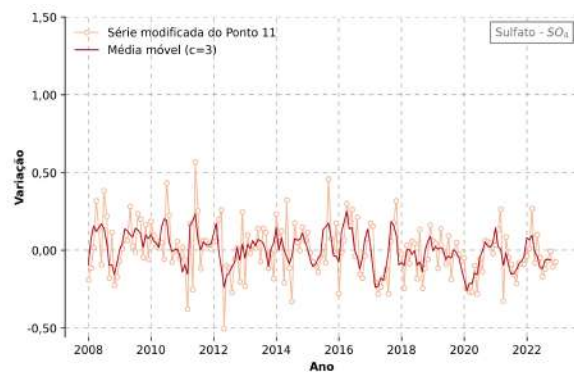
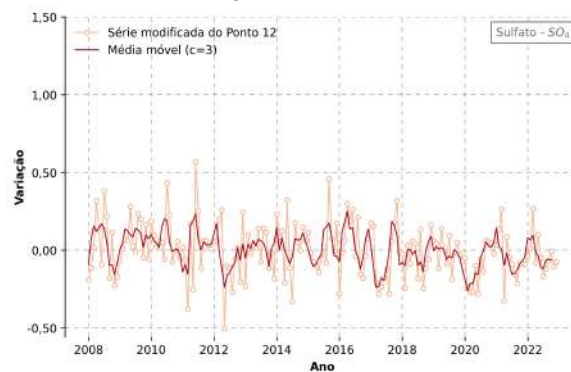
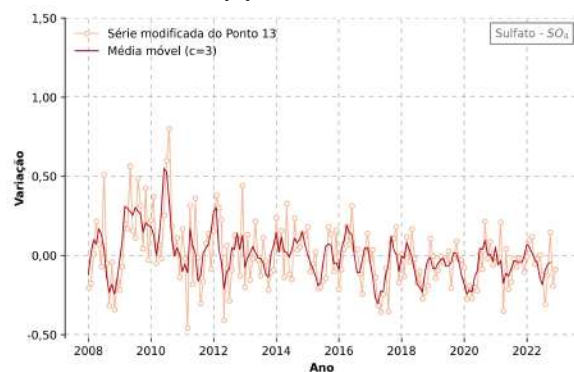
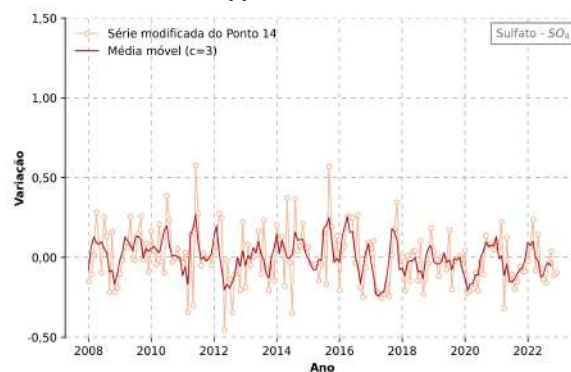


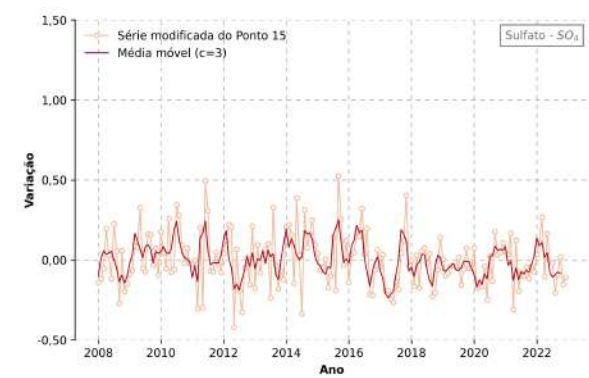
(n) Ponto 14



(o) Ponto 15

APÊNDICE O – GRÁFICOS DE SÉRIES HISTÓRICAS DE SULFATO - SO₄, PARA OS 15 PONTOS**Figura 86 – Séries históricas de Sulfato - SO₄**

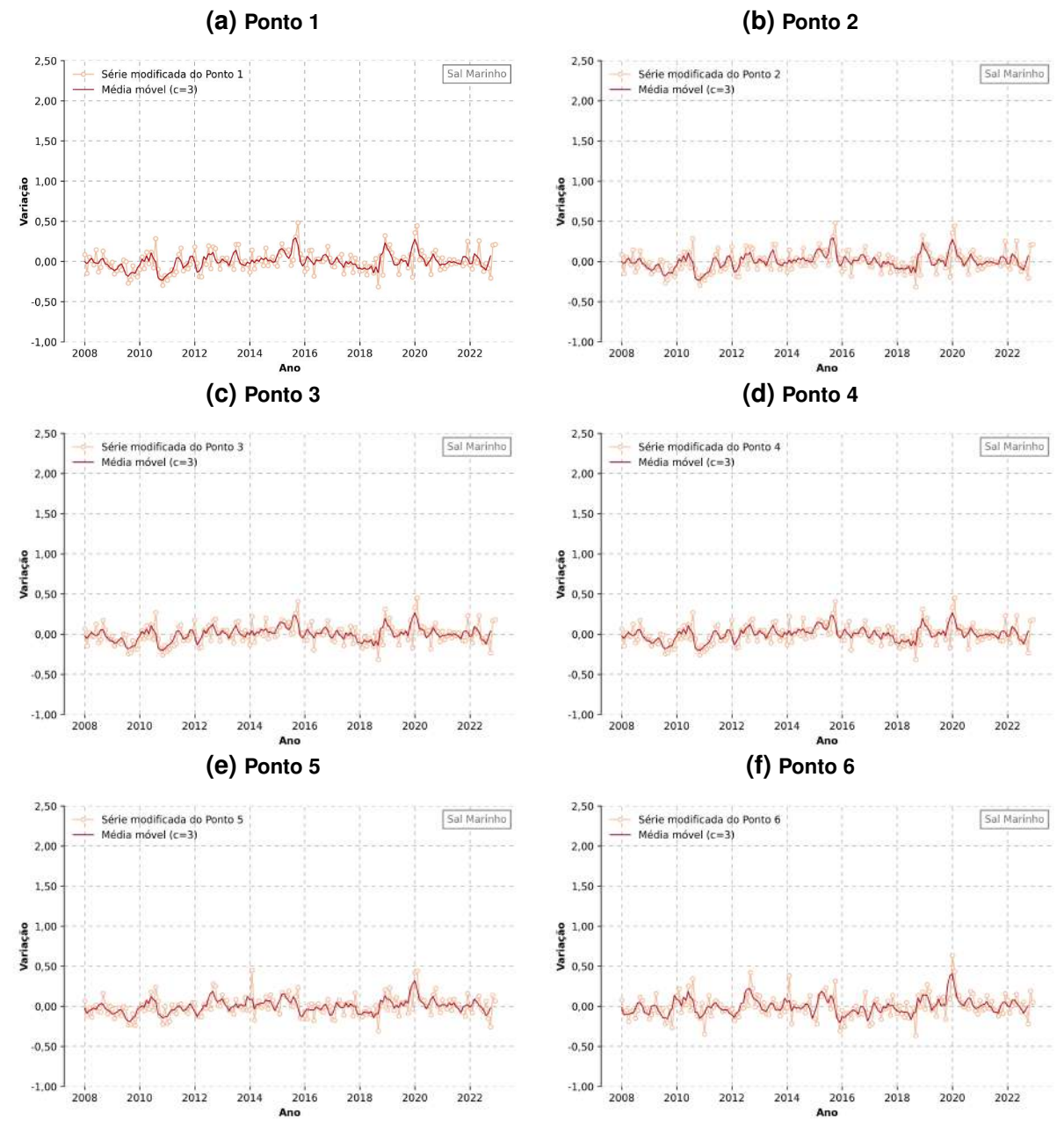
**(g) Ponto 7****(h) Ponto 8****(i) Ponto 9****(j) Ponto 10****(k) Ponto 11****(l) Ponto 12****(m) Ponto 13****(n) Ponto 14**

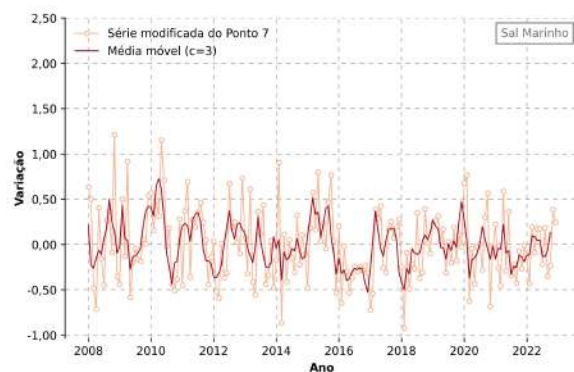
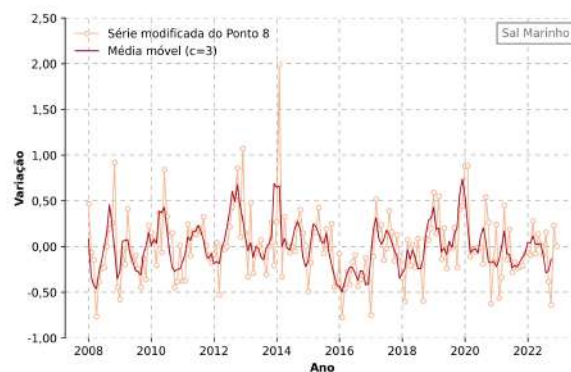
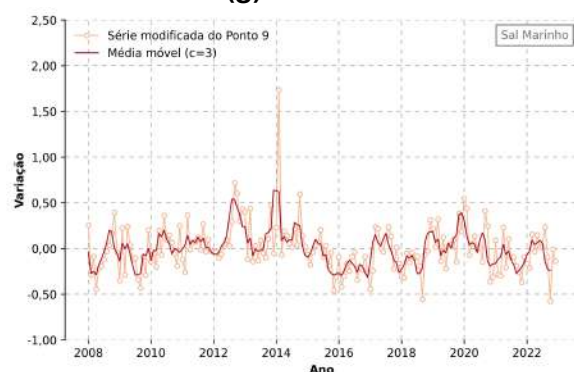
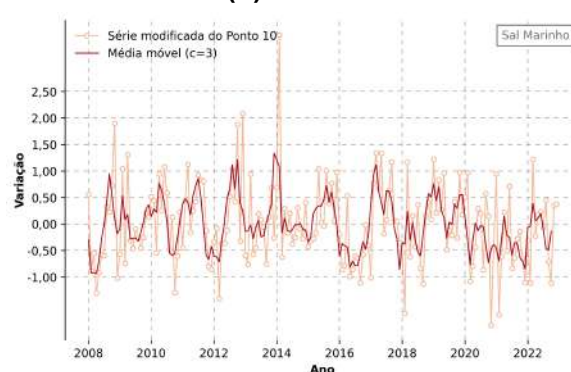
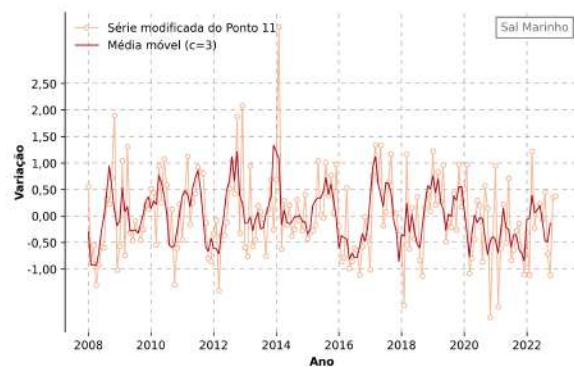
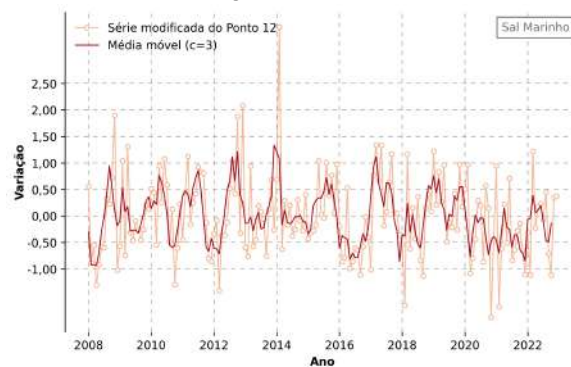
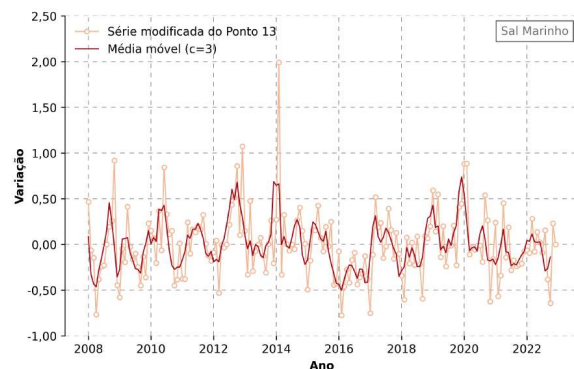
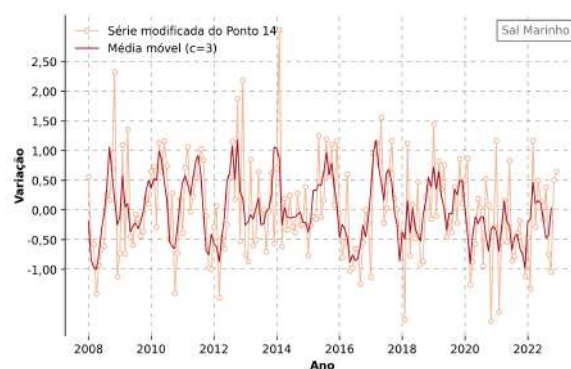


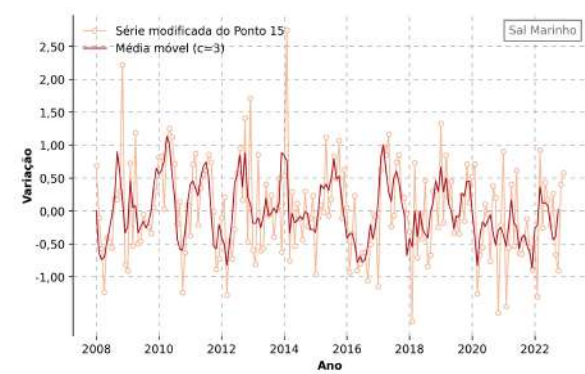
(o) Ponto 15

APÊNDICE P – GRÁFICOS DE SÉRIES HISTÓRICAS DE SAL MARINHO, PARA OS 15 PONTOS

Figura 87 – Séries históricas de Sal Marinho



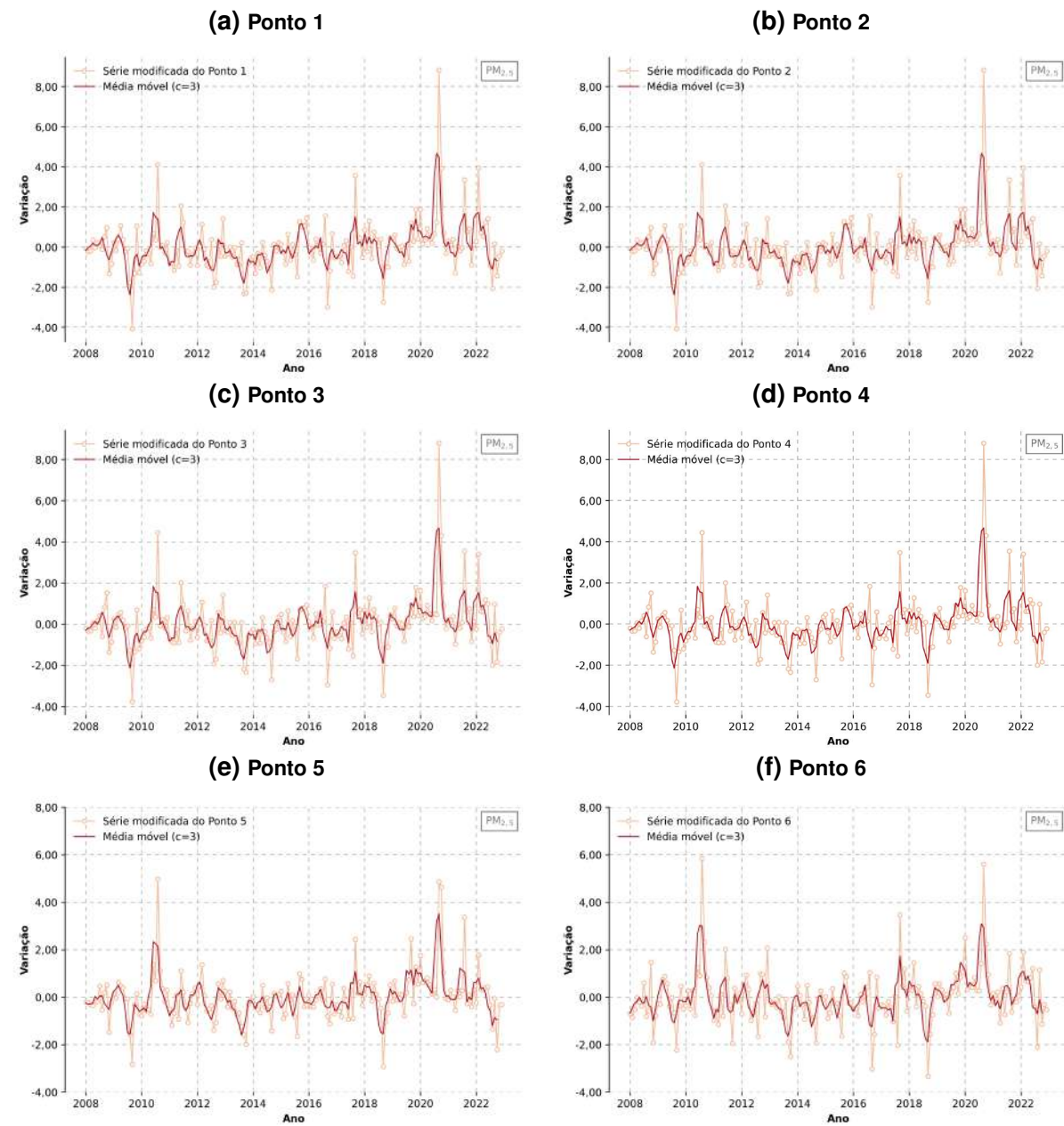
**(g) Ponto 7****(h) Ponto 8****(i) Ponto 9****(j) Ponto 10****(k) Ponto 11****(l) Ponto 12****(m) Ponto 13****(n) Ponto 14**

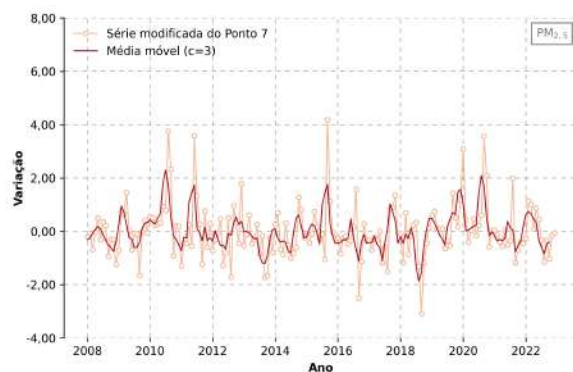
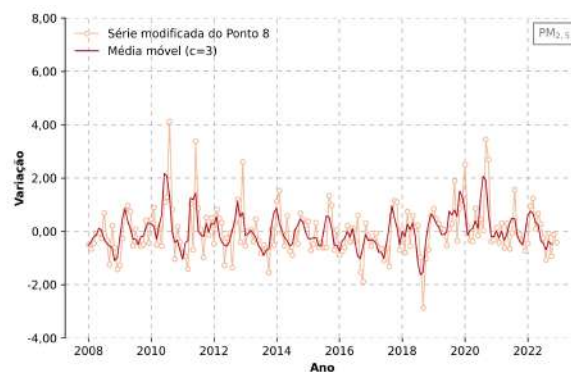
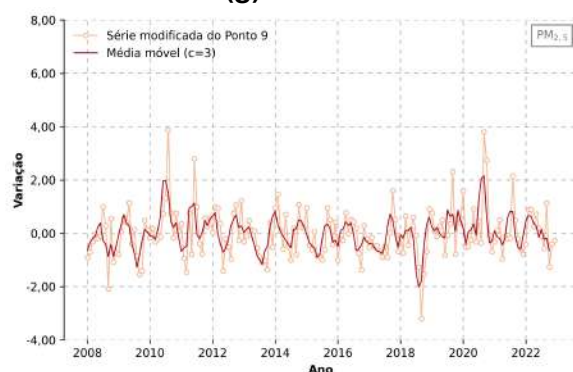
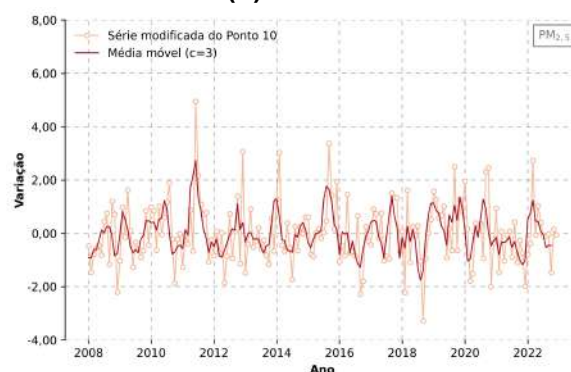
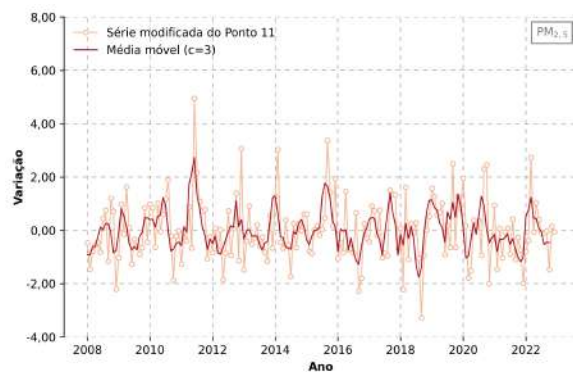
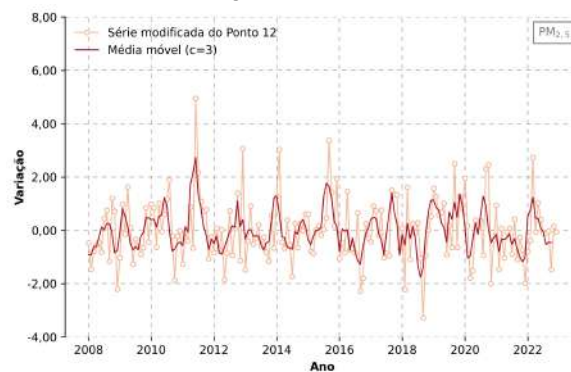
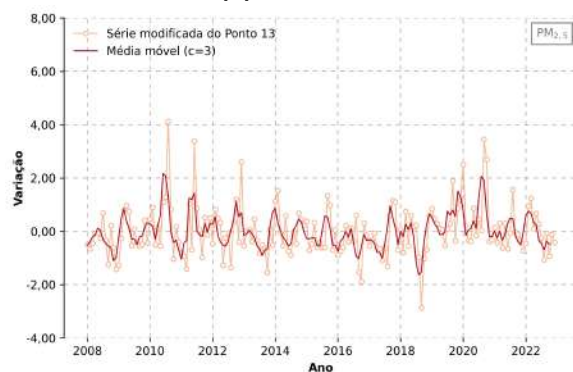
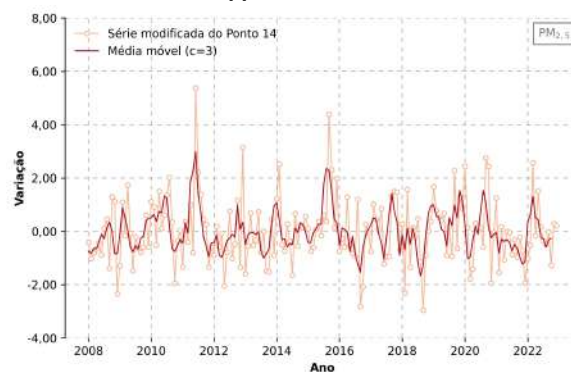


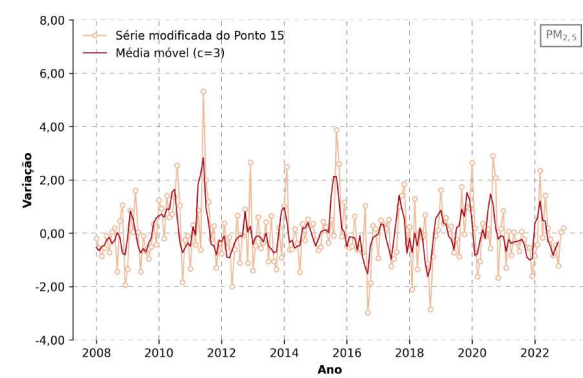
(o) Ponto 15

APÊNDICE Q – GRÁFICOS DE SÉRIES HISTÓRICAS DE PARTICULADO FINO MP 2,5, PARA OS 15 PONTOS

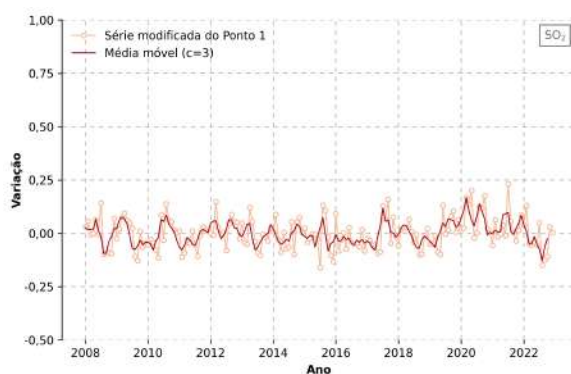
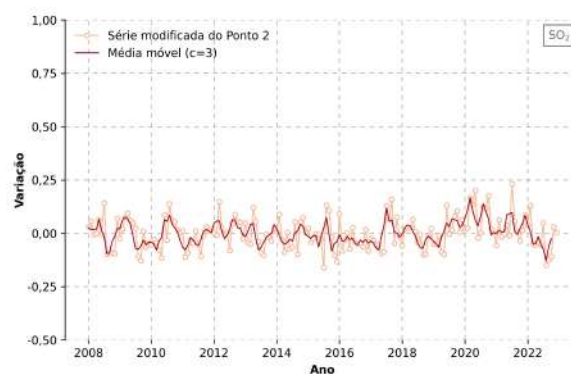
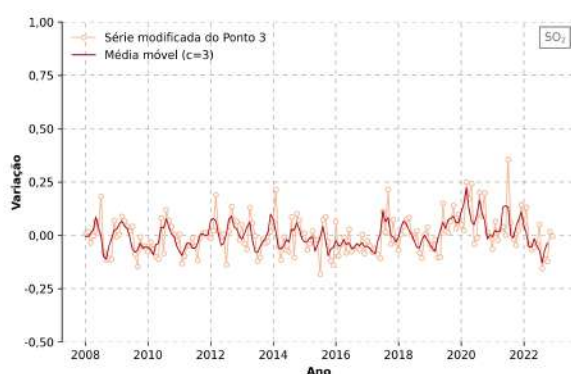
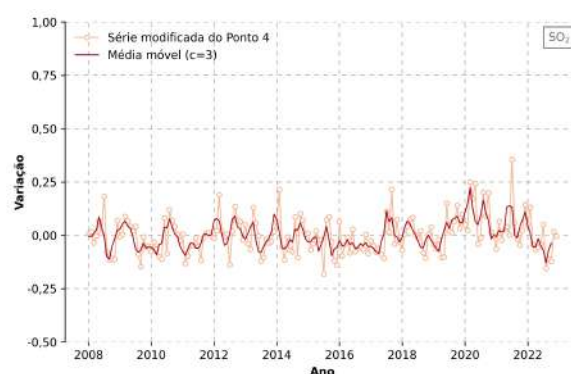
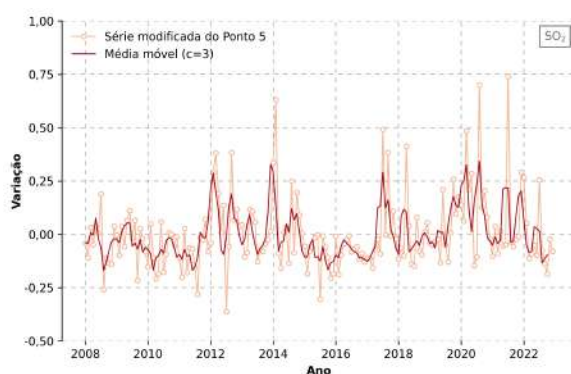
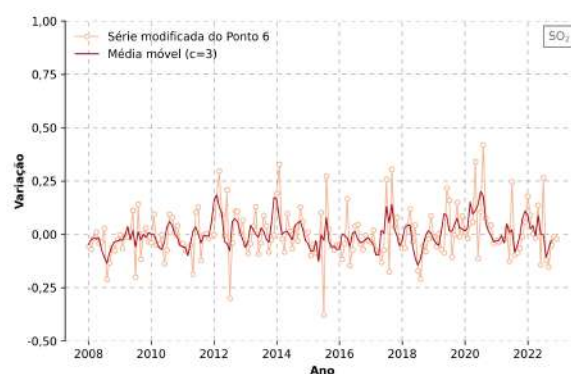
Figura 88 – Séries históricas de $MP_{2,5}$

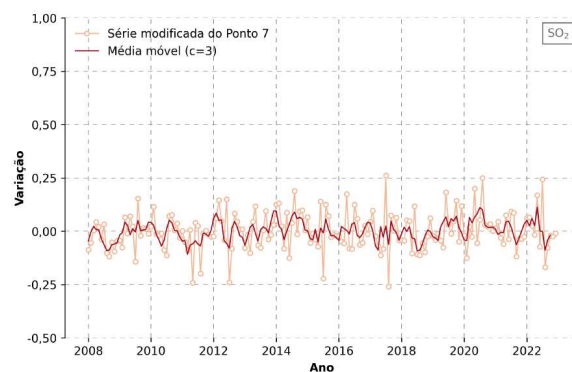
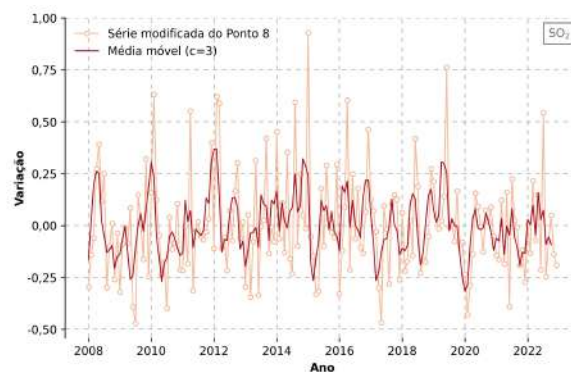
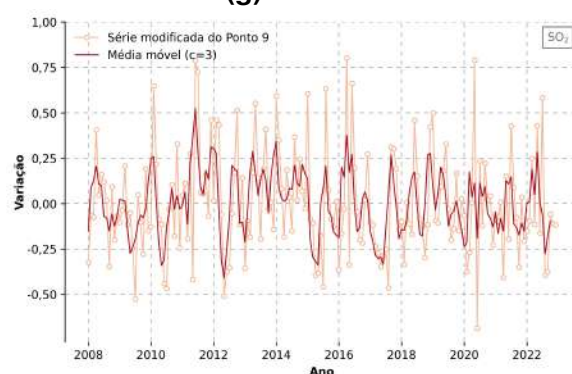
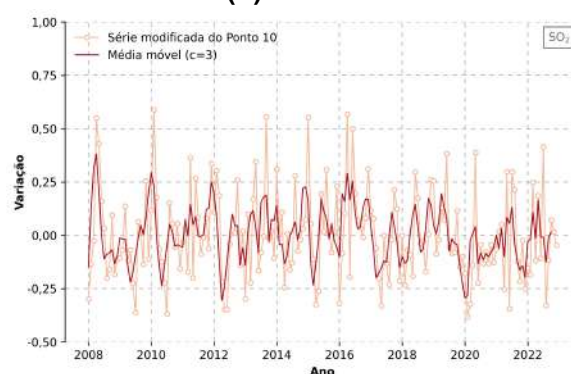
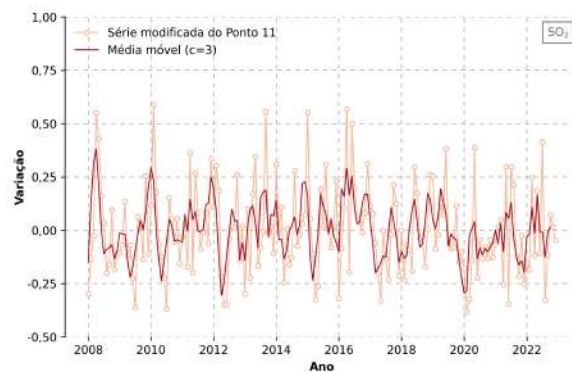
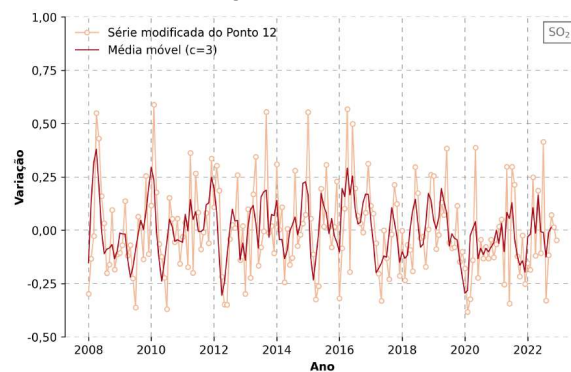
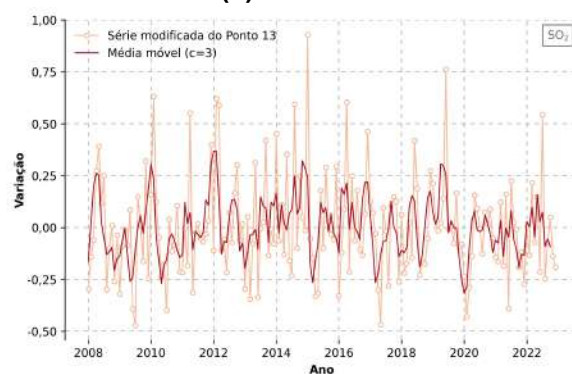
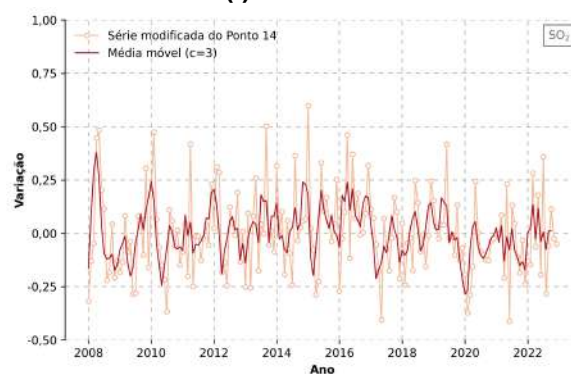


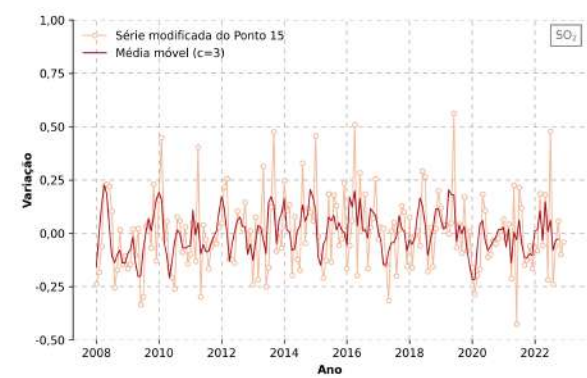
**(g) Ponto 7****(h) Ponto 8****(i) Ponto 9****(j) Ponto 10****(k) Ponto 11****(l) Ponto 12****(m) Ponto 13****(n) Ponto 14**



(o) Ponto 15

APÊNDICE R – GRÁFICOS DE SÉRIES HISTÓRICAS DE DIÓXIDO DE ENXOFRE - SO₂, PARA OS 15 PONTOS**Figura 89 – Séries históricas de Dióxido de Enxofre - SO₂****(a) Ponto 1****(b) Ponto 2****(c) Ponto 3****(d) Ponto 4****(e) Ponto 5****(f) Ponto 6**

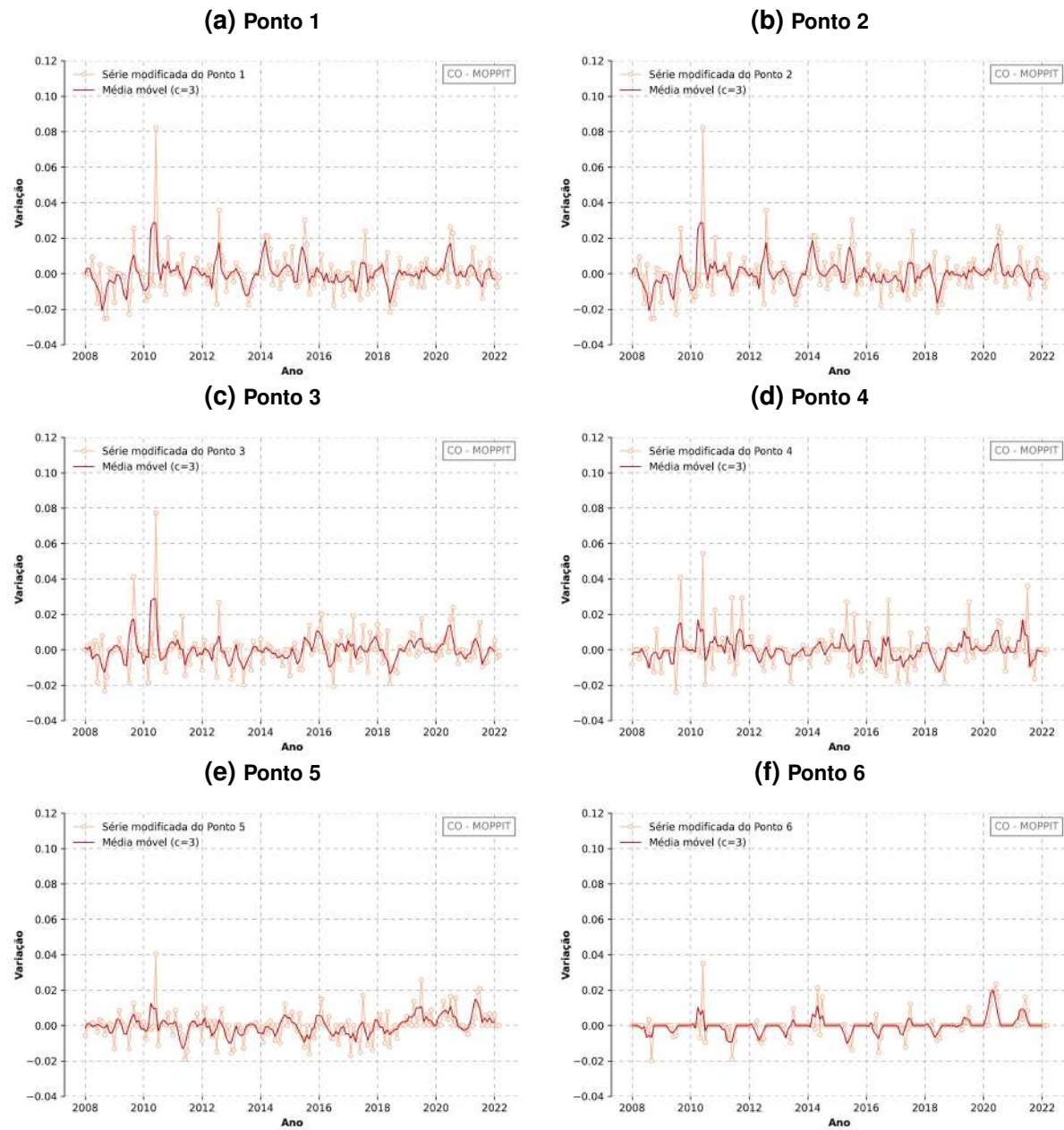
**(g) Ponto 7****(h) Ponto 8****(i) Ponto 9****(j) Ponto 10****(k) Ponto 11****(l) Ponto 12****(m) Ponto 13****(n) Ponto 14**

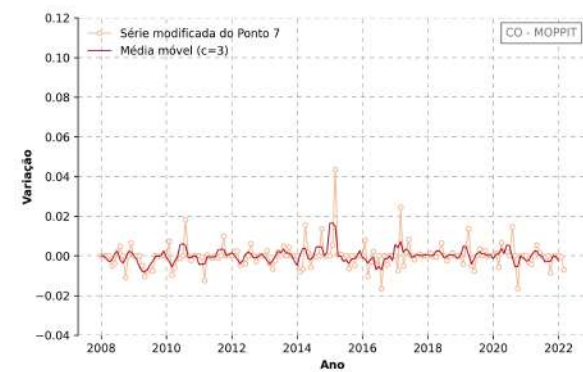


(o) Ponto 15

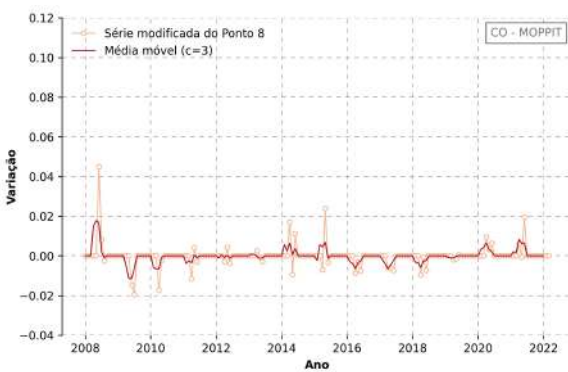
APÊNDICE S – GRÁFICOS DE SÉRIES HISTÓRICAS DE MONÓXIDO DE CARBONO - CO (MOPPIT), PARA OS 15 PONTOS

Figura 90 – Séries históricas de Monóxido de Carbono - CO (MOPPIT)

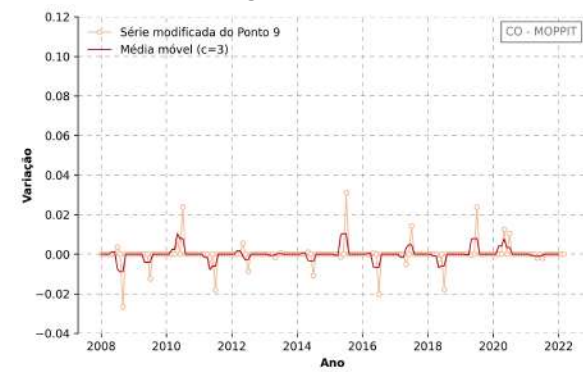




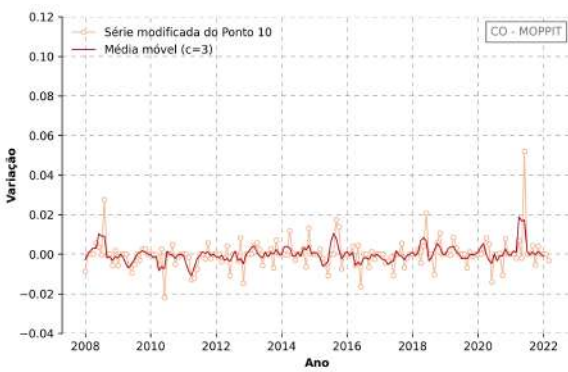
(g) Ponto 7



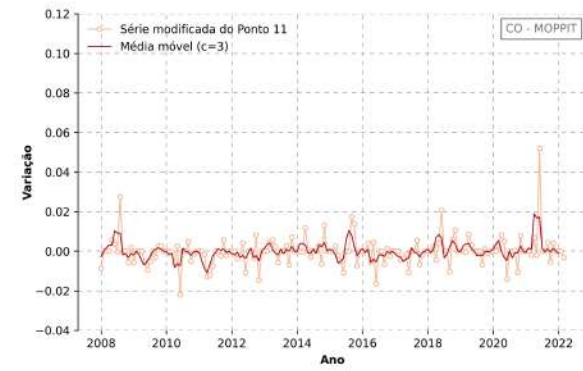
(h) Ponto 8



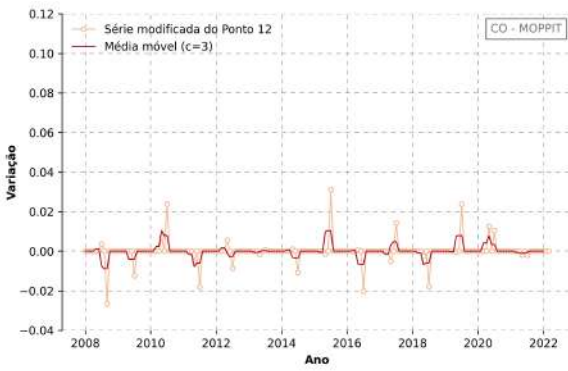
(i) Ponto 9



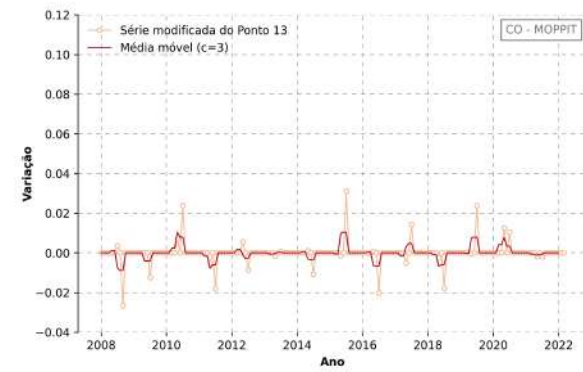
(j) Ponto 10



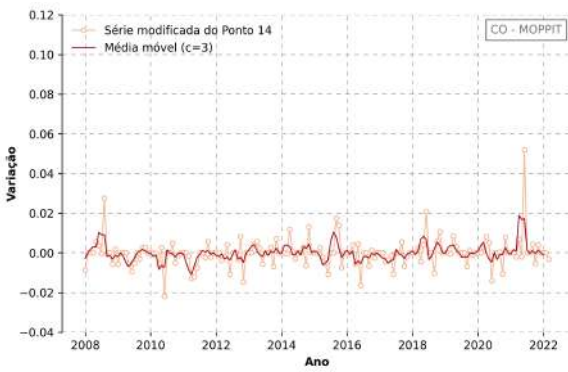
(k) Ponto 11



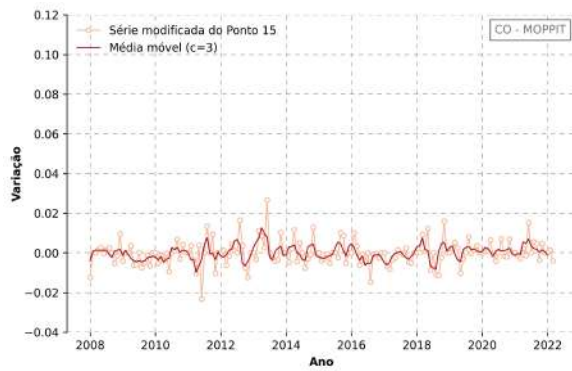
(l) Ponto 12



(m) Ponto 13



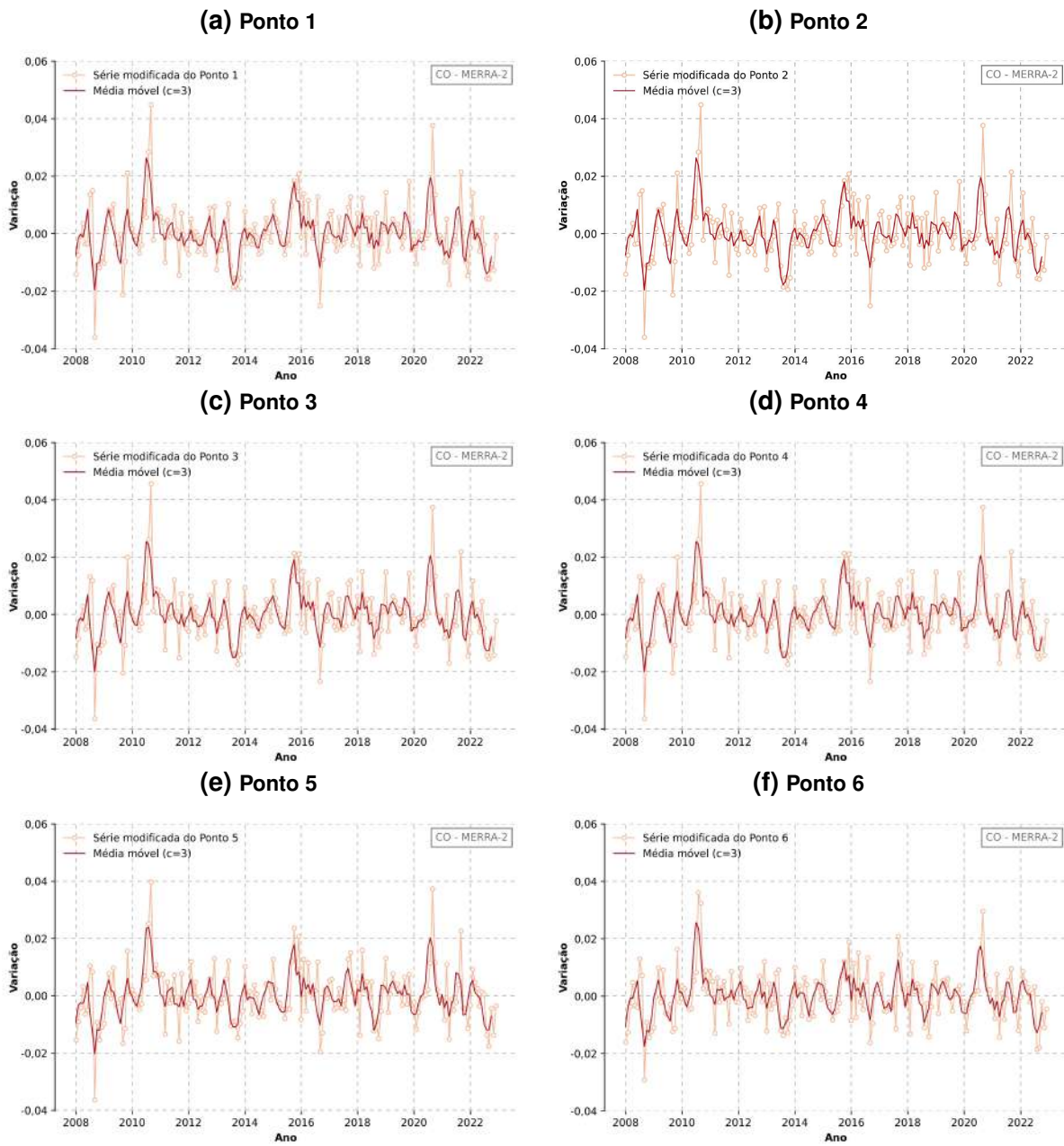
(n) Ponto 14

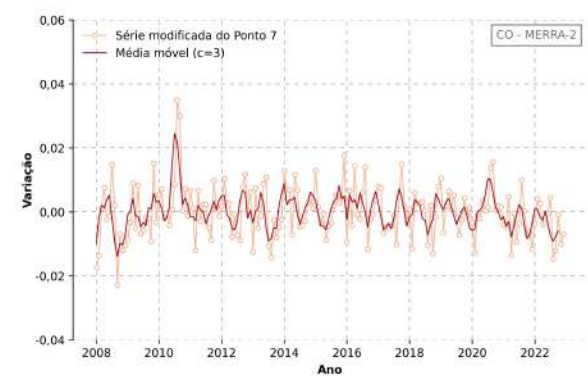


(o) Ponto 15

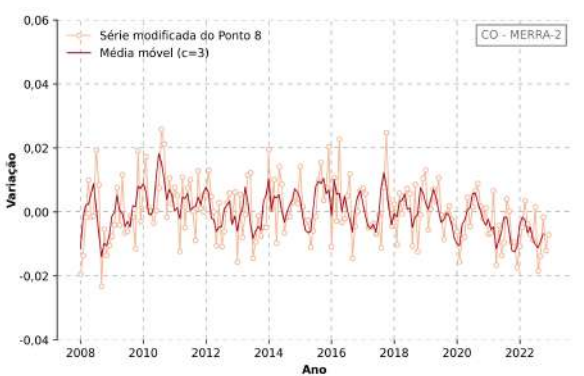
APÊNDICE T – GRÁFICOS DE SÉRIES HISTÓRICAS DE MONÓXIDO DE CARBONO (MERRA-2), PARA OS 15 PONTOS

Figura 91 – Séries históricas de Monóxido de Carbono - CO (MERRA-2)

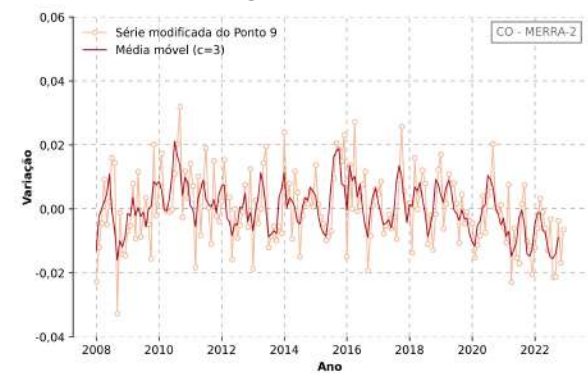




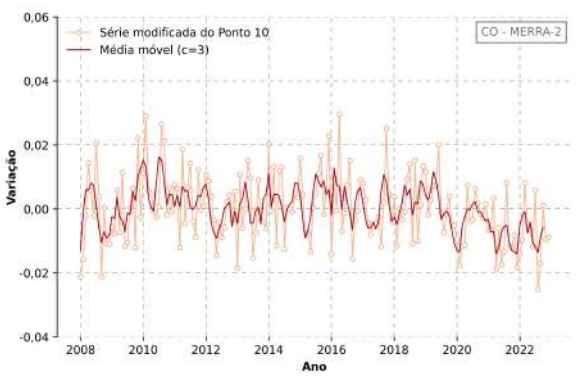
(g) Ponto 7



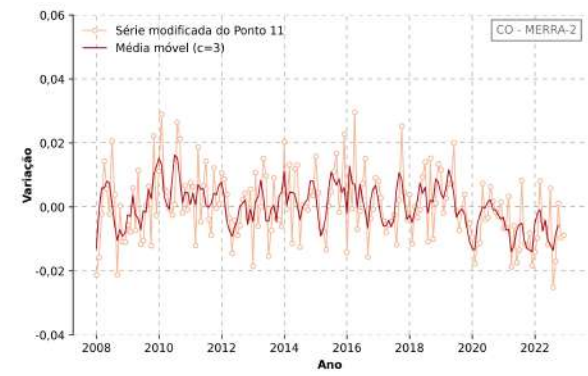
(h) Ponto 8



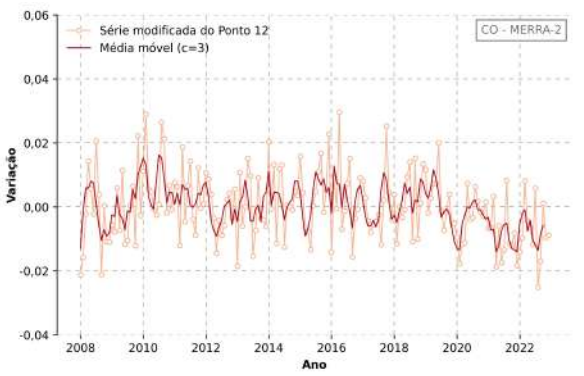
(i) Ponto 9



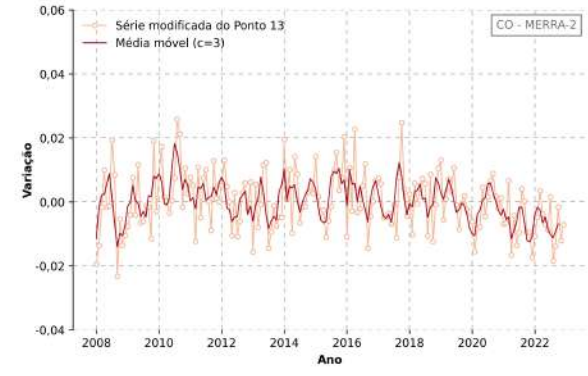
(j) Ponto 10



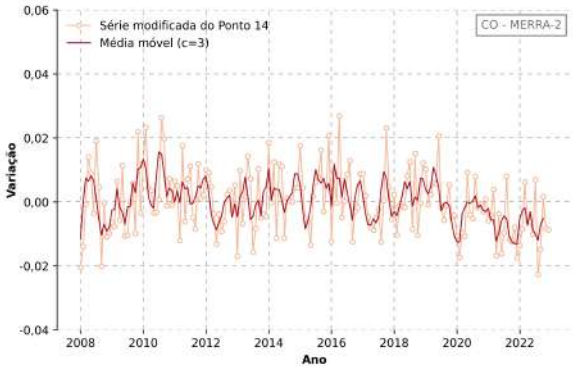
(k) Ponto 11



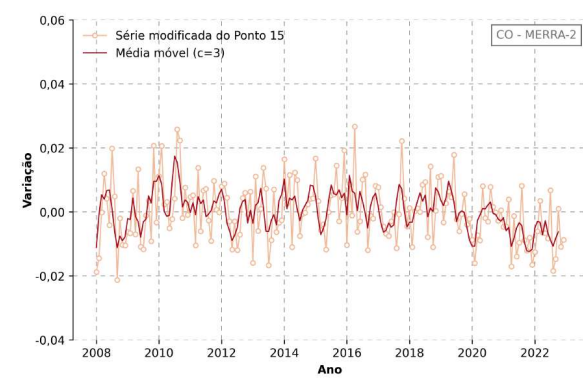
(l) Ponto 12



(m) Ponto 13



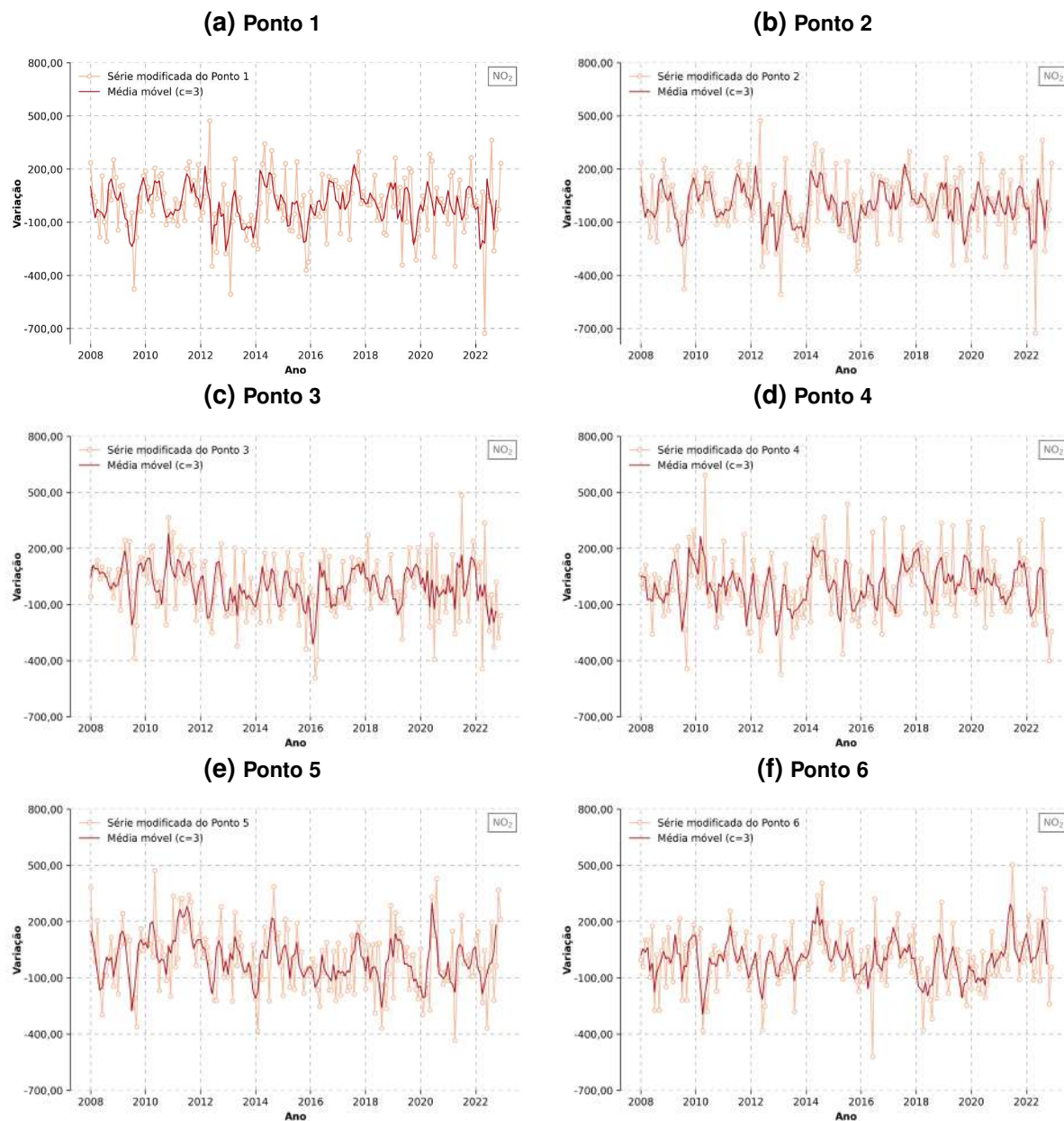
(n) Ponto 14

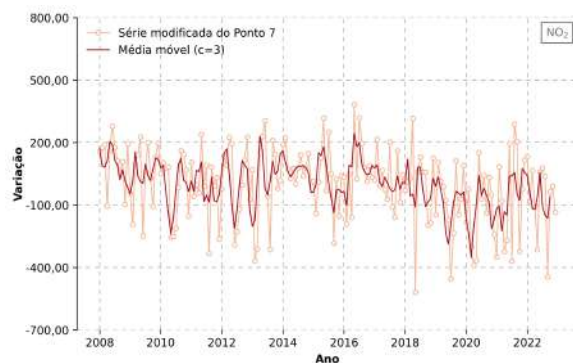


(o) Ponto 15

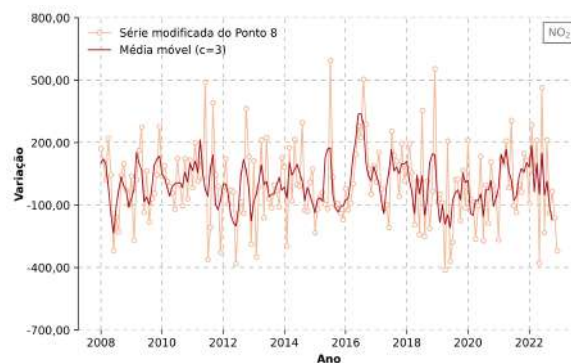
APÊNDICE U – GRÁFICOS DE SÉRIES HISTÓRICAS DE DIÓXIDO DE NITROGÊNIO - NO₂, PARA OS 15 PONTOS

Figura 92 – Séries históricas de Dióxido de Nitrogênio - NO₂

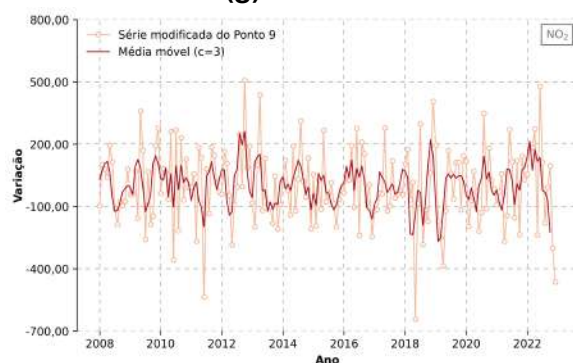




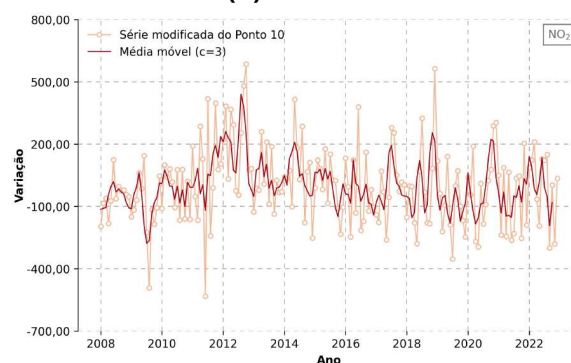
(g) Ponto 7



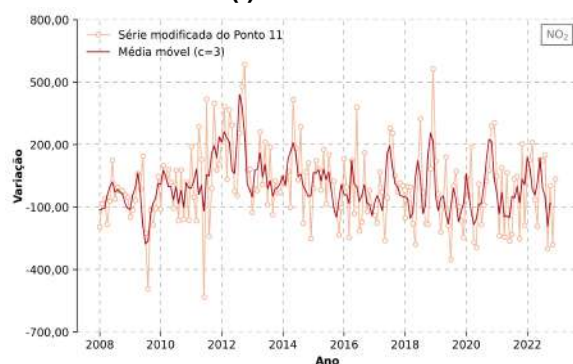
(h) Ponto 8



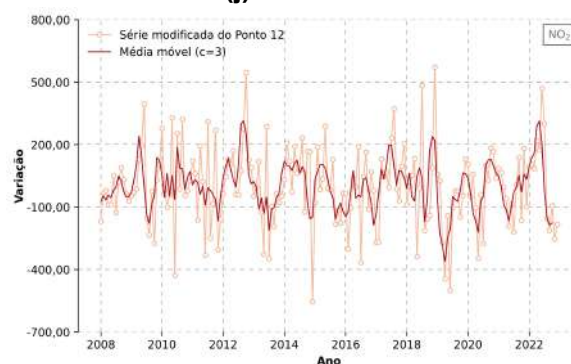
(i) Ponto 9



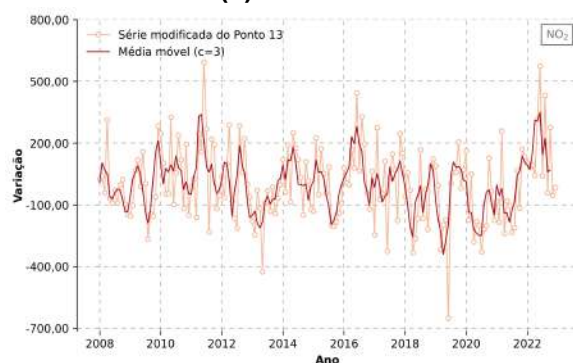
(j) Ponto 10



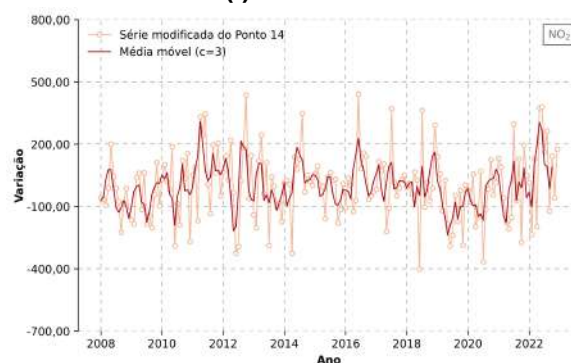
(k) Ponto 11



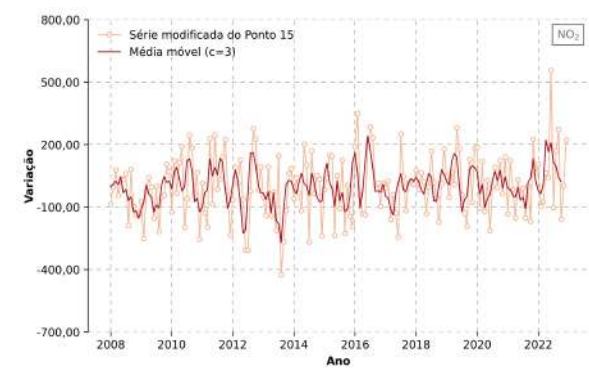
(l) Ponto 12



(m) Ponto 13



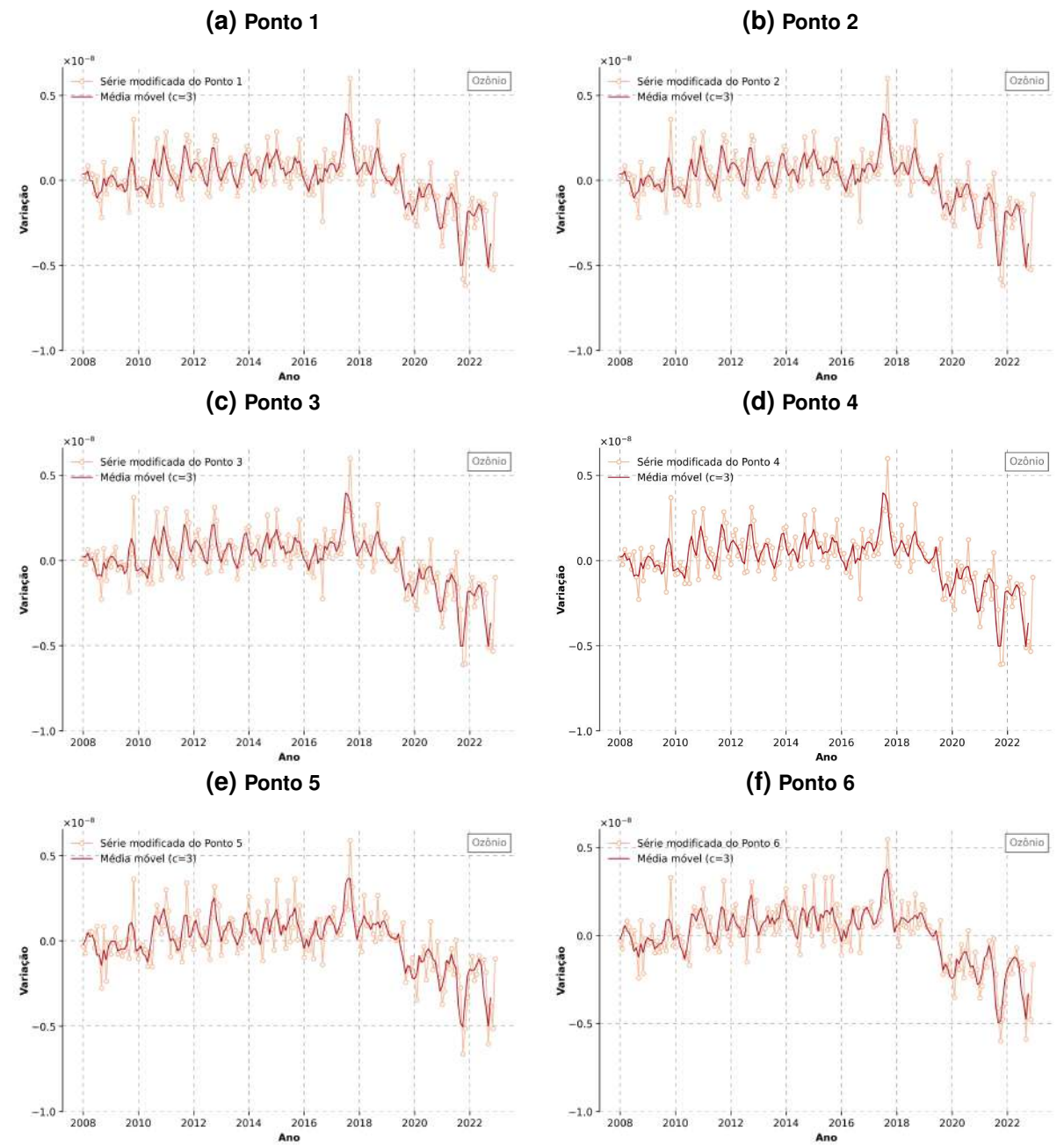
(n) Ponto 14

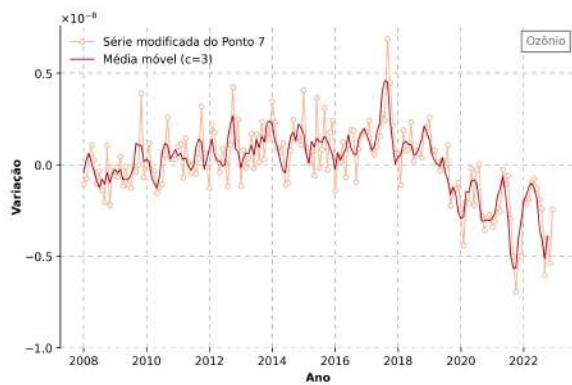


(o) Ponto 15

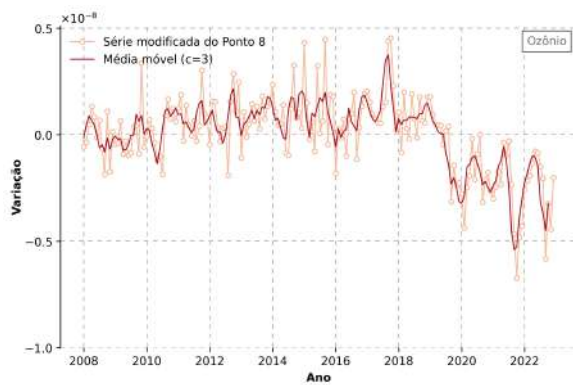
APÊNDICE V – GRÁFICOS DE SÉRIES HISTÓRICAS DE OZÔNIO - O₃, PARA OS 15 PONTOS

Figura 93 – Séries históricas de Ozônio - O₃

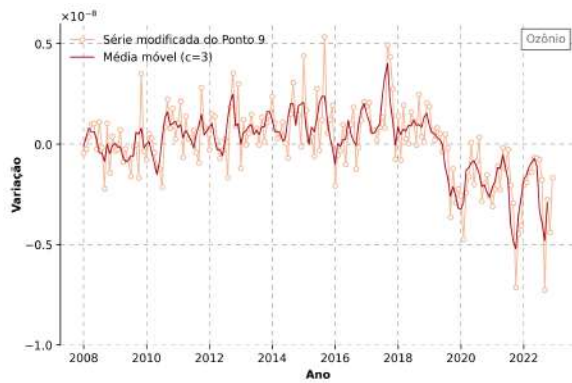




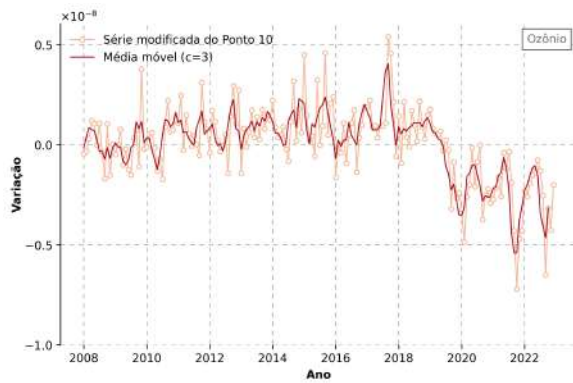
(g) Ponto 7



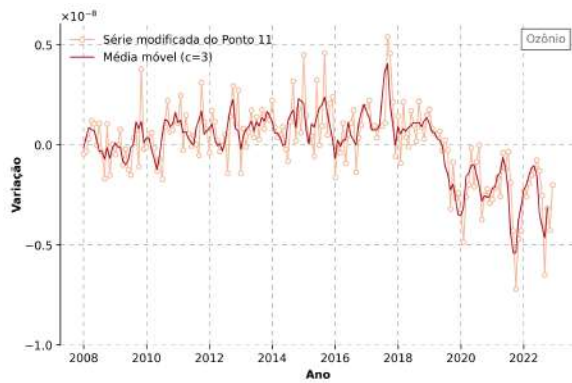
(h) Ponto 8



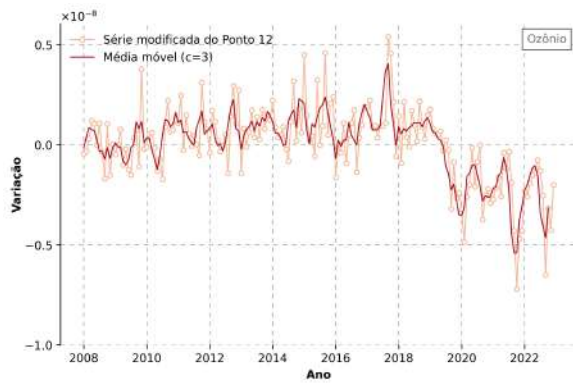
(i) Ponto 9



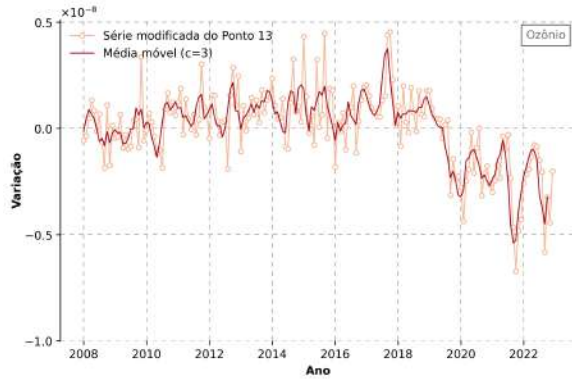
(j) Ponto 10



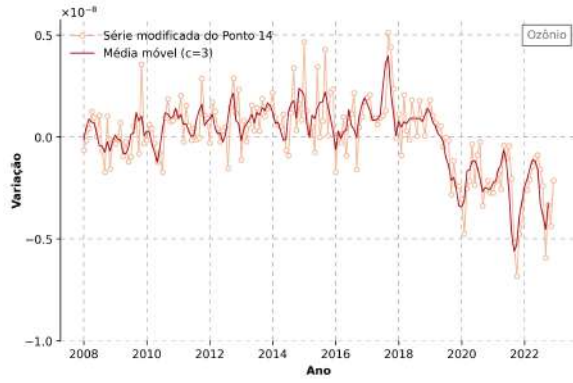
(k) Ponto 11



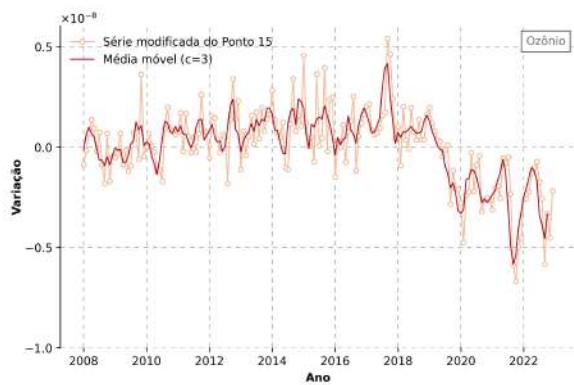
(l) Ponto 12



(m) Ponto 13



(n) Ponto 14



(o) Ponto 15

APÊNDICE W – COMO CONVERTER A CONCENTRAÇÃO DE NO₂ DE MOL/CM² PARA UG/M²

Passo a passo para a conversão da concentração de NO₂ de mol cm⁻² para μg m⁻².

- **Passo 1:** Dividir a concentração de 1 mol cm⁻² pela constante de Avogadro ($N_A = 6,022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$) para obter o número de moléculas por centímetro quadrado:

$$\frac{1 \text{ mol cm}^{-2}}{6,022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}} = \frac{\text{moléculas de NO}_2}{\text{cm}^2}$$

- **Passo 2:** Multiplicar pela massa molar do NO₂ (46,055 g mol⁻¹) para converter a quantidade de moléculas em massa:

$$\frac{\text{moléculas de NO}_2}{\text{cm}^2} \times 46,055 \text{ g mol}^{-1} = \text{massa em g cm}^{-2}$$

- **Passo 3:** Converter a massa de grama para micrograma, multiplicando por 10⁶:

$$\text{massa em g} \times 10^6 = \text{massa em } \mu\text{g}$$

- **Passo 4:** Converter de cm² para m², multiplicando por 10⁴:

$$\frac{\mu\text{g}}{\text{cm}^2} \times 10^4 = \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^2}$$

Equação Final

A equação completa para a conversão é:

$$\text{Concentração em } \mu\text{g/m}^2 = \left(\frac{1}{6,022 \times 10^{23}} \right) \times 46,055 \times 10^6 \times 10^4$$

Substituindo os valores:

$$\text{Concentração em } \mu\text{g/m}^2 = \frac{1 \times 46,055 \times 10^{10}}{6,022 \times 10^{23}}$$

Referência:

Li, C.; Managi, S. Estimating monthly global ground-level NO₂ concentrations using geographically weighted panel regression. Remote Sensing Of Environment, v. 280, p. 113152, out. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2022.113152>.

ANEXOS

ANEXO A – RESOLUÇÃO CONSEMA 98/2017 - ATIVIDADES NÍVEL G DE POLUIÇÃO DO AR

Lista das atividades potencialmente poluidoras do Anexo VI da Resolução CONSEMA nº 98/2017, atualizada até a Resolução CONSEMA nº 185/2021 que possuem um potencial poluidor do ar, nível G (Grande).

00 - Extração de Minerais

00.10.00 - Lavra a céu aberto com desmonte por explosivo.

00.10.01 - Lavra a céu aberto com desmonte por explosivo, se mineral típico de emprego na construção civil, independente de seu uso.

10 - Indústria de Produtos Minerais Não Metálicos

10.40.20 - Fabricação de material cerâmico esmaltado.

10.50.00 - Fabricação de cimento.

10.50.20 - Fabricação de peças, ornatos e estruturas de amianto.

11 - Indústria Metalúrgica

11.00.01 - Siderurgia e elaboração de produtos siderúrgicos com redução de minérios - inclusive ferro-gusa.

11.00.02 - Produção de ferro e aço e suas ligas em qualquer forma, sem redução de minério, com fusão.

11.00.06 - Produção de canos e tubos de ferro e aço, com fusão e tratamento químico superficial ou galvanotécnico.

11.00.09 - Produção de fundidos de ferro e aço em forno cubilot, sem tratamento químico superficial ou galvanotécnico.

11.00.10 - Produção de fundidos de ferro e aço em forno cubilot, com tratamento químico superficial ou galvanotécnico.

11.10.00 - Metalurgia dos metais não-ferrosos em formas primárias - inclusive metais preciosos.

11.11.01 - Produção de ligas de metais não-ferrosos em formas primárias - inclusive metais preciosos.

11.11.02 - Produção de laminados de metais e de ligas de metais não-ferrosos (placas, discos, chapas lisas ou corrugadas, bobinas, tiras e fitas, perfis, barras redondas, chatas ou quadradas, vergalhões), com fusão - exceto canos, tubos e arames.

11.11.04 - Produção de canos e tubos de metais não-ferrosos - inclusive ligas, com fusão e com tratamento químico superficial ou galvanotécnico.

11.11.05 - Produção de canos e tubos de metais não-ferrosos - inclusive ligas, com fusão e sem tratamento químico superficial ou galvanotécnico.

11.11.08 - Produção de formas, moldes e peças fundidas de metais não-ferrosos – inclusive ligas, em forno cubilot com tratamento químico superficial ou galvanotécnico.

11.11.09 - Produção de formas, moldes e peças fundidas de metais não-ferrosos – inclusive ligas, em forno cubilot sem tratamento químico superficial ou galvanotécnico.

11.11.12 - Produção de fios e arames de metais e de ligas de metais não-ferrosos – inclusive fios, cabos e condutores elétricos, com fusão.

11.20.00 - Metalurgia do pó - inclusive peças moldadas.

12 - Indústria Mecânica

12.10.00 - Fabricação de máquinas, aparelhos, peças e acessórios com tratamento químico superficial ou galvanotécnico ou fundição ou pintura por aspersão, ou esmaltação ou imersão.

13 - Indústria de Material Elétrico e Comunicações

13.10.00 - Fabricação de pilhas, baterias e acumuladores.

14 - Indústria de Material de Transporte

14.30.00 - Fabricação ou montagem de veículos rodoviários, aeroviários e navais.

17 - Indústria de Papel e Papelão

17.11.00 - Fabricação de celulose.

20 - Indústria Química

20.10.00 - Fabricação de produtos derivados do processamento do petróleo, de rochas oleígenas e do carvão mineral.

20.30.00 - Fabricação de adubos, fertilizantes e corretivos de solo.

20.60.00 - Fabricação de tintas, esmaltes, lacas, vernizes, impermeabilizantes, solventes e secantes.

20.70.00 - Produção de óleos, gorduras e ceras vegetais e animais, em bruto, de óleos de essências vegetais e outros produtos de destilação da madeira - exceto refinação de produtos alimentares.

20.70.10 - Recuperação e refino de solventes, óleos minerais, vegetais e animais.

22 - Indústria do Refino de Petróleo e Destilação do Alcool

22.21.00 - Refino do petróleo e produção de álcool por processamento de cana de

açúcar, mandioca, madeira e outros vegetais.

26 - Indústria de Produtos Alimentares

26.94.00 - Fabricação de rações balanceadas e de alimentos preparados para animais - inclusive farinhas de carne, sangue, osso, peixe e pena.

30 - Indústrias Diversas

30.20.00 - Usinas de produção de concreto asfáltico.

30.60.00 - Fabricação de carvão ativado e cardiff.

30.60.10 - Fabricação de carvão vegetal.

34 - Serviços de Infraestrutura

34.11.00 - Produção de energia termoeleétrica.

34.11.05 - Produção de energia termoeleétrica a partir de gás natural.

34.41.09 - Tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos com ou sem reaproveitamento energético.

34.41.11 - Tratamento térmico de resíduos de serviços de saúde.

47 - Transportes e Terminais

47.10.10 - Transporte rodoviário de produtos perigosos, resíduos perigosos ou rejeitos perigosos, exclusivamente no território catarinense.

47.82.01 - Aeroportos.

47.83.02 - Terminal de petróleo.

47.83.03 - Terminal de produtos químicos.

47.85.00 - Terminal ferroviário de carga.

71 - Atividades Diversas

71.21.10 - Loteamento com fins industriais e comerciais.

71.21.11 - Condomínio com fins industriais ou de serviços (multissetorial).

71.30.00 - Unidade de reciclagem de resíduos Classe I.

71.40.01 - Unidade de descaracterização, com ou sem descontaminação, com ou sem reciclagem de lâmpadas.

71.40.02 - Unidade móvel de tratamento de resíduos, sem que ocorra emissão de efluentes gasosos.

71.60.00 - Tratamento térmico de resíduos industriais, com ou sem aproveitamento energético.

71.60.03 - Disposição final de rejeitos Classe I, de qualquer origem.

71.60.07 - Unidade de mistura e pré-condicionamento de resíduos industriais Classe I e Classe IIA para fins de coprocessamento.

71.60.09 - Destinação final de rejeitos e efluentes, Classe I, oriundos de outros estados, em aterros, ou por incineração sem aproveitamento energético ou para tratamento de efluentes.

71.60.11 - Destinação final de rejeitos e efluentes, Classe IIA, oriundos de outros Estados, em aterros, ou por incineração sem aproveitamento energético ou para tratamento de efluentes.

71.90.02 - Crematórios.

OBSERVAÇÃO: Não foram utilizadas as atividades 47.10.10 e 71.40.02, por tratar-se de transporte e unidade móvel, respectivamente.