

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS FLORINÓPOLIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

Pedro Henrique Virgílio

**ANÁLISE TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS
E VIOLAÇÕES DOS PADRÕES DE QUALIDADE DO AR NO BRASIL**

Florianópolis

2025

Pedro Henrique Virgílio

**ANÁLISE TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS
E VIOLAÇÕES DOS PADRÕES DE QUALIDADE DO AR NO BRASIL**

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental do Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Hoinaski

Florianópolis

2025

Virgílio, Pedro Henrique
ANÁLISE TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES
ATMOSFÉRICOS E VIOLAÇÕES DOS PADRÕES DE QUALIDADE DO AR NO
BRASIL / Pedro Henrique Virgílio ; orientador, Leonardo
Hoinaski, 2024.
74 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro
Tecnológico, Graduação em Engenharia Sanitária e
Ambiental, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Qualidade do
Ar. 3. Monitoramento Atmosférico. 4. Tendência Temporal.
5. Sincronia de Eventos. I. Hoinaski, Leonardo. II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Engenharia Sanitária e Ambiental. III. Título.

Pedro Henrique Virgílio

ANÁLISE TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS E VIOLAÇÕES DOS PADRÕES DE QUALIDADE DO AR NO BRASIL

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental

Florianópolis, 13 de agosto de 2025.



Documento assinado digitalmente

Bruno Segalla Pizzolatti

Data: 20/08/2025 12:03:02-0300

CPF: ***.122.849-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Bruno Segalla Pizzolatti, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente

LEONARDO HOINASKI

Data: 20/08/2025 13:50:53-0300

CPF: ***.028.269-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Dr. Leonardo Hoinaski
Orientador(a)
Instituição UFSC

Camilo Bastos Ribeiro, Dr.
Avaliador
Instituição UFSC

Fábio Castagna da Silva, MSc.
Avaliador
Instituição UFSC

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Karina e Márcio, que me proporcionaram base forte para chegar aonde cheguei.

A Sarah, pelo apoio incondicional e por compreender minha ausência enquanto me dedicava a este trabalho.

Ao Prof. Leonardo Hoinaski pela mentoria e pelo auxílio no desenvolvimento deste trabalho e por trazer os dados e a programação para dentro da sala de aula.

Ao IEMA pela disponibilização pública e de fácil acesso dos dados utilizados no trabalho.

RESUMO

A ocorrência simultânea de violações dos padrões de qualidade do ar em diferentes estações de monitoramento pode ser reflexo de padrões comuns de emissões e influências sazonais diretas. Dessa forma, a investigação dos dados disponíveis através de métodos estatísticos de avaliação de tendências e sazonalidades das concentrações de poluentes e da análise da sincronicidade das violações desses poluentes ainda é pouco explorada no escopo nacional. O presente trabalho objetiva avaliar a sincronicidade e a variabilidade espaço-temporal das concentrações de poluentes na rede de monitoramento do Brasil. Utilizando dados organizados e oferecidos pelo Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA), o estudo analisa as tendências temporais das concentrações de $MP_{2,5}$, MP_{10} , O_3 , NO_2 , CO e SO_2 por meio do teste de Mann-Kendall, examina a sazonalidade dessas concentrações, quantificando-a com o Índice de Sazonalidade de Markham (MSI) e em seguida avalia as excedências dos padrões de qualidade do ar estabelecidos na CONAMA 506/2024 e investiga a sincronicidade das violações através de uma metodologia adaptada de estudos de eventos hidrológicos extremos. Os resultados obtidos revelaram padrões espaciais distintos: enquanto São Paulo e Rio de Janeiro apresentaram tendências de redução para $MP_{2,5}$ e MP_{10} , Bahia e Paraná registraram aumentos para esses poluentes. Identificou-se forte sazonalidade com altas de inverno, de junho a setembro, com picos claros acima das médias anuais para MP_{10} na região Sudeste. A análise de sincronicidade expôs clusters regionais extensos, com violações de CO em sincronia em raios de até 500 km no estado do Espírito Santo e 400 km em Minas Gerais, já O_3 atingiu 468 km na Bahia. Quanto aos níveis observados de poluentes em comparação com os padrões intermediários e final da legislação, $MP_{2,5}$ demonstra perspectiva de futuro crítica, com 80% das medições excedendo o padrão final da CONAMA 506/2024, exigindo ações céleres de redução de emissões.

Palavras-chave: Qualidade do Ar. Monitoramento Atmosférico. Tendência Temporal. Sincronia de Eventos.

ABSTRACT

The simultaneous occurrence of air quality standard violations at different monitoring stations may reflect common emission patterns and direct seasonal influences. However, the investigation of available data through statistical methods to assess trends and seasonality of pollutant concentrations, as well as the analysis of the synchronicity of these violations, remains little explored at the national level. This study aims to evaluate the synchronicity and spatio-temporal variability of pollutant concentrations within Brazil's monitoring network. Using data organized and provided by the Institute of Energy and Environment (IEMA), the study analyzes temporal trends of PM_{2.5}, PM₁₀, O₃, NO₂, CO, and SO₂ concentrations through the Mann-Kendall test, examines the seasonality of these concentrations quantified by the Markham Seasonality Index (MSI), and then evaluates exceedances of the air quality standards established in CONAMA 506/2024, investigating the synchronicity of violations through a methodology adapted from studies of extreme hydrological events. The results revealed distinct spatial patterns: while São Paulo and Rio de Janeiro showed decreasing trends for PM_{2.5} and PM₁₀, Bahia and Paraná registered increases for these pollutants. Strong seasonality was observed, with winter highs from June to September and clear peaks above annual averages for PM₁₀ in the Southeast region. The synchronicity analysis revealed extensive regional clusters, with CO violations occurring in synchrony within radii of up to 500 km in Espírito Santo and 400 km in Minas Gerais, while O₃ reached 468 km in Bahia. Regarding observed pollutant levels compared to the intermediate and final standards of the legislation, PM_{2.5} shows a critical outlook, with 80% of measurements exceeding the final standard of CONAMA 506/2024, highlighting the need for prompt emission reduction actions.

Keywords: Air Quality. Atmospheric Monitoring. Temporal Trends. Event Synchrony.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IEMA - Instituto de Energia e Meio Ambiente

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

LCQAr - Laboratório de Controle da Qualidade do Ar

MP_{2,5} - Material Particulado com diâmetro $\leq 2,5 \mu\text{m}$

MP₁₀ - Material Particulado com diâmetro $\leq 10 \mu\text{m}$

O₃ - Ozônio

NO₂ - Dióxido de Nitrogênio

CO - Monóxido de Carbono

SO₂ - Dióxido de Enxofre

UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina

OMS - Organização Mundial da Saúde

MSI - Índice de Sazonalidade de Markham

SC - Escala de Sincronia

PI-1 a PI-4 - Padrões Intermediários 1 a 4 da CONAMA 506/2024

PF - Padrão Final da CONAMA 506/2024

MMA - Ministério do Meio Ambiente

UF – Unidade da Federação

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Tabela de limites CONAMA 506/2024 | 6 |
| Figura 2 - Períodos nos quais pelo menos 25% das estações apresentam dados..... | 12 |
| Figura 3 - Períodos nos quais pelo menos 50% das estações apresentam dados..... | 12 |
| Figura 4 - Limites PI-1 a 4 e PF | 13 |
| Figura 5 - Tendências das concentrações de poluentes por estado..... | 18 |
| Figura 6 - Tendências por estado para cada poluente..... | 20 |
| Figura 7 - Concentrações mensais de CO por estado | 22 |
| Figura 8 - Concentrações mensais de MP _{2,5} por estado..... | 23 |
| Figura 9 - Concentrações mensais de MP ₁₀ por estado | 25 |
| Figura 10 - Concentrações mensais de NO ₂ por estado..... | 26 |
| Figura 11 - Concentrações mensais de O ₃ por estado | 27 |
| Figura 12 - Índice de Markham por estado para cada poluente..... | 28 |
| Figura 13 - Violações de CO frente padrões CONAMA..... | 30 |
| Figura 14 - Violações de MP _{2,5} frente padrões CONAMA..... | 31 |
| Figura 15 - Violações de MP ₁₀ frente padrões CONAMA..... | 32 |
| Figura 16 - Violações de NO ₂ frente padrões CONAMA..... | 33 |
| Figura 17 - Violações de O ₃ frente padrões CONAMA..... | 34 |
| Figura 18 - Violações de SO ₂ frente padrões CONAMA..... | 35 |
| Figura 19 - Taxas de violação de cada poluente por padrão | 36 |
| Figura 20 - Sincronicidade de estações de cada poluente por estado (km) | 37 |
| Figura 21 - Mapa de sincronicidade de O ₃ no Brasil..... | 38 |
| Figura 22 - Mapa de sincronicidade de CO no Brasil | 39 |
| Figura 23 - Mapa de sincronicidade de CO em RJ, MG, BA e ES | 40 |
| Figura 24 - Mapa de sincronicidade de NO ₂ em MG, SP e RJ..... | 41 |
| Figura 25 - Mapa de sincronicidade de O ₃ em todos os estados | 42 |
| Figura B - 1 - Estações com maiores taxas de violação para SO ₂ no padrão PI-2 | 50 |
| Figura B - 2 - Estações com maiores taxas de violação para MP _{2,5} no padrão PI-2..... | 50 |
| Figura B - 3 - Estações com maiores taxas de violação para MP _{2,5} no padrão PF | 51 |
| Figura C - 1 - Sincronicidade de MP ₁₀ por estado..... | 60 |
| Figura C - 2 - Sincronicidade O ₃ por estado..... | 61 |

| | |
|---|----|
| Figura C - 3 - Sincronicidade de SO ₂ por estado..... | 62 |
| Figura C - 4 - Sincronicidade de MP _{2,5} por estado | 63 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela B - 1 - Inclinação, p-valor e dias com dados de cada estação para SO ₂ | 51 |
| Tabela B - 2 - Inclinação, p-valor e dias com dados de cada estação para O ₃ | 52 |
| Tabela B - 3 - Inclinação, p-valor e dias com dados de cada estação para NO ₂ | 54 |
| Tabela B - 4 - Inclinação, p-valor e dias com dados de cada estação para MP _{2,5} | 55 |
| Tabela B - 5 - Inclinação, p-valor e dias com dados de cada estação para MP ₁₀ | 56 |
| Tabela B - 6 - Inclinação, p-valor e dias com dados de cada estação para CO | 58 |

SUMÁRIO

| | | |
|------------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 | Objetivos..... | 3 |
| 1.1.1 | Objetivo Geral | 3 |
| 1.1.2 | Objetivos Específicos | 3 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 4 |
| 2.1 | Qualidade do ar e poluentes atmosféricos regulados no Brasil..... | 4 |
| 2.1.1 | Rede de monitoramento da qualidade do ar Brasileira | 4 |
| 2.1.2 | Padrões de qualidade do ar – Conama 506/2024..... | 5 |
| 2.1.3 | Análise de tendência e sazonalidade das concentrações de poluentes | 6 |
| 2.2 | Relevância dos fatores meteorológicos para a dinâmica da qualidade do ar... 8 | |
| 2.3 | Sincronicidade em séries temporais ambientais | 9 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 11 |
| 3.1 | Dados utilizados | 11 |
| 3.1.1 | Dados de qualidade do ar (IEMA)..... | 11 |
| 3.2 | Período de cobertura dos dados | 12 |
| 3.3 | Padronização e preparação dos dados..... | 12 |
| 3.4 | Classificação de eventos de violação dos padrões | 13 |
| 3.5 | Análise dos dados..... | 13 |
| 3.5.1 | Análise de tendências | 13 |
| 3.5.2 | Avaliação de sazonalidade..... | 14 |
| 3.6 | Avaliação de sincronicidade entre estações | 14 |
| 3.7 | Ferramentas e bibliotecas utilizadas..... | 15 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 17 |
| 4.1 | Tendência nas concentrações de poluentes..... | 17 |
| 4.2 | Sazonalidade das concentrações de poluentes..... | 21 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| 4.3 | Análise de sincronicidade entre estações | 30 |
| 4.3.1 | Frequência e espacialização das violações | 30 |
| 4.3.2 | Análise de sincronicidade entre estações..... | 36 |
| 5 | CONCLUSÕES..... | 43 |
| 5.1 | Contribuições do estudo | 44 |
| 5.2 | Limitações..... | 44 |
| 6 | REFERÊNCIAS..... | 46 |
| | APÊNDICE A – Scripts em Python utilizados para realizar o tratamento, organização, modelagem, plotagem e cálculos realizados com os dados. | 49 |
| | APÊNDICE B – Figuras e tabelas de estatísticas descritivas complementares às análises realizadas | 50 |
| | APÊNDICE C – Mapas de concentração, tendência, violações e sincronicidade dos poluentes com diferentes focos..... | 60 |

1 INTRODUÇÃO

A qualidade do ar é um fator crítico para a saúde pública e para a integridade ambiental. Estudos demonstram que poluentes de qualidade do ar como o material particulado ($MP_{2,5}$ e MP_{10}) estão relacionados ao aumento de doenças respiratórias e cardiovasculares em cidades brasileiras (Nardocci et al., 2013; Requia et al., 2022). Também se sabe que altas concentrações de Ozônio (O_3) podem ser responsáveis por danos à vegetação, podendo resultar em perdas agrícolas por necrose nas plantas (Emberson et al., 2018) enquanto a deposição de nitrogênio pode alterar a química dos solos e contribuir para a eutrofização de corpos hídricos (Furtado, et al., 2019).

Apesar dos avanços nas regulamentações, como a Resolução CONAMA 506/2024, o sistema de monitoramento brasileiro ainda enfrenta grandes problemas. Embora o número de estações ativas tenha apresentado um crescimento no último ano, a distribuição geográfica dessas estações é bastante desigual, com mais de 70% das estações de referência concentradas na região Sudeste e cobertura mínima, ou inexistente, nos estados da região Norte e Nordeste, onde apenas 3 estações de referência foram identificadas na Região Norte (MMA, 2024). Estudos em regiões metropolitanas, como Curitiba e São Paulo, apontam padrões variados de tendência dos poluentes. Em Curitiba, observam-se reduções significativas em SO_2 , NO_2 , NO_x , CO e MP_{10} , atribuídas a políticas de controle de emissões industriais e veiculares (Krecl et al., 2024). Em São Paulo, embora estudos anteriores como Carvalho et al. (2015) e, em parte, Gómez Peláez et al. (2020) tenham apontado reduções em diversos poluentes, incluindo o material particulado, é importante notar que o próprio estudo de Gómez Peláez et al. (2020), em outro trecho, sugere um aumento da concentração de $MP_{2,5}$ em São Paulo. Análises mais recentes de Boari et al. (2023) indicam uma tendência crescente de $MP_{2,5}$ em estações específicas e que incluem terminais de ônibus. Boari et al. (2023) atribuem a divergência de resultados à sua metodologia mais robusta (o teste de Mann-Kendall), em contraste com as análises de regressão linear utilizadas nos outros estudos, o que evidencia a importância de metodologias robustas e da consideração de fatores locais.

Apesar dos avanços regionais quanto a pesquisa sobre poluentes atmosféricos, faltam estudos que integrem três dimensões essenciais para um mapeamento completo em escala nacional, sendo elas: a análise de tendências temporais das concentrações dos poluentes; os

padrões sazonais associados a essas concentrações; e a sincronicidade das violações dos padrões considerando um cenário macro do país, onde as estações de diferentes regiões podem interagir entre si. Atualmente, estudos como o de Krecl et al. (2024) e Boari et al. (2023), abrangem o conteúdo, porém com foco em regiões específicas, deixando em aberto a lacuna crítica que é o estudo em escala nacional.

A grande importância de análises estatísticas dos parâmetros de qualidade do ar a nível nacional no Brasil se dá pela dimensão continental do país, com alta diversidade de regimes climáticos, fontes diversas de poluentes e elevada diversidade socioeconômica e, conseqüentemente, com presença de aspectos de vulnerabilidade social. Dessa forma, o trabalho objetiva auxiliar na identificação de áreas críticas e de atenção, servir de base para revisão e implementação de políticas públicas relacionadas a qualidade do ar e servir de ponto de partida para estudos que venham a considerar a influência das regiões umas sobre as outras quanto a qualidade do ar.

1.1 Objetivos

Nas seções abaixo estão descritos o objetivo geral e os objetivos específicos deste TCC.

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar as tendências, a variabilidade espaço-temporal e a sincronicidade das concentrações de poluentes analisadas na rede de monitoramento do Brasil.

1.1.2 Objetivos Específicos

1. Analisar as tendências nas concentrações de MP_{2,5}, MP₁₀, O₃, NO₂, CO e SO₂ entre os anos de 2015 e 2022.
2. Analisar a sazonalidade das concentrações MP_{2,5}, MP₁₀, O₃, NO₂, CO e SO₂.
3. Avaliar a sincronicidade das violações de MP_{2,5}, MP₁₀, O₃, NO₂, CO e SO₂ frente aos padrões de qualidade do ar.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Qualidade do ar e poluentes atmosféricos regulados no Brasil

2.1.1 Rede de monitoramento da qualidade do ar Brasileira

Dentre os anos de 2023 e 2024, segundo o Relatório Anual de Acompanhamento da Qualidade do Ar, a rede brasileira de monitoramento cresceu um total de 84 estações, representando um aumento de 154% no total de estações indicativas e 7,5% de aumento nas estações referência. É observada uma desigualdade acentuada na distribuição dessas estações, havendo uma grande concentração de estações de referência na região Sudeste (77,9% do total) em comparação com a cobertura mínima de estados da região Norte/Nordeste, contando com apenas 3 estações de referência (MMA, 2024).

Apesar do crescimento da rede de monitoramento, apenas 0,22% do território nacional conta com cobertura das estações de referência, concentradas principalmente nas áreas urbanas, onde há cobertura de 38,8%. As estações de referência (ou equivalentes a) são as estações que atendem ao Guia Técnico do MMA, e estas têm sua distribuição predominantemente nas regiões Sul e Sudeste do país. Já as estações indicativas, são as estações utilizadas para fins exploratórios, geralmente provenientes da iniciativa privada, e são consideradas de menor confiabilidade, pois estão sujeitas à calibração e operação inadequadas (MMA, 2024).

Atualmente há a perspectiva de um crescimento significativo para a rede de monitoramento brasileira até a elaboração do próximo relatório anual, estando prevista a adição de pelo menos mais 39 estações de referência e de 140 estações indicativas, dentre novas instalações e reativações de estações. Esse aumento previsto é baseado nas informações provenientes de Unidades da Federação (UFs) com projetos ativos ou previsões declaradas de instalações de novas estações (MMA, 2024).

2.1.2 Padrões de qualidade do ar – Conama 506/2024

A resolução CONAMA n° 506, publicada em 2024, estabelece um regime progressivo em cinco etapas para a redução dos limites de emissões atmosféricas, com padrões intermediários (fases I-IV) e um padrão final (fase V). A efetividade desta regulamentação está vinculada à capacidade operacional da rede nacional de monitoramento da qualidade do ar, coordenada pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA). Conforme Relatório Anual (MMA, 2024), a rede possui 479 estações de monitoramento de qualidade do ar, das quais 385 utilizam o método de referência ou equivalente ao mesmo e, destas, 359 foram consideradas ativas no ano de 2024.

Quanto as estações que utilizam o método de referência e são consideradas ativas, a má distribuição dessas estações no território brasileiro, a pouca cobertura territorial na maioria dos estados e a inconstância dos dados monitorados prejudica a realização de diagnósticos representativos de partes do território. Resultados da avaliação de completude dos dados indicam que alguns poucos estados, como São Paulo e Minas Gerais, contam com um índice alto de cobertura e de completude dos dados, por volta de 80%, enquanto Estados como Ceará, Pará e Mato Grosso acabam apresentando menor completude, sendo reflexo da densidade de estações presentes em cada um deles (MMA, 2024).

O sistema de transição apresentado, contando com padrões intermediários e final, também foi apresentado na Resolução Conama 491/2018, anteriormente vigente. Essa proposta pode permitir um avanço gradativo e mais realista a entidades poluidoras com menos aporte financeiro e/ou estrutural para aferição e mitigação de suas emissões, sem renunciar a um avanço constante para um ideal de qualidade do ar.

Abaixo segue a tabela referência para os limites dos parâmetros regulamentados em cada uma das etapas, publicada no Diário Oficial da União juntamente com a resolução:

| Poluente Atmosférico | Período de Referência | PI-1 | PI-2 | PI-3 | PI-4 | PF | |
|---|-----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----|
| | | µg/m ³ | µg/m ³ | µg/m ³ | µg/m ³ | µg/m ³ | ppm |
| Material Particulado - MP10 | 24 horas | 120 | 100 | 75 | 50 | 45 | - |
| | Anual ¹ | 40 | 35 | 30 | 20 | 15 | - |
| Material Particulado - MP2,5 | 24 horas | 60 | 50 | 37 | 25 | 15 | - |
| | Anual ¹ | 20 | 17 | 15 | 10 | 5 | - |
| Dióxido de Enxofre - SO ₂ | 24 horas | 125 | 50 | 40 | 40 | 40 | - |
| | Anual ¹ | 40 | 30 | 20 | 20 | 20 | - |
| Dióxido de Nitrogênio - NO ₂ | 1 hora ² | 260 | 240 | 220 | 200 | 200 | - |
| | Anual ¹ | 60 | 50 | 45 | 40 | 10 | - |
| Ozônio - O ₃ | 8 horas ³ | 140 | 130 | 120 | 100 | 100 | - |
| Fumaça | 24 horas | 120 | 100 | 75 | 50 | 45 | - |
| | Anual ¹ | 40 | 35 | 30 | 20 | 15 | - |
| Monóxido de Carbono - CO | 8 horas ³ | - | - | - | - | - | 9 |
| Partículas Totais em Suspensão - PTS | 24 horas | - | - | - | - | 240 | - |
| | Anual ⁴ | - | - | - | - | 80 | - |
| Chumbo - Pb ⁵ | Anual ¹ | - | - | - | - | 0,5 | - |
| 1 - média aritmética anual | | | | | | | |
| 2 - máxima média horária obtida no dia | | | | | | | |
| 3 - máxima média móvel obtida no dia | | | | | | | |
| 4 - média geométrica anual | | | | | | | |
| 5 - medido nas partículas totais em suspensão | | | | | | | |

Figura 1 - Tabela de limites CONAMA 506/2024

Os limites estabelecidos pela legislação, para cada período, servem de base para o desenvolvimento do trabalho, pois caracterizam as violações a serem utilizadas como referência normativa para a construção das séries binárias analisadas quanto à sincronicidade espaço-temporal.

2.1.3 Análise de tendência e sazonalidade das concentrações de poluentes

A qualidade do ar é um importante indicador de saúde ambiental, sendo impactado principalmente pela liberação de poluentes, mas também sendo influenciado pelas dinâmicas atmosféricas atuantes nas regiões de liberação e que afetam diretamente sua dispersão. No Brasil, os limites de concentrações de poluentes que influenciam a qualidade do ar são regulamentados pelas normativas estabelecidas pelo Conselho nacional do Meio Ambiente (CONAMA), que definem os padrões para a concentração de poluentes atmosféricos considerados, em conjunto, como componentes do índice da qualidade do ar.

A Resolução de nº 506/2024 do CONAMA, atualmente em vigor, estabelece os limites dos poluentes considerados de principal relevância para a qualidade do ar. Na resolução,

constam cinco diferentes faixas de monitoramento, sendo quatro delas de padrões de referência intermediários, gradativamente mais restritivos, e um padrão final. Estes, devem ser adotados em marcos pré-estabelecidos até que se atinja o PI-4, no ano de 2044, com último padrão rumo aos valores idealizados pela Organização Mundial da Saúde (OMS) em 2021.

Embora a normativa seja clara quanto a perspectiva de limites admissíveis de emissão de poluentes, a avaliação da qualidade do ar no Brasil ainda não é ideal, apresentando falhas quanto a cobertura espacial das estações de monitoramento, quanto a disponibilidade de séries históricas consistentes e representativas de todo o território nacional e quanto a escassez de estudos que integram análises estatísticas e de sincronicidade das violações num panorama nacional.

Estudos como o de Krecl et al (2024), sobre a variabilidade espaço-temporal de poluentes do ar na região metropolitana da cidade de Curitiba, observam tendências anuais significativas de redução para SO_2 , NO_2 , NO_x , CO e MP_{10} . Estes achados sugerem o sucesso dos programas de redução de emissões implementados nos setores de transporte rodoviário e industrial da cidade. Além disso, o estudo nota que, em Curitiba, as concentrações de O_3 aumentaram, provavelmente devido à redução de emissões de NO_x sem controle concomitante de compostos orgânicos voláteis, bem como ao transporte regional de O_3 . Estes resultados evidenciam a importância do monitoramento contínuo e das análises estatísticas tanto para a elaboração quanto para a avaliação de eficácia de políticas de controle de emissões.

O estudo de Boari et al. (2023) abordou as tendências de poluentes em diversas zonas altamente urbanizadas, como São Paulo, Rio de Janeiro, Espírito Santo e Minas Gerais. Os autores observaram que, embora tendências de redução nas concentrações de $\text{MP}_{2,5}$ tenham sido calculadas em algumas estações, em concordância com os achados de Gómez Peláez et al. (2020), outras estações em São Paulo, SP16 e SP17, que incluem terminais de ônibus, apresentaram tendências crescentes para o $\text{MP}_{2,5}$. Esta divergência de resultados nas tendências é atribuída por Boari et al. (2023) à sua metodologia mais robusta, o teste de Mann-Kendall, em contraste com a análise de regressão linear utilizada por Gómez Peláez et al. (2020).

Estudos como os supracitados fornecem uma visão completa do cenário da qualidade do ar, porém voltada a regiões específicas. Dessa forma, a elaboração de estudos de tendência e sincronia de violações com um escopo mais amplo se faz necessária para um melhor embasamento de políticas e ações a nível nacional ou regional.

A integração entre os limites legais estabelecidos e a análise estatística de séries temporais pode auxiliar na identificação de áreas de maior vulnerabilidade, assim como na compreensão dos mecanismos que favorecem ou dificultam a dispersão ou concentração de poluentes na atmosfera. Dessa forma, a análise proposta se insere num contexto de fortalecimento do conteúdo base para avaliação de qualidade do ar no Brasil, contribuindo com subsídios técnicos para ações de controle e gestão ambiental.

2.2 Relevância dos fatores meteorológicos para a dinâmica da qualidade do ar

As condições meteorológicas exercem influência decisiva na dinâmica dos poluentes atmosféricos, regulando processos de dispersão, transporte, transformação química e acumulação (Krecl et al., 2024; Ibarra-Espinosa et al., 2022). Essa modulação ocorre através de parâmetros como precipitação, vento, temperatura e umidade, que coletivamente definem os padrões espaço-temporais da qualidade do ar. Compreender tais interações é fundamental para interpretar tanto variações sazonais quanto eventos sincrônicos de poluição entre estações de monitoramento (Alvarez et al., 2018; Krecl et al., 2024).

A precipitação atua como mecanismo de depuração atmosférica, reduzindo concentrações de material particulado mediante deposição úmida e inibindo a ressuspensão de poeira (Monte et al., 2016; Santos et al., 2019). Ventos fortes favorecem a dispersão de poluentes, enquanto ventos calmos ou de baixa intensidade tendem a promover sua acumulação, especialmente quando associados a condições de baixa umidade (Monte et al., 2016; Ibarra-Espinosa et al., 2022). A direção dos ventos, por sua vez, determina o transporte de massas de ar entre regiões (Santos et al., 2019). Temperatura e umidade relativa influenciam reações químicas críticas, como a formação de ozônio sob alta radiação solar (Krecl et al., 2024), e facilitam a ocorrência de inversões térmicas que confinam poluentes em camadas atmosféricas inferiores (Lin et al., 2025).

Essa dinâmica manifesta-se sazonalmente: períodos secos, como o inverno, frequentemente concentram as piores condições de qualidade do ar devido à redução na altura da camada limite planetária, menor atividade convectiva e maior propensão a inversões térmicas (Ibarra-Espinosa et al., 2022; Krecl et al., 2024). Em contraste, estações chuvosas apresentam melhores índices, impulsionados pela maior precipitação e turbulência atmosférica

(Monte et al., 2016; Krecl et al., 2024). Essa ciclicidade climática estabelece padrões recorrentes de violações de padrões de qualidade do ar (Boari et al., 2023).

Crucialmente, eventos meteorológicos de larga escala – como sistemas frontais, zonas de convergência ou massas de ar persistentes – homogeneízam condições atmosféricas sobre extensas áreas geográficas (Chaffe & Chagas, 2020). Essa uniformização pode induzir a ocorrência simultânea de episódios críticos de poluição em múltiplas estações de monitoramento, mesmo distantes entre si. Assim, a sincronicidade nas violações de padrões decorre principalmente da atuação coordenada desses fenômenos regionais, que sincronizam mecanismos de dispersão ou estagnação de poluentes (Bezak et al., 2021; Chaffe & Chagas, 2020).

Dessa forma, a interação entre emissões atmosféricas e variáveis meteorológicas constitui importante aspecto da análise de tendências sazonais e, sobretudo, para a investigação da sincronicidade de violações entre estações que será realizada neste trabalho.

2.3 Sincronicidade em séries temporais ambientais

A sincronicidade em séries temporais ambientais refere-se à ocorrência simultânea com correlação estatisticamente relevante de eventos em diferentes pontos geográficos, indicando a influência direta de eventos em escala regional ou global atuando no meio. No contexto de qualidade do ar, a análise de sincronicidade das violações dos padrões regulatórios pode permitir identificar fenômenos atmosféricos que atuam como influenciadores de episódios críticos de violação.

O método utilizado para a o cálculo da sincronia entre eventos de violação de estações medindo o mesmo poluente foi introduzido por Berghuijs et al (2019) para caracterizar a extensão espacial da sincronia de cheias, sendo definida a escala de sincronia como a distância máxima de uma estação de referência na qual pelo menos 50% das estações vizinhas apresentam registros do evento em questão dentro de uma janela temporal definida (originalmente sete dias).

Adaptações do método de Berghuijs et al (2019) foram feitas, como no estudo de Xu et al (2024) sobre o aumento no risco de cheias na bacia hidrográfica do rio Yangtze, na China, sendo observados os picos de cheia ocorrendo em períodos diferentes nas regiões suul e norte

da bacia. No estudo em questão o método foi aplicado para sincronia de cheias, frequência de chuva máxima anual e máxima umidade do solo anual.

No estudo realizado por Bezak (2021), foi calculada a escala de sincronia dos eventos de erosão do solo causados pela água. O estudo aplicou o método de Berghuijs et al (2019) e, com ele, foi obtida uma sincronia de cerca de 100km na Europa. Segundo os resultados, regiões montanhosas e litorâneas apresentaram escalas menores, atribuídas a maior variabilidade local. Já em áreas planas e extensas a sincronia apresentada foi maior. O mapeamento proporcionado pelo uso do método se mostrou fundamental para a criação de estratégias de mitigação da erosão.

Estudos hidrológicos, como o de Chaffe e Chagas (2021), posteriormente, fizeram o uso do método no Brasil. Aplicando-o a 897 estações brasileiras, foram obtidas escalas médias de até 250km com correlações positivas entre magnitude e extensão espacial. Essa abordagem é adaptável à fenômenos de qualidade do ar, de forma que as violações de cada poluente podem ser tratadas como eventos binários de violação ou de não violação, permitindo mapear clusters de excedências sincronizadas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Dados utilizados

Para a concepção deste trabalho, foi utilizada majoritariamente a base de dados organizada pelo Instituto de Energia e Meio Ambiente, IEMA, responsável pela disponibilização dos dados de estações de monitoramento de qualidade do ar consideradas de referência ou equivalentes mantidas por órgãos estaduais e municipais do Brasil. Como auxílio, foi utilizada uma planilha disponibilizada pelo LCQAr com uma relação de coordenadas geográficas de cada uma das estações de monitoramento e que também teve origem do site do IEMA.

3.1.1 Dados de qualidade do ar (IEMA)

Os dados de qualidade de ar, disponibilizados pelo Instituto de Energia e Meio Ambiente, encontram-se no site do IEMA (IEMA, 2025) e possuem registros horários das concentrações de MP_{2,5}, MP₁₀, O₃, NO₂, CO e SO₂. Os dados brutos não se encontram padronizados dentre as estações quanto a unidades e quanto a nomenclatura dos parâmetros. Quanto a cobertura, estão presentes estações localizadas em dez estados no total, apresentando assim dados de todas as regiões, com exceção da região Norte.

Antes da utilização dos dados nas análises, é necessária uma etapa de saneamento desses dados, visando evitar a representação de um mesmo parâmetro com unidades e, conseqüentemente, grandezas diferentes ou a representação de um ou mais parâmetros nomeados de forma distinta, mas que representam a mesma medida. Além disso, os dados são disponibilizados de forma separada por estado, sendo necessária a compilação dos arquivos para análises conjuntas.

3.2 Período de cobertura dos dados

Os dados utilizados de MP_{2,5}, MP₁₀, O₃, NO₂, CO e SO₂ têm registros que se iniciam em 01/01/2015 e vão até 01/01/2023. O intervalo de monitoramento utilizado não conta com dados contínuos, havendo falhas em diversas estações em momentos diferentes, como pode ser observado nas figuras abaixo, representando períodos em que há dados em pelo menos 25% e 50% das estações, respectivamente:

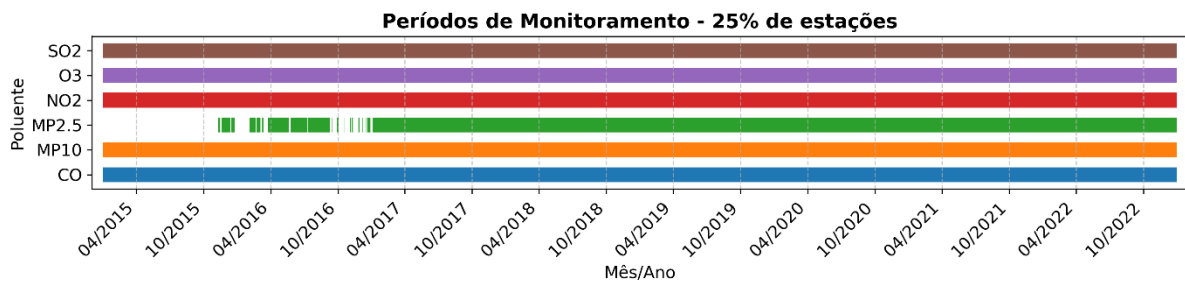


Figura 2 - Períodos nos quais pelo menos 25% das estações apresentam dados

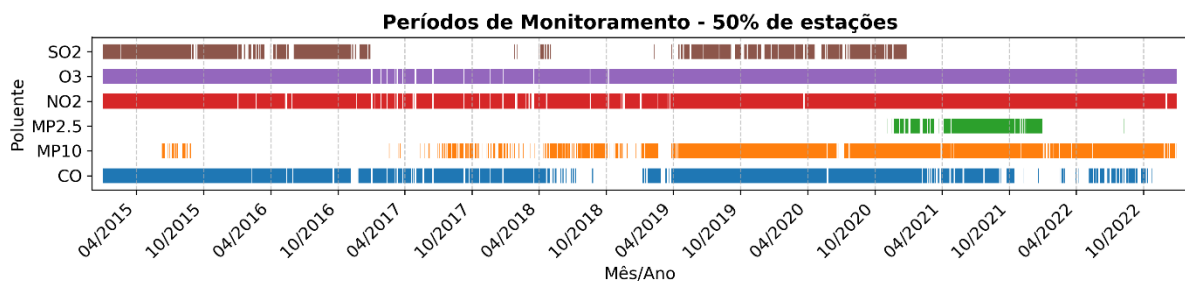


Figura 3 - Períodos nos quais pelo menos 50% das estações apresentam dados

3.3 Padronização e preparação dos dados

Os dados de emissões de poluentes obtidos do IEMA foram compilados e tratados em Python. Realizou-se a padronização das colunas, corrigindo inconsistências de codificação que causavam duplicidades, além da unificação de parâmetros iguais identificados de forma distinta (ex.: PM₁₀ e MP₁₀ presentes) e das variações de unidade (ex.: µg/m³ e ug/m³ presentes). Para padronização métrica, converteu-se as unidades ppm e ppb para µg/m³ em MP_{2,5}, MP₁₀, O₃, NO₂ e SO₂. Para CO, a unidade foi mantida em ppm conforme exigências legais, com sua respectiva adequação.

Os dados tratados foram integrados às coordenadas geográficas disponíveis, formando a base a partir da qual foram gerados os demais resultados e plotagens.

A aquisição dos dados foi feita em formato CSV, porém todas as etapas intermediárias utilizam formato parquet devido ao grande volume de linhas, estando disponibilizados os scripts para replicação das etapas em [repositório do GitHub](#), disponível no Anexo A.

3.4 Classificação de eventos de violação dos padrões

Os eventos de violação foram definidos baseados em cada um dos padrões intermediários e no patamar final estabelecidos pela CONAMA 506/2024. Para cada poluente aplicaram-se os critérios específicos para caracterizar violações:

| Parâmetro | Período de referência | Limite PI-1 | Limite PI-2 | Limite PI-3 | Limite PI-4 | Limite PF |
|-----------|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| MP10 | 24 horas | > 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | > 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | > 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | > 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | > 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
| MP2,5 | 24 horas | > 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | > 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | > 37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | > 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | > 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
| SO2 | 24 horas | > 125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | > 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | > 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | > 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | > 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
| NO2 | Máx. méd. horária no dia | > 260 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | > 240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | > 220 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | > 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | > 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
| O3 | Max. Méd. móvel de 8h no dia | > 140 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | > 130 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | > 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | > 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | > 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
| CO | Max. Méd. móvel de 8h no dia | - | - | - | - | > 10 ppm |

Figura 4 - Limites PI-1 a 4 e PF

3.5 Análise dos dados

3.5.1 Análise de tendências

Para a identificação de tendências temporais nas violações aplicou-se o teste de Mann-Kendall às séries históricas dos poluentes no período de 01/01/2015 a 01/01/2023. Foi utilizado o teste original através do método `original_test()` da biblioteca `pymannkendall` e foi realizada agregação diária dos dados. A significância estatística utilizada foi de $\alpha = 0,05$ e a magnitude das tendências observadas foi quantificada através da inclinação de Theil-Sen.

Com os resultados obtidos de tendência foram realizadas as classificações das tendências como de aumento ou redução, identificação das tendências de maior magnitude para cada poluente, mapeamento georreferenciado das tendências e análise de distribuição através

de boxplots. Foram gerados mapas das tendências tanto com a direção da tendência quanto o grau de significância.

3.5.2 Avaliação de sazonalidade

A avaliação de sazonalidade foi conduzida com base em dados de concentração de poluentes atmosféricos, processados individualmente para cada poluente e para todas as estações de monitoramento disponíveis. Inicialmente, os dados foram agrupados por mês, possibilitando o cálculo das médias mensais.

Além disso, foram elaborados boxplots mensais por estado, destacando a distribuição dos valores por mês para cada estação e estado. Os outliers foram removidos com base na regra de Tukey (Tukey, 1977) para melhorar a legibilidade e destacar padrões mensais recorrentes nas concentrações observadas. As equações para a detecção de outliers foram $x < Q1 - 1.5 \cdot IQR$ e $x > Q3 + 1.5 \cdot IQR$, onde $Q1$ e $Q3$ são o primeiro e o terceiro quartil e IQR é o intervalo interquartil ($Q1 - Q3$).

Complementarmente, foi aplicado o Índice de Sazonalidade de Markham (MSI) (Markham, 1972) sobre as médias mensais de concentração por estação, com o objetivo de quantificar o grau de concentração sazonal. O índice varia de 0 (distribuição homogênea ao longo do ano) a 1 (concentração em poucos meses), funcionando como um indicador objetivo da intensidade da sazonalidade. Estações com pelo menos 2/3 de dados válidos foram consideradas na análise, sendo meses com dados válidos aqueles com, pelo menos, 2/3 de registros diários válidos e os dias válidos aqueles com pelo menos 2/3 de registros horários (MMA, 2019)

Os valores de MSI foram apresentados tanto em gráficos de barras (para as 20 estações com maior índice por poluente) quanto em mapas geográficos para estados selecionados, com destaque para regiões metropolitanas, permitindo avaliar espacialmente a variabilidade da sazonalidade. Por fim, foram gerados boxplots combinados de MSI por estado, permitindo comparação entre poluentes e regiões em relação à força da sazonalidade.

3.6 Avaliação de sincronicidade entre estações

A sincronicidade, no contexto de violações de parâmetros de qualidade do ar, refere-se à ocorrência simultânea, dentro de um intervalo pré-definido, de excedências entre duas ou mais estações com significância estatística entre elas. A metodologia de análise de sincronicidade adotada fundamenta-se no conceito de escala de sincronia proposto por Berghuijs (2019) para o estudo de sincronia de eventos hidrológicos extremos. Originalmente desenvolvida para caracterizar a co-ocorrência espacial de cheias, a metodologia é adaptada para avaliar padrões de violações simultâneas dos padrões de qualidade do ar em estações de monitoramento distribuídas no território nacional.

De acordo com o método de Berghuijs, a escala de sincronia (SC) para uma estação de referência i em um dia t é definida como máxima distância d na qual pelo menos 50% das demais estações registram violação do mesmo padrão de qualidade do ar dentro de uma janela temporal Δt , através da fórmula $SC_{(i,t)} = \max \{d \mid f(d) > 0,5, \text{ na qual } f(d) = \text{fração de estações dentro do raio } d \text{ da estação } i \text{ com violação no intervalo } [t - \Delta_{(t,t)} + \Delta t] \text{ e } \Delta t = \text{janela temporal ajustada à persistência típica de poluentes.}$

Para a utilização do método com parâmetros de qualidade do ar foram feitas adaptações quanto às variáveis dicotômicas, sendo a excedência ou a não excedência análogas a ocorrência ou não ocorrência de cheias no estudo original, além de uma redução da janela temporal para um intervalo de 48h, considerando-se a maior volatilidade dos níveis e da dispersão de poluentes no ar.

A abordagem busca minimizar a presença de falsos positivos em redes esparsas, como é a de monitoramento de qualidade do ar em alguns pontos, através do limiar de 50%, e permite a aferição de métricas quantitativas para auxílio em políticas integradas que venham a ser desenvolvidas com base no estudo.

O método foi aplicado às incidências de violações de $MP_{2,5}$, MP_{10} , O_3 , NO_2 , CO e SO_2 para o intervalo entre 01/01/2015 e 01/01/2023 e foram gerados mapas com as localizações e sincronicidade das estações em cada estado para cada poluente, gráficos de barras empilhadas com os totais de registros e os totais de violações, assim como um boxplot geral com a sincronicidade por estado para cada poluente.

3.7 Ferramentas e bibliotecas utilizadas

Para o tratamento e manipulação dos dados foi usado Python com o auxílio de bibliotecas de manipulação de dados. Foi utilizada majoritariamente a biblioteca Polars devido a otimização para manipulação de grandes volumes de dados. Pontualmente foram aplicados trechos com utilização de Pandas para cálculos específicos e funções não cobertas por Polars, principalmente nas etapas de mapas e de plotagens.

Foi dada preferência a arquivos em formato parquet para armazenamento e carregamento dos dados devido à muito melhor otimização da organização de dados. Arquivos menores de informação foram mantidos em CSV para facilidade de visualização e edição manual.

As plotagens de mapas e gráficos foram realizadas utilizando as bibliotecas Geopandas e Matplotlib e Seaborn.

Para o controle de versões do código e a critério de armazenamento de conteúdo intelectual, foi utilizada a plataforma GitHub, na qual foi criado um [repositório](#), disponível no Apêndice A, para desenvolvimento dos scripts e posterior disponibilização para o meio acadêmico.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Tendência nas concentrações de poluentes

Através dos dados calculados pelo teste de Mann-Kendall, foram plotadas as tendências para cada estado da federação, aplicando uma escala de cores e de saturação representativa da direção da tendência média em cada estado e sua intensidade, sendo consideradas apenas as tendências consideradas relevantes ($p\text{-value} < 0,05$), como observado na Figura abaixo:

Tendências de Poluentes por Estado com Localização das Estações

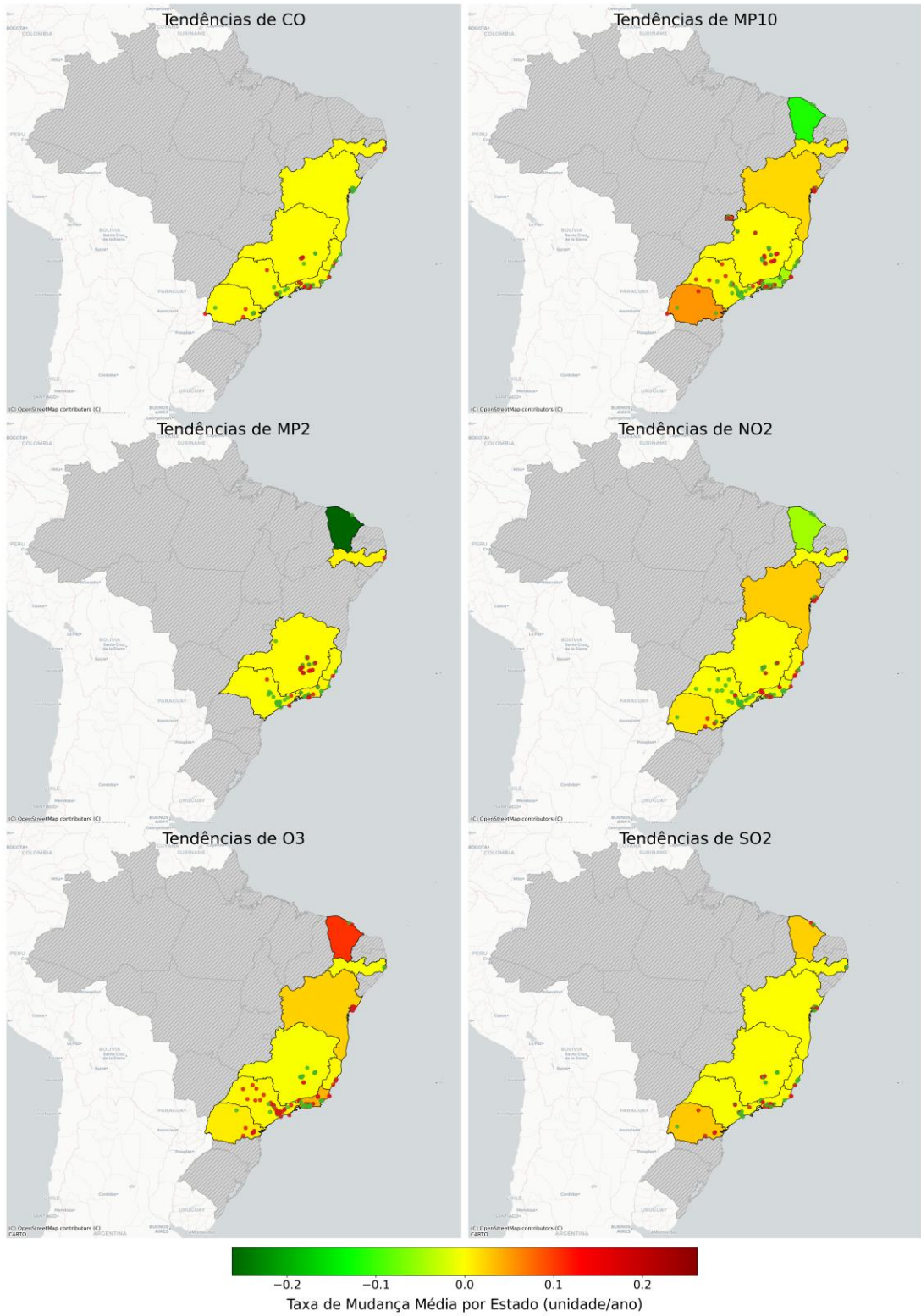


Figura 5 - Tendências das concentrações de poluentes por estado

É possível observar tendências mais relevantes de diminuição no estado do Ceará para NO_2 , MP_{10} e $\text{MP}_{2,5}$, apesar da forte tendência de aumento de O_3 . A maior parte dos demais estados apresenta tendências médias de aumento ou neutralidade das violações, sendo o único exemplar com tendência relevante de diminuição a tendência de MP_{10} do estado do Rio de Janeiro.

Com os estados que possuem pelo menos quatro estações de monitoramento para um determinado poluente, com a finalidade de possibilitar a representação dos quartis, foi idealizado um boxplot com a finalidade de possibilitar a comparação das tendências médias em cada estado para as concentrações em cada um dos poluentes monitorados.

As tendências calculadas podem ser observadas na Figura abaixo:

Distribuição das Tendências por Estado
(Estados com pelo menos 4 estações significativas, p-value < 0.05)

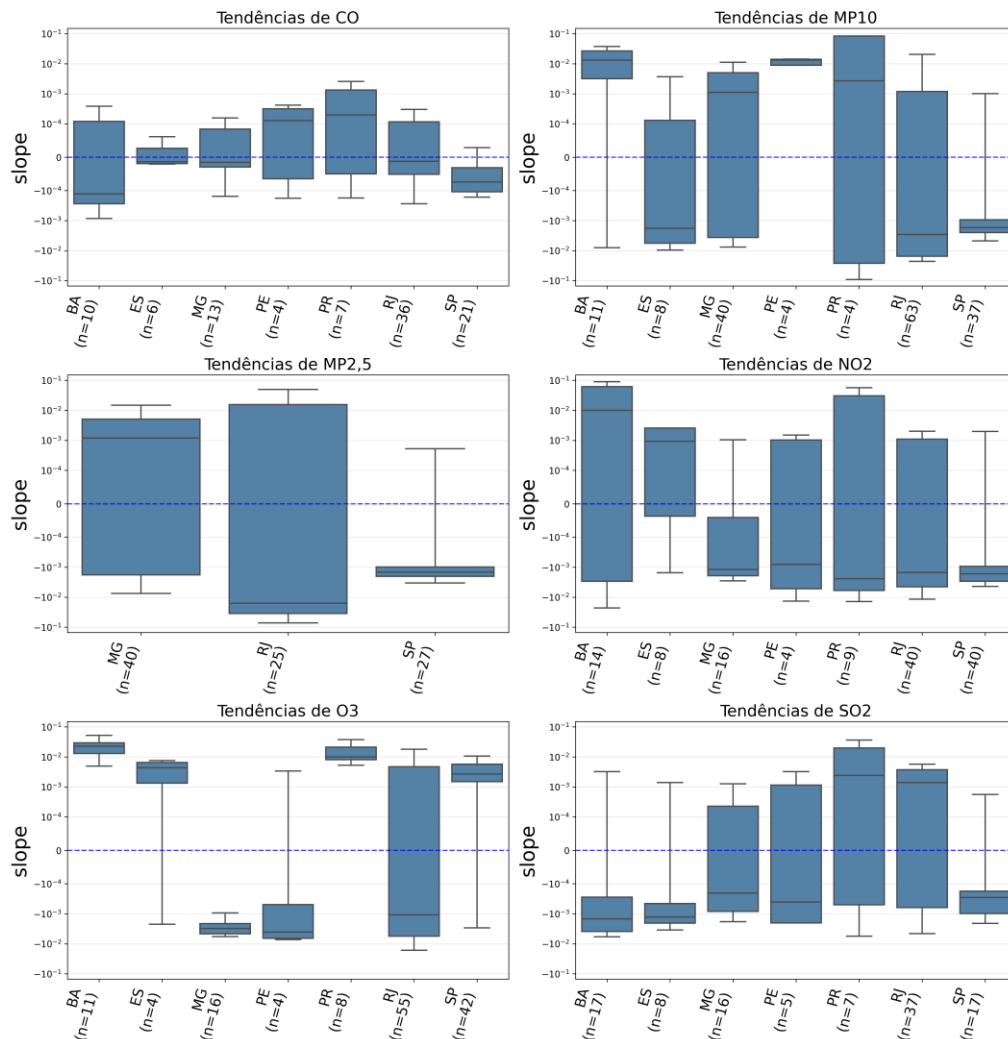


Figura 6 - Tendências por estado para cada poluente

Visualizações mais detalhadas podem ser encontradas no apêndice. A partir dos dados obtidos foi possível observar uma tendência relevante de diminuição para $MP_{2,5}$ e MP_{10} no Rio de Janeiro. Na Bahia foram observadas tendências de aumento significativas para NO_2 , O_3 e MP_{10} , sendo o estado com as tendências de aumento mais significativas. Com tendências levemente menos intensas, o estado do Paraná ultrapassa a Bahia em número de poluentes com tendência relevante de aumento, sendo eles MP_{10} , SO_2 e O_3 com caráter mais relevante e CO com menor intensidade. São Paulo apresentou majoritariamente tendências de diminuição para SO_2 , NO_2 , $MP_{2,5}$, MP_{10} e CO, apresentando uma das tendências mais otimistas dentre os estados analisados, com exceção do aumento em O_3 . Em Minas Gerais, para a maior parte dos poluentes, as tendências encontradas se mantiveram próximas à neutralidade, com exceção da tendência mais expressiva de redução de O_3 .

4.2 Sazonalidade das concentrações de poluentes

As médias mensais de concentração para cada Estado com dados disponíveis e para cada poluente foram plotadas em conjuntos de gráficos box-plot, juntamente com os limites de cada padrão da legislação, sendo descartados da plotagem outliers, descartados através da regra de Tukey, para critérios de visibilidade:

Concentrações Mensais por Estado - CO

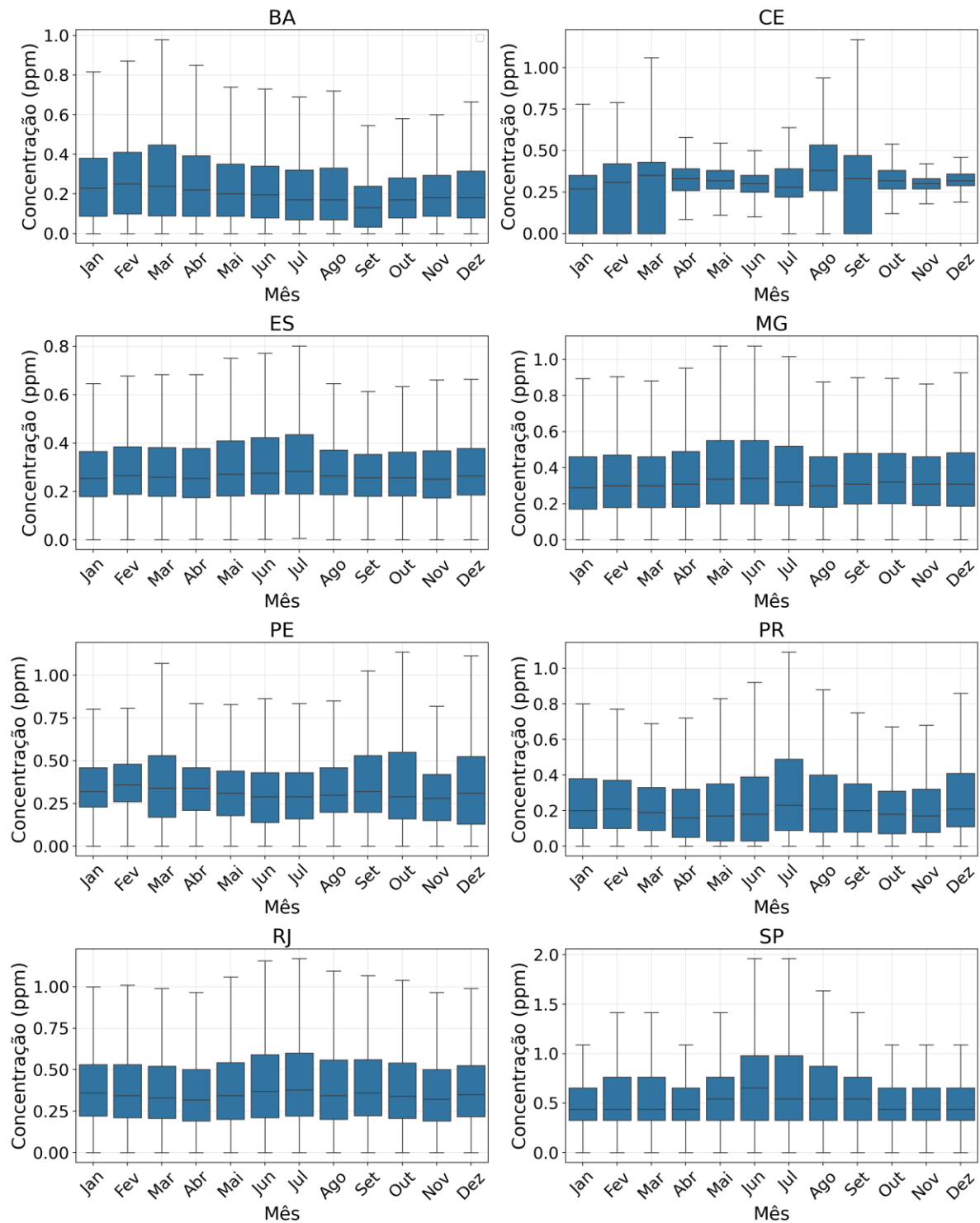


Figura 7 - Concentrações mensais de CO por estado

Através dos gráficos é possível aferir um padrão sazonal mais claro para CO no Estados do Paraná e São Paulo, com concentrações maiores entre junho e agosto, e para o Ceará no mês de agosto. No Rio de Janeiro e no Espírito Santo é possível observar um leve aumento das concentrações nos meses de junho e julho em comparação com o restante do ano. Já no estado da Bahia o pico de CO se dá no mês de março, com a alta se estendendo de janeiro a abril.

Concentrações Mensais por Estado - MP2.5

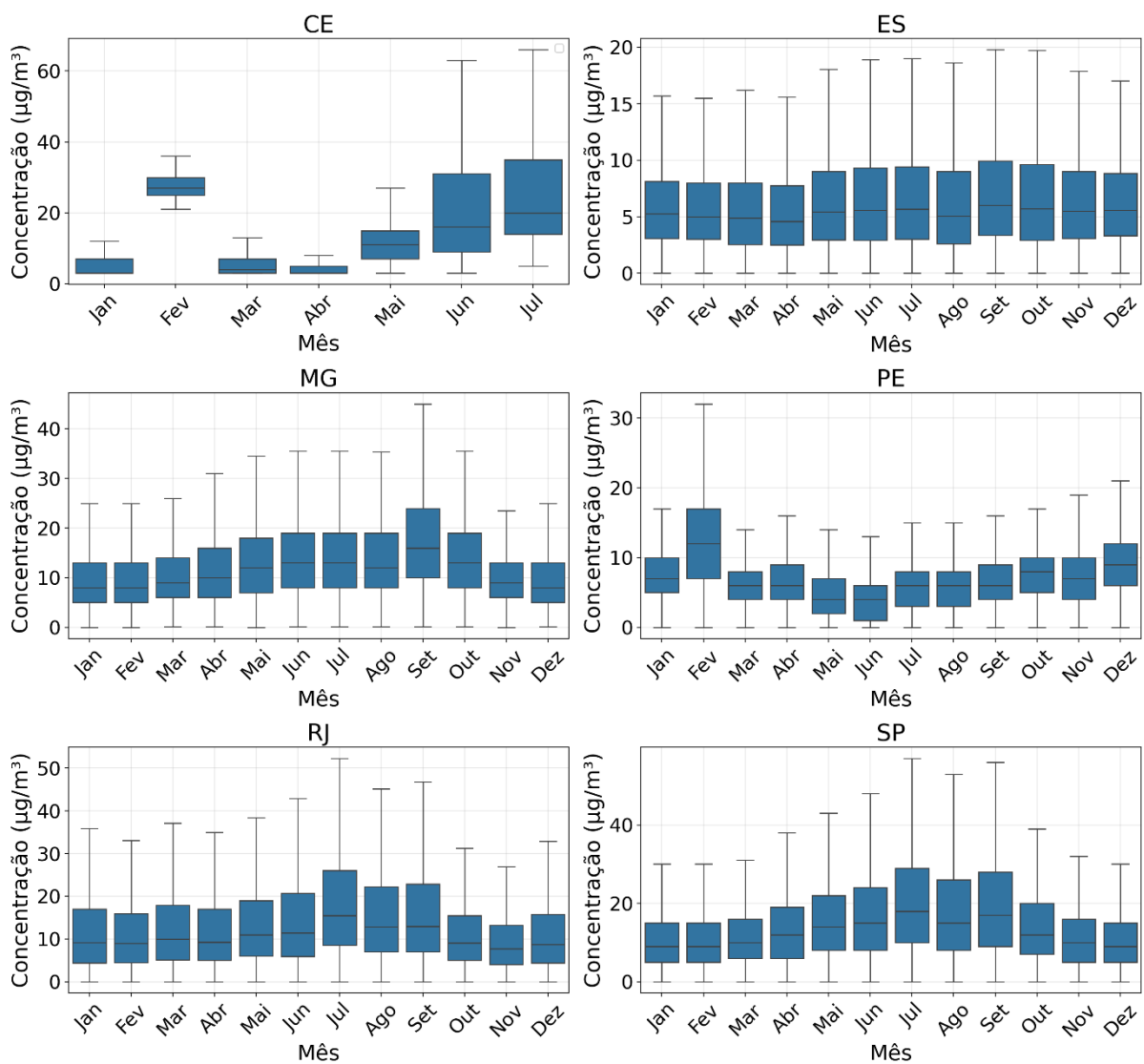


Figura 8 - Concentrações mensais de MP_{2,5} por estado

Para $MP_{2,5}$ é possível observar forte sazonalidade para o Ceará, com concentrações notavelmente mais elevadas nos meses de junho e julho. Essas concentrações, entretanto, podem não refletir a totalidade da sazonalidade do Estado, devido à ausência de medições em parte dos meses. Para os Estados de São Paulo e do Rio de Janeiro é possível observar concentrações mais elevadas entre os meses de junho e setembro, com ambos tendo pico em julho. Em Minas Gerais é possível observar altas entre junho e outubro, com pico em setembro. Já para o estado de Pernambuco as altas se dão entre dezembro e fevereiro, tendo forte pico no último mês. Espírito Santo apresentou médias sutilmente mais elevadas entre junho e outubro.

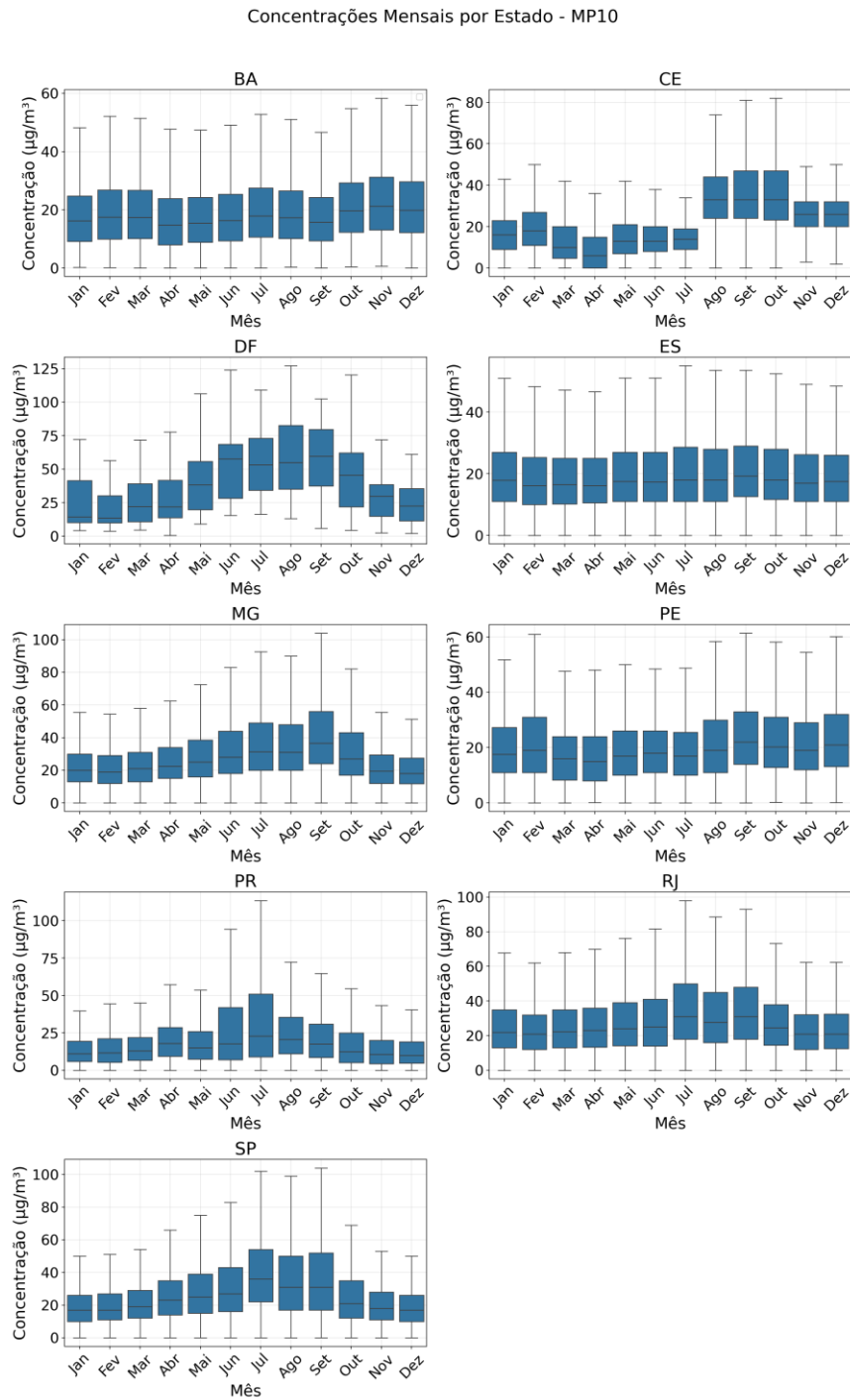


Figura 9 - Concentrações mensais de MP₁₀ por estado

Para MP₁₀, é possível observar concentrações maiores entre os meses de junho e julho para o Paraná. No Rio de Janeiro e em São Paulo as concentrações mais elevadas se mantiveram entre os meses de julho e setembro, com pico em julho. Para o estado do Ceará o intervalo de concentrações mais altas foi de agosto a outubro, com diminuição pouco brusca ao longo de

novembro e dezembro. No Distrito Federal foram observadas altas entre junho e setembro, com pico em agosto.

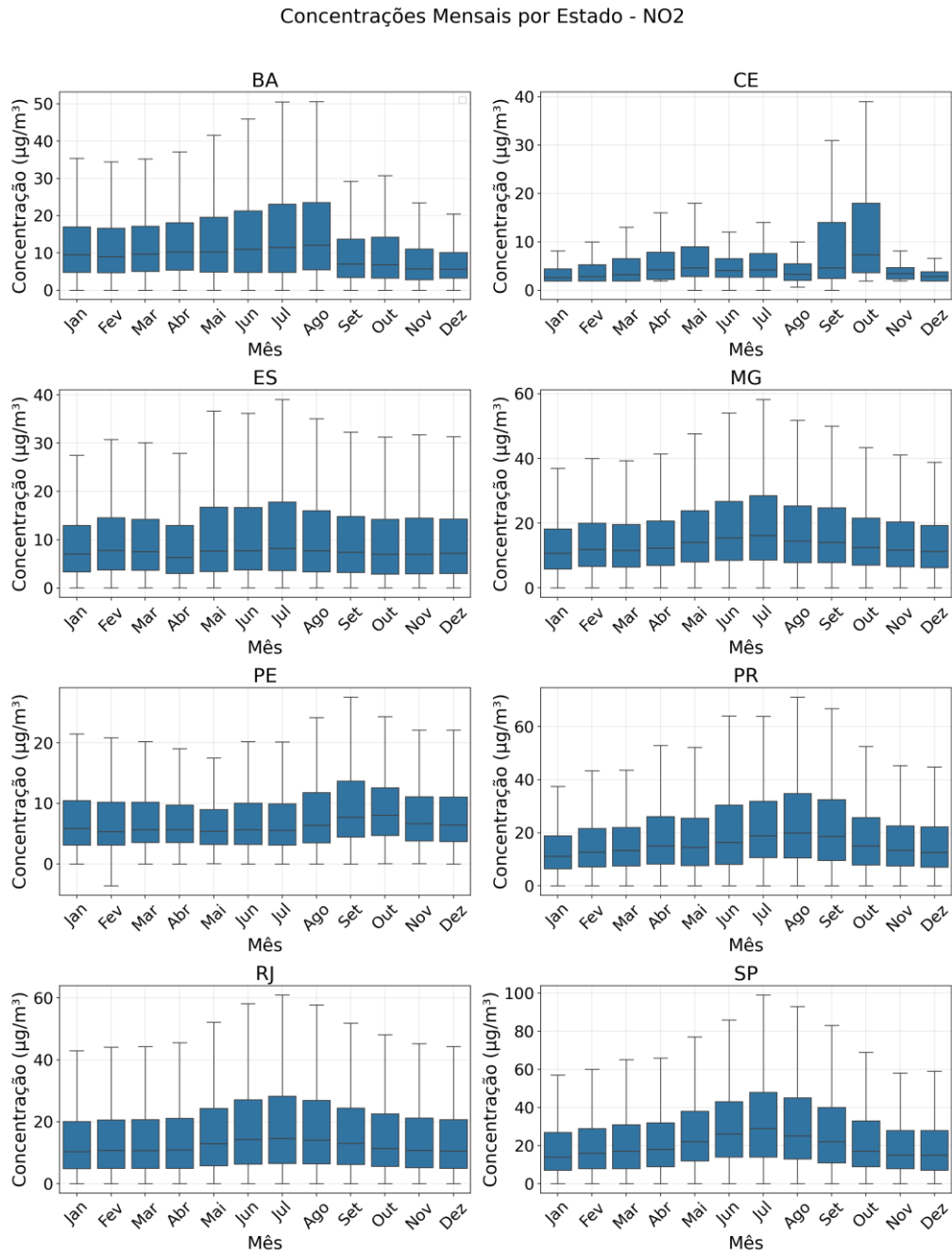


Figura 10 - Concentrações mensais de NO₂ por estado

Para NO₂ foi possível observar médias mais elevadas dentro os meses de junho e agosto nos estados do Rio de Janeiro, São Paulo e Minas Gerais, com picos no mês de julho. No estado da Bahia as maiores médias foram observadas entre junho e agosto, com pico em agosto. Paraná apresentou máximas entre junho e setembro, atingindo o pico também em

agosto. Em Pernambuco e no Ceará as maiores médias foram registradas nos meses de setembro e outubro, sendo as do estado do Ceará as mais acentuadas.

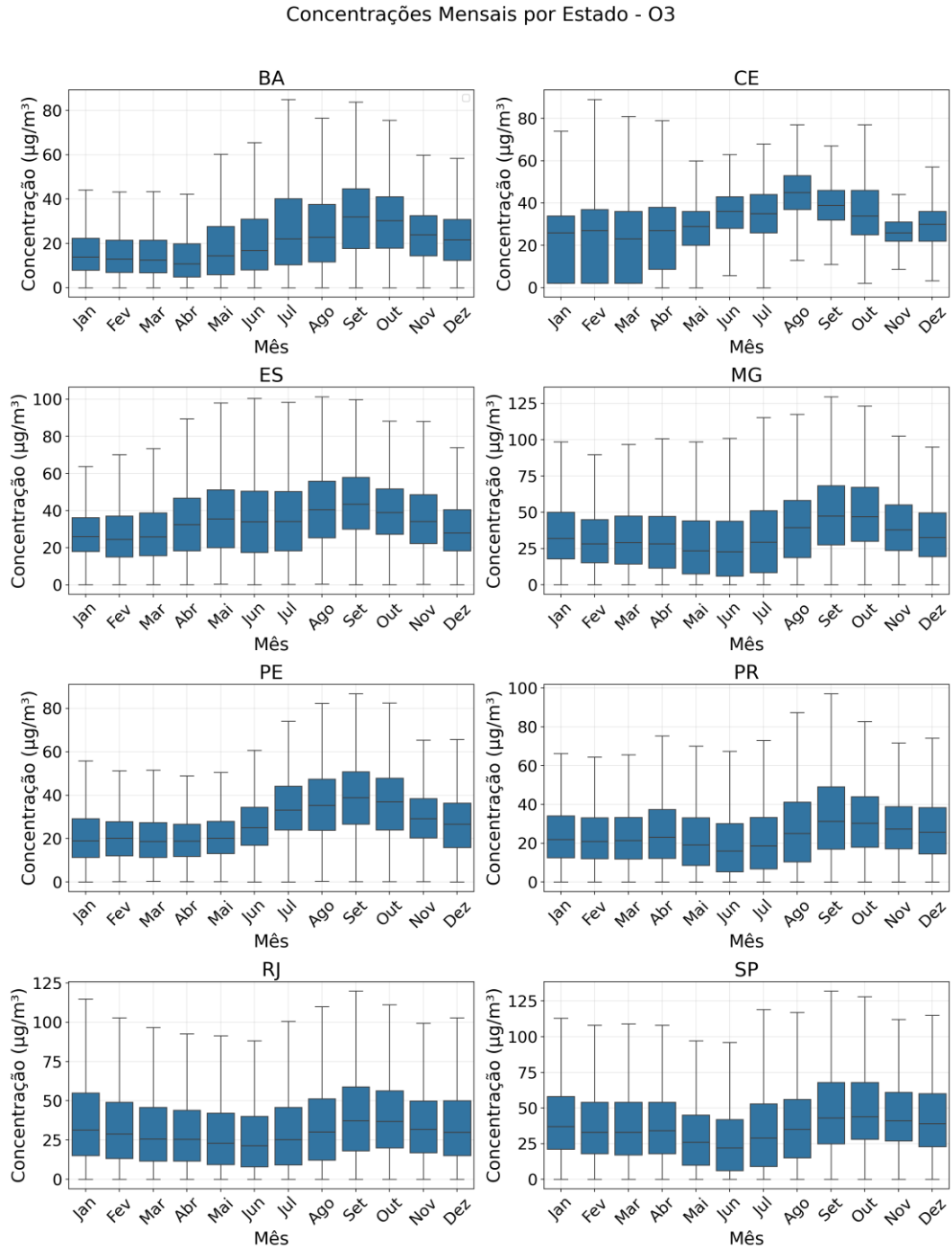


Figura 11 - Concentrações mensais de O₃ por estado

Para O₃ foram observados valores mais elevados nos meses entre agosto e outubro em todos os estados. Em São Paulo e no Rio de Janeiro as médias não apresentam grande diminuição até o mês de janeiro, onde inicia o trecho com as menores médias. Bahia,

Pernambuco e Minas Gerais apresentam os picos mais acentuados, com médias mais elevadas mais concentradas nos meses de agosto e setembro.

Complementarmente, através do Índice de Sazonalidade de Markham (MSI) foi possível quantificar a sazonalidade dos registros de cada poluente para cada Estado. Foram considerados apenas meses com, pelo menos, 2/3 dos registros diários, 2/3 de dias válidos por mês e 12 meses válidos por ano para o cálculo do MSI, com resultado podendo ser conferido na figura:

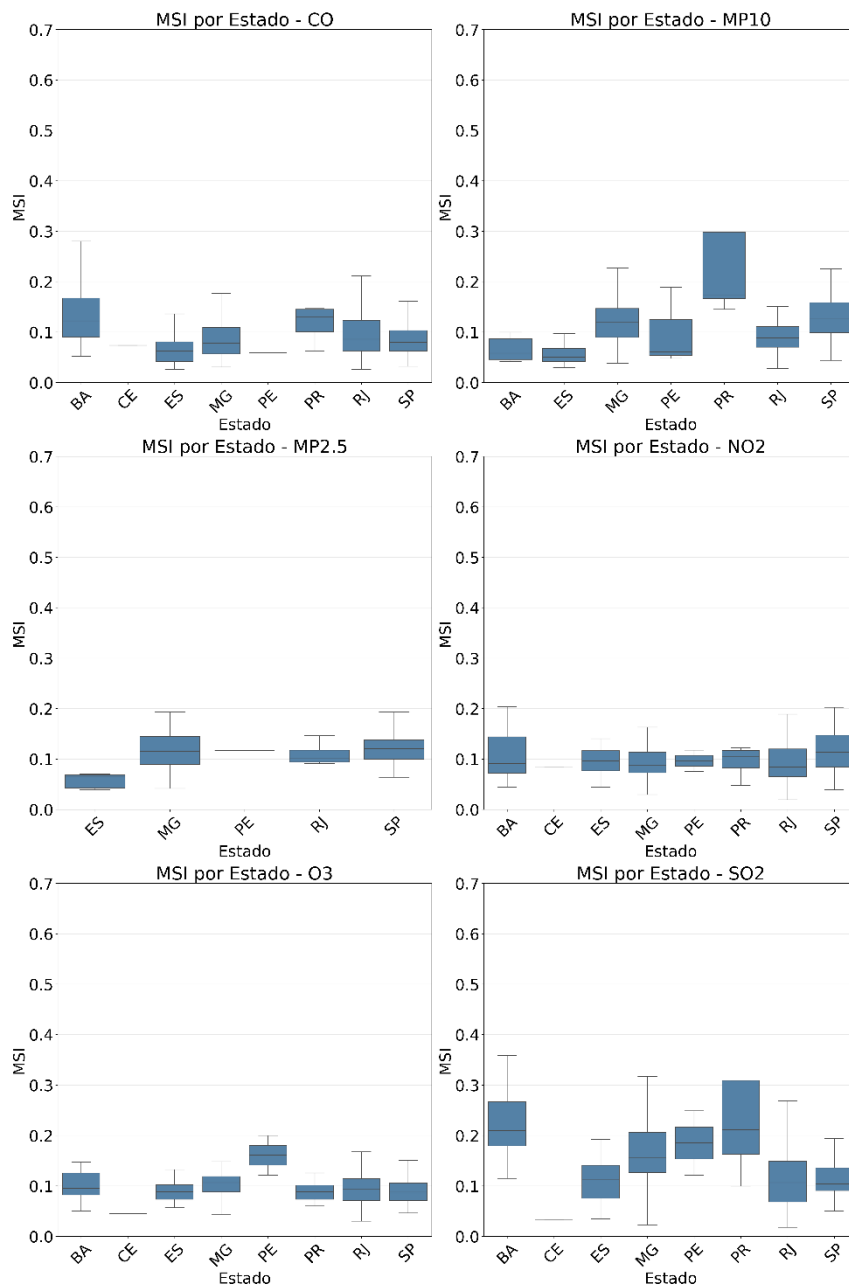


Figura 12 - Índice de Markham por estado para cada poluente

Dentre todos os poluentes onde havia registros suficientes e suficientemente dispersos para uma boa representação através do MSI, o Estado da Bahia apresentou índice de sazonalidade elevado em comparação com a maioria dos demais Estados para SO_2 . Os Estados do Rio de Janeiro, São Paulo e Minas Gerais, detentores das maiores densidades e quantidades de estações, apresentaram sazonalidade baixa dentro da escala, mantendo-se por volta de 0,1 no índice de Markham. O Estado do Paraná apresentou sazonalidade relativamente elevada para MP_{10} e SO_2 , mantendo valores por volta de 0,2 para CO e NO_2 e valores baixos para os demais poluentes.

4.3 Análise de sincronicidade entre estações

4.3.1 Frequência e espacialização das violações

As quantidades de violações totais e sob agrupamento mensal podem ser conferidas nas figuras a seguir, representando o total de medições por poluente para cada mês e a quantidade de violações de cada um dos padrões da legislação:



Figura 13 - Violações de CO frente padrões CONAMA

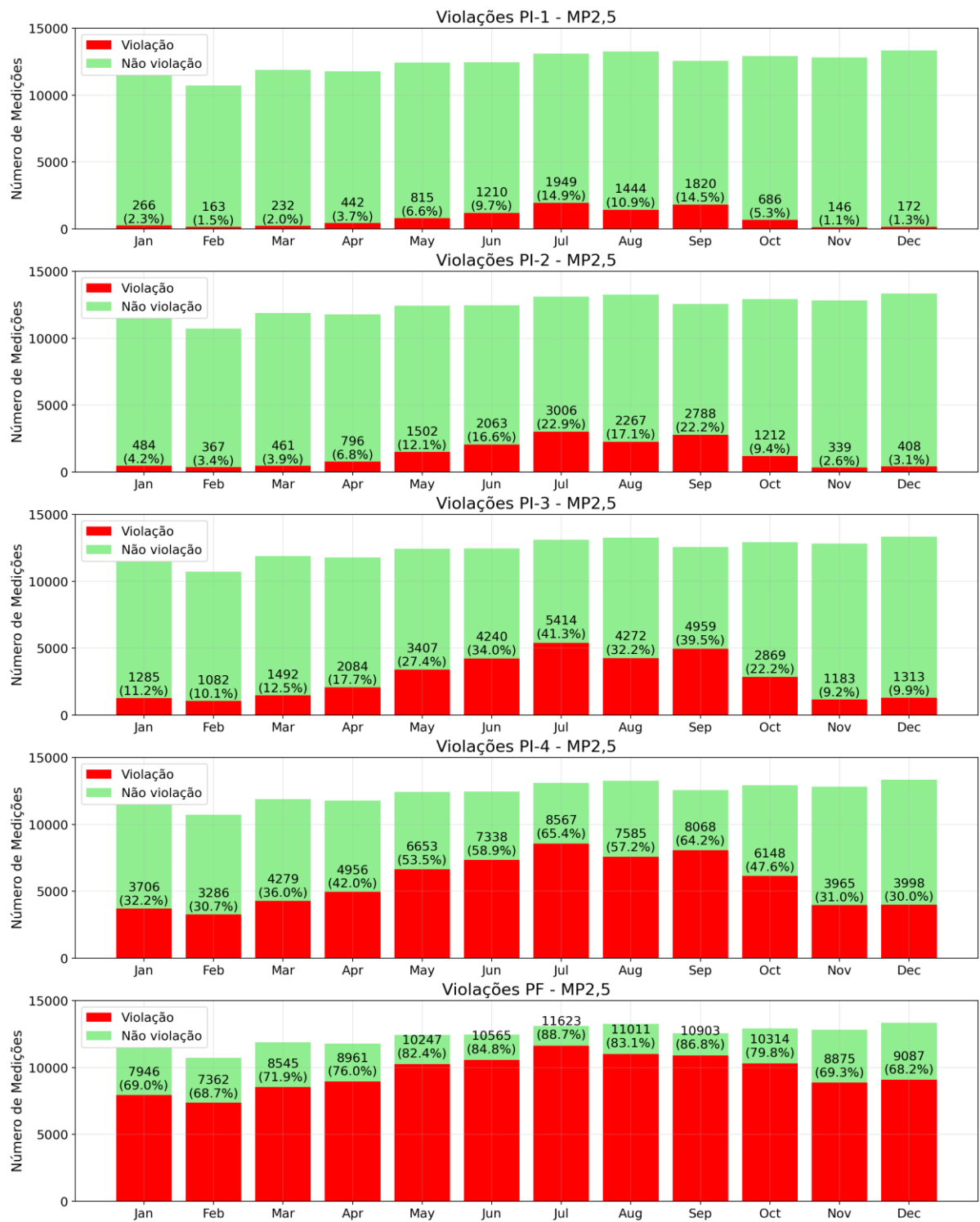


Figura 14 - Violações de MP_{2,5} frente padrões CONAMA

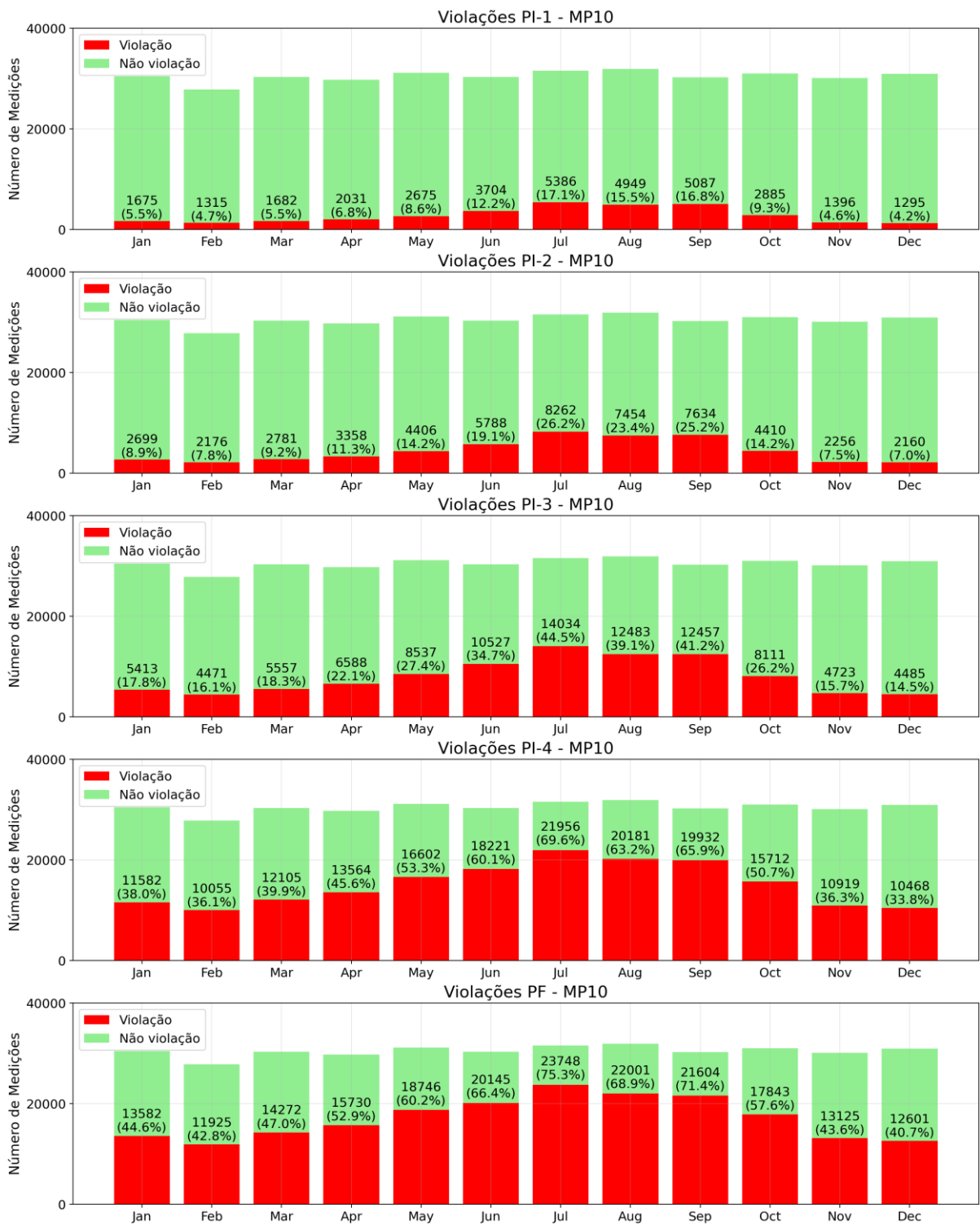


Figura 15 - Violações de MP₁₀ frente padrões CONAMA

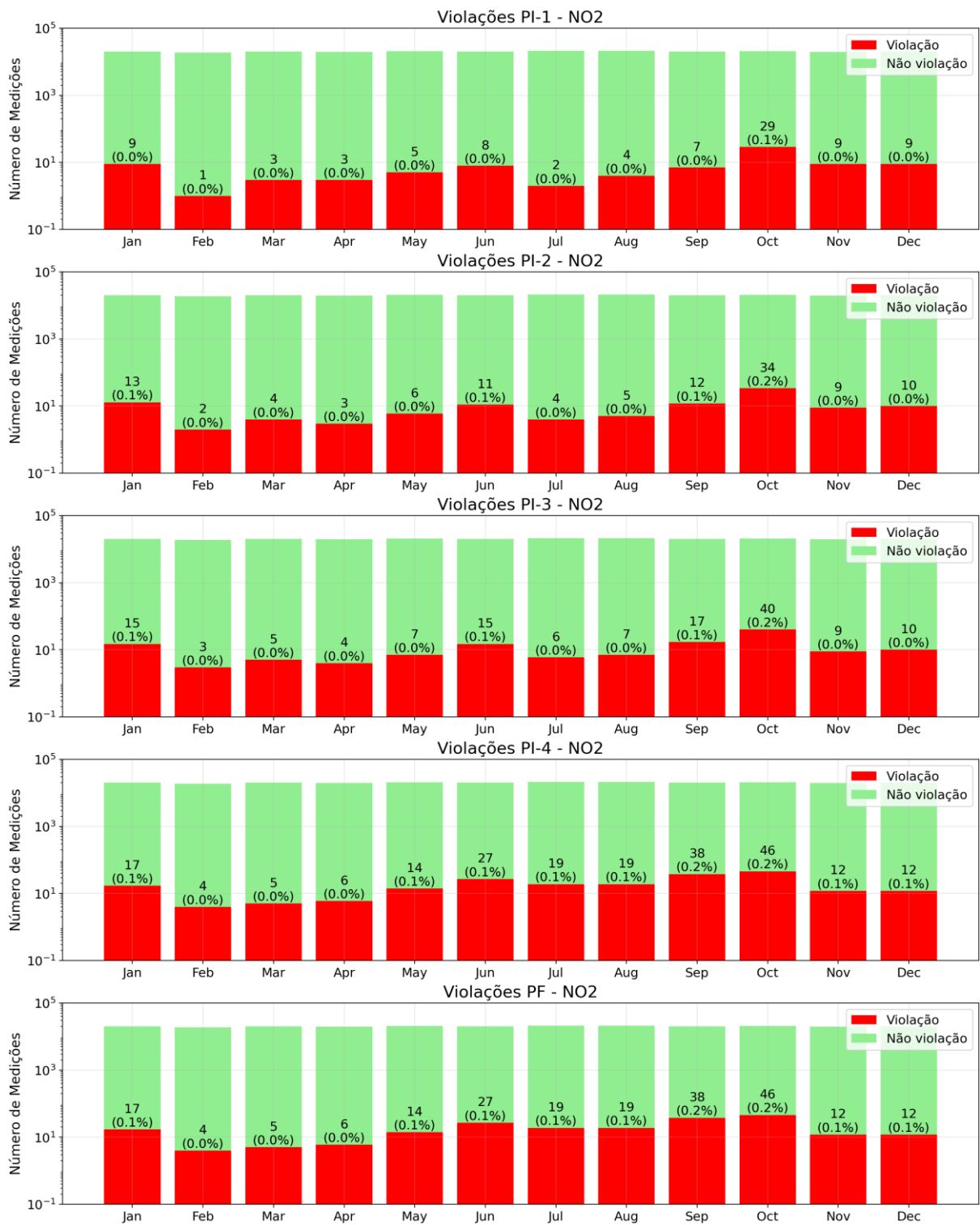


Figura 16 - Violações de NO₂ frente padrões CONAMA

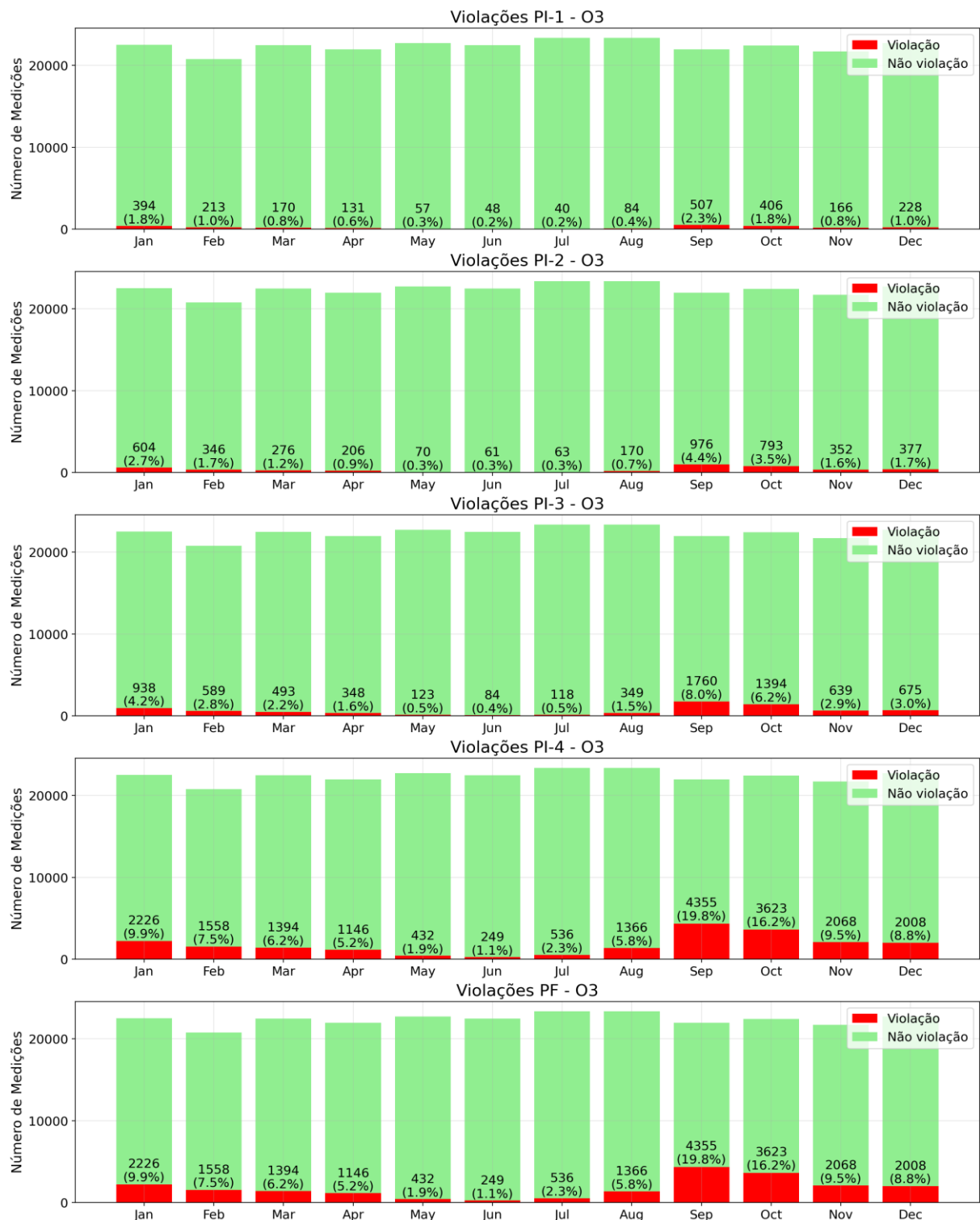


Figura 17 - Violações de O₃ frente padrões CONAMA

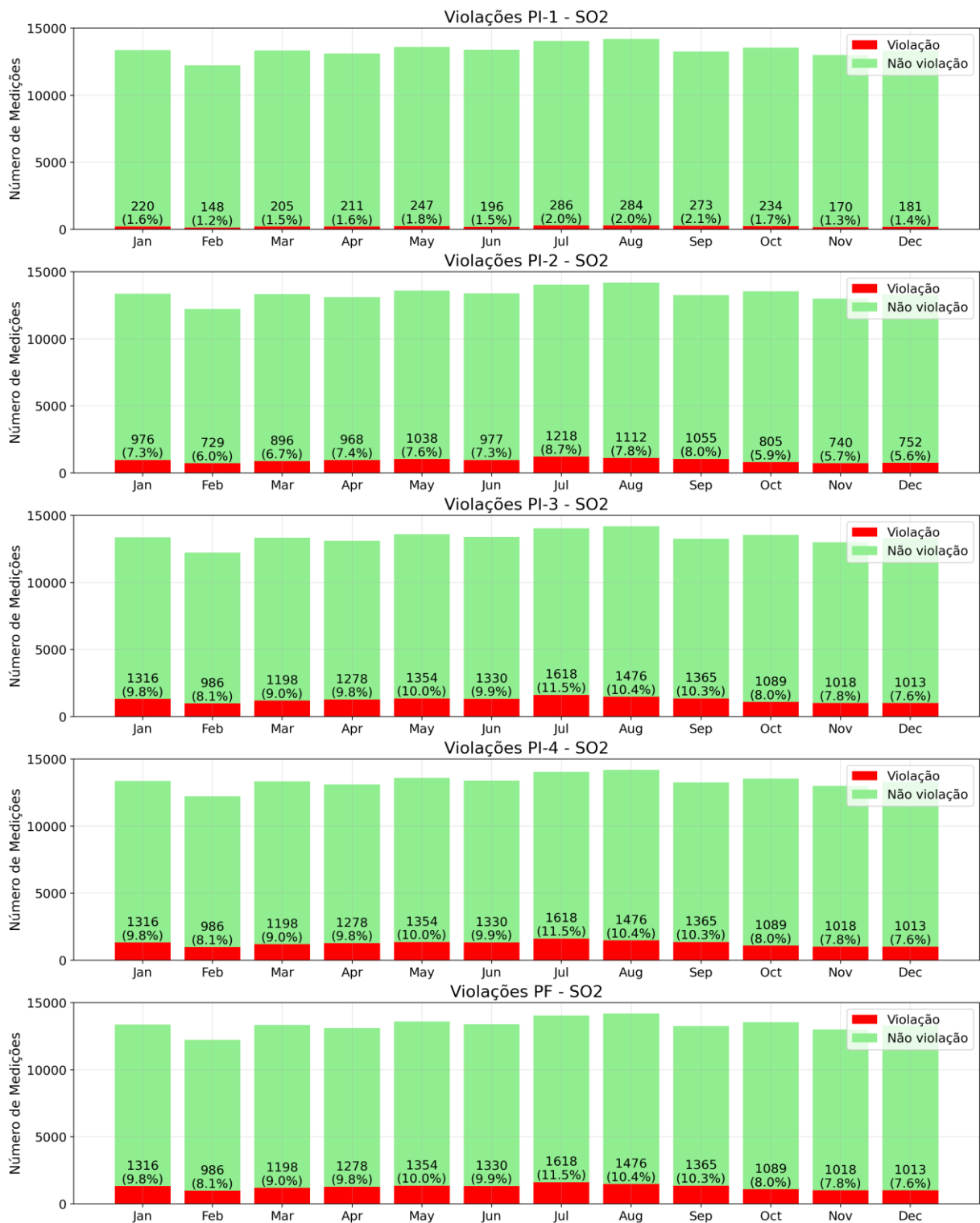


Figura 18 - Violações de SO₂ frente padrões CONAMA

É possível acompanhar a taxa de violações aumentar conforme comparativo com os padrões futuros da legislação, se mantendo atualmente em níveis adequados com praticamente todos os padrões os níveis de NO₂ e os de CO, que não é regulado, e ficando claro o longo

percurso de reduções necessário para a adequação de liberações de poluentes como $MP_{2,5}$ e MP_{10} e o caminho menor, porém ainda considerável, a ser percorrido quanto aos níveis de O_3 e SO_2 . Na figura abaixo podem ser observadas as taxas de violação para cada poluente frente cada um dos padrões dispostos na legislação:

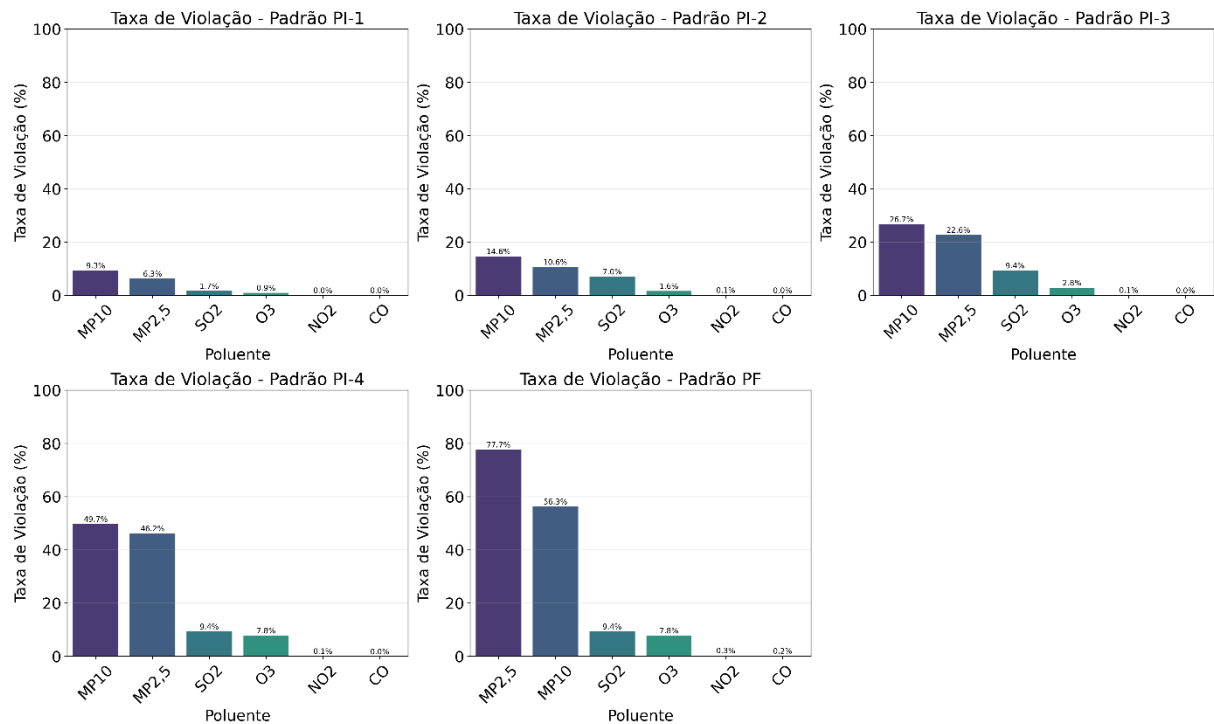


Figura 19 - Taxas de violação de cada poluente por padrão

É possível observar taxas de quase 80% nas violações de $MP_{2,5}$ frente ao padrão final e taxas de quase 50% para MP_{10} . O_3 e SO_2 apresentam taxas menores, por volta de 20% e 9%, respectivamente. As taxas de violação de NO_2 e de CO são baixas, mesmo comparadas ao padrão final da legislação.

4.3.2 Análise de sincronicidade entre estações

Através da análise de sincronicidade proposta, foi possível calcular as médias de sincronicidade das estações de cada Estado em km. Os valores calculados podem ser observados na Figura abaixo:

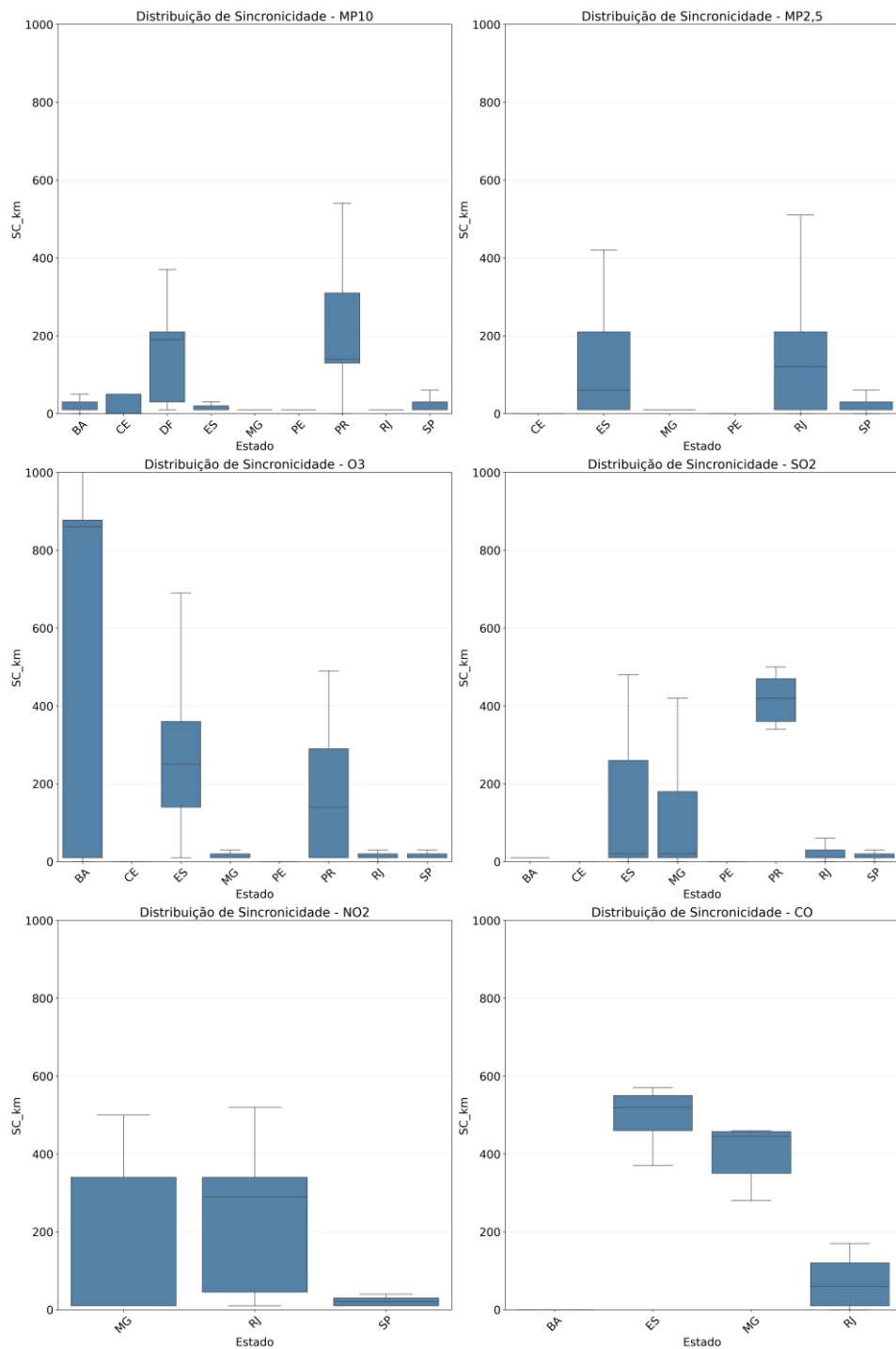


Figura 20 - Sincronicidade de estações de cada poluente por estado (km)

Foram observados níveis de sincronicidade elevados para CO no Espírito Santo, com uma média de 500,6 km, e em Minas Gerais, com 401,7 km de média. O estado do Paraná apresentou sincronicidade média de 387,4 km para SO₂ e de 230,8 km para MP₁₀. Já o Estado da Bahia apresentou 467,9 km de média de sincronicidade para O₃, sendo a segunda maior

média dentre todos os estados e todos os poluentes. Minas Gerais e Rio de Janeiro apresentaram médias de sincronicidade de 250 km e 218,8 km, respectivamente, para NO_2 . Os demais estados apresentaram grandezas menores de sincronicidade para os poluentes analisados.

A sincronicidade exacerbada de O_3 observada para o estado da Bahia pode ser atribuída, principalmente, a proximidade das estações do estado entre si e a grande distância entre o cluster e demais estações de monitoramento de O_3 em estados vizinhos, como pode ser observado na figura:

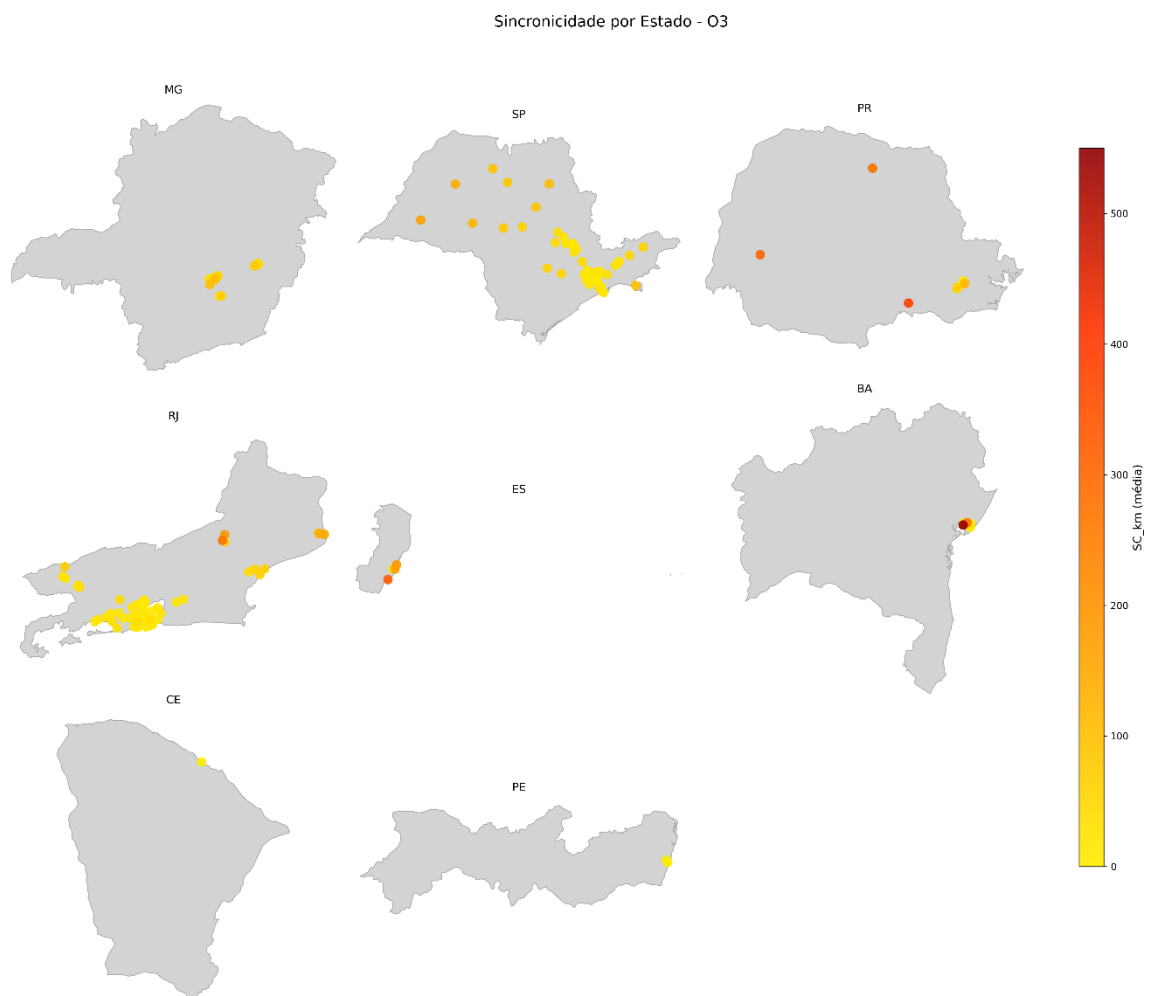


Figura 21 - Mapa de sincronicidade de O_3 no Brasil

De forma semelhante, pode-se observar a correlação entre a distância dos clusters dos estados do Espírito Santo e de Minas Gerais e das outras estações para CO , evidenciados na figura a seguir:

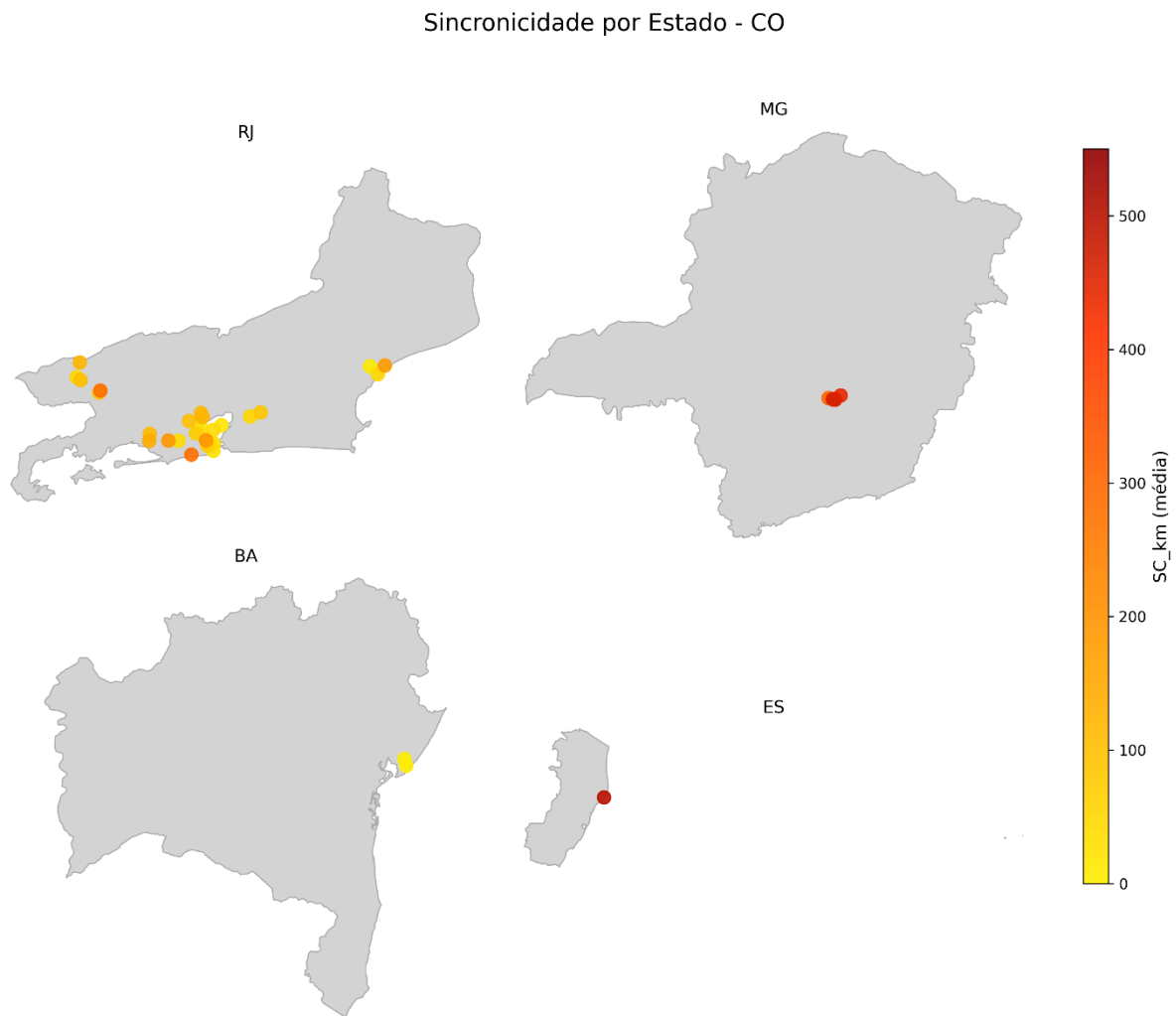


Figura 22 - Mapa de sincronidade de CO no Brasil

As localizações das estações que apresentaram alta sincronidade tanto de NO_2 quanto de CO nos estados de Minas Gerais e do Espírito Santo não apresentaram grande distribuição territorial e nem tem grandes quantidades de estações em seus arredores, como evidenciado. Já as estações localizadas no Rio de Janeiro e São Paulo apresentaram distribuição um pouco mais ampla. As estações e suas sincronidades podem ser observadas na Figura a seguir:

Sincronicidade por Estado - CO

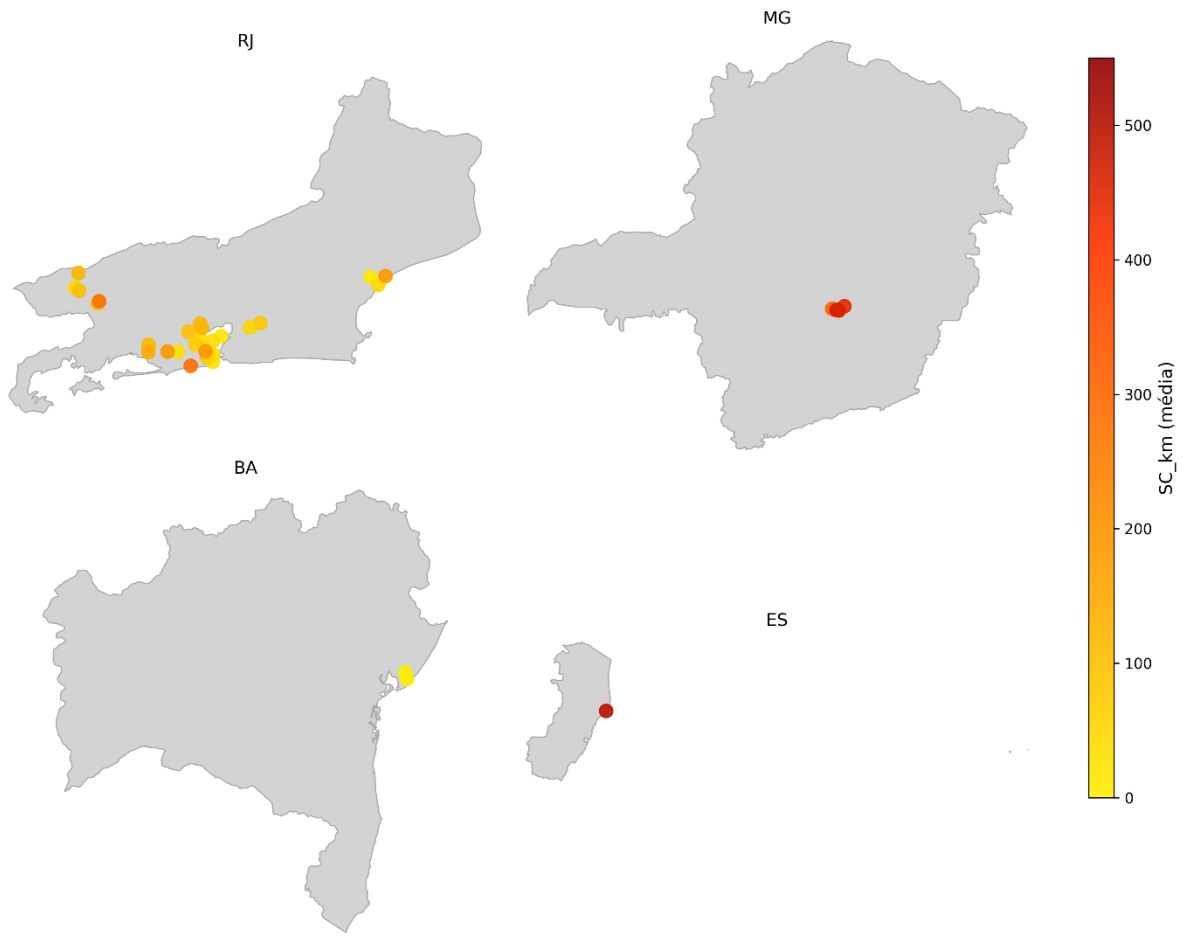
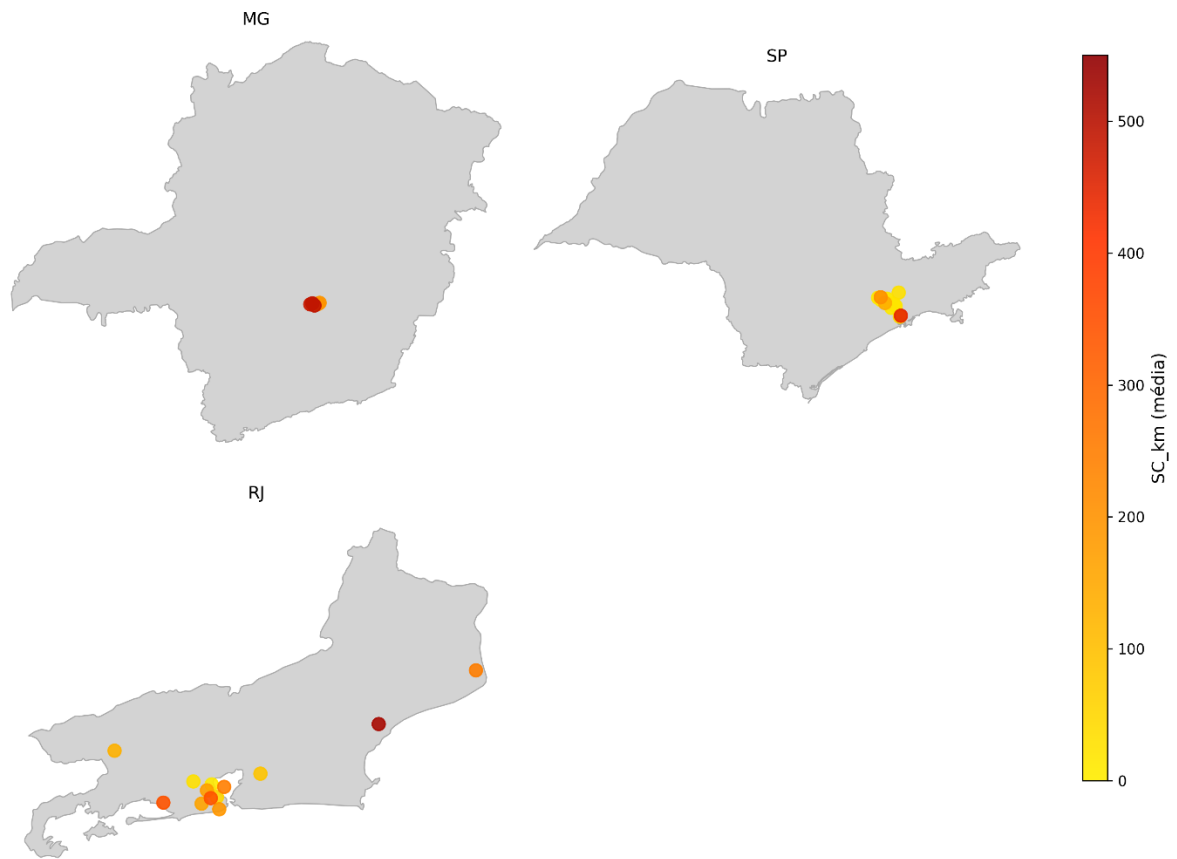


Figura 23 - Mapa de sincronidade de CO em RJ, MG, BA e ES

Sincronicidade por Estado - NO₂Figura 24 - Mapa de sincronidade de NO₂ em MG, SP e RJ

As sincronidades de O₃, que atingiram os maiores níveis absolutos dentre todos os poluentes, com as máximas principalmente nos estados da Bahia, Espírito Santo e Paraná podem ser observadas abaixo:

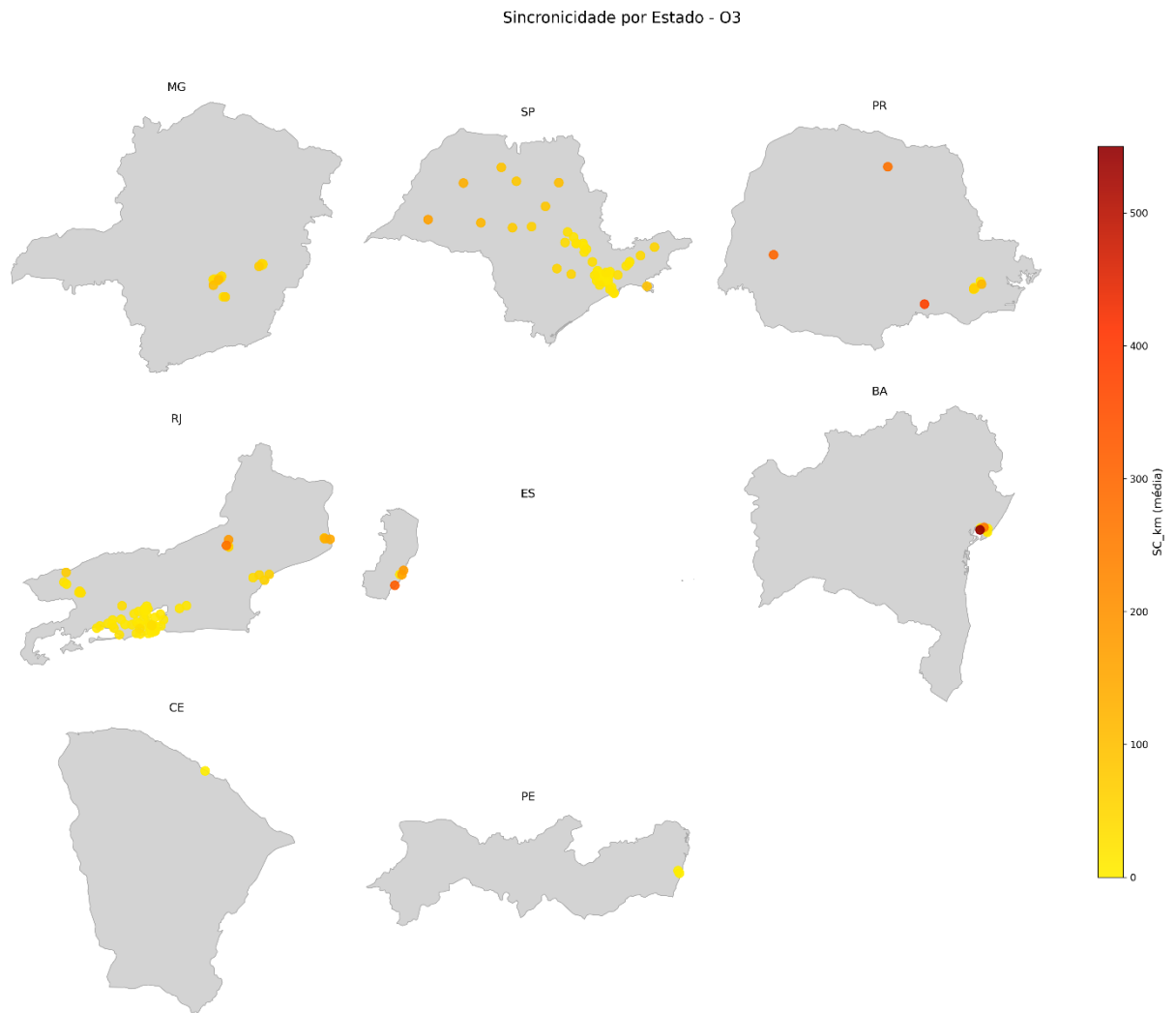


Figura 25 - Mapa de sincronicidade de O₃ em todos os estados

5 CONCLUSÕES

Este estudo realizou uma análise espaço-temporal abrangente das concentrações de poluentes atmosféricos e violações dos padrões de qualidade do ar no Brasil, utilizando dados da rede de monitoramento do IEMA. Os resultados demonstram padrões distintos de tendência, sazonalidade e sincronicidade, com implicações significativas para políticas públicas e gestão ambiental.

Os resultados demonstraram que os poluentes $MP_{2,5}$, MP_{10} e O_3 apresentam as maiores taxas de violações frente aos padrões mais restritivos, com destaque para $MP_{2,5}$, cujas taxas ultrapassam 80% em relação ao padrão final. Tendências de aumento foram observadas na Bahia (NO_2 , O_3 e MP_{10}) e no Paraná (MP_{10} , SO_2 , O_3 e CO), enquanto estados como São Paulo (com redução significativa em SO_2 , NO_2 , $MP_{2,5}$, MP_{10} e CO) e Rio de Janeiro (com redução em $MP_{2,5}$ e MP_{10}) demonstraram tendências mais positivas. Em Minas Gerais, predominou neutralidade na maioria dos poluentes, com exceção da redução expressiva de O_3 . O estado do Ceará apresentou tendências relevantes de diminuição para NO_2 , MP_{10} e $MP_{2,5}$, apesar da forte tendência de aumento de O_3 . A análise de sazonalidade indicou influência das estações do ano nas concentrações de $MP_{2,5}$, MP_{10} , NO_2 e CO , com picos típicos nos períodos secos (inverno) e concentrações mais amenas no verão, corroborando com a literatura e indicando a influência de fatores meteorológicos.

A análise de sincronicidade revelou a existência de agrupamentos regionais com violações simultâneas, sugerindo que eventos atmosféricos de larga escala, como calmarias, inversões térmicas ou queimadas, possam influenciar diretamente a concentração de poluentes em diferentes localidades. Estações em estados como Espírito Santo, Minas Gerais, Bahia e Paraná apresentaram sincronidades acima de 400 km para poluentes como CO e O_3 , alertando para uma possível necessidade de revisão na forma como políticas de controle da poluição são regionalmente planejadas devido à sincronicidade em grande distância.

Portanto, os resultados obtidos reforçam a importância da utilização de ferramentas estatísticas integradas para compreender a dinâmica espaço-temporal da qualidade do ar. Ao demonstrar que regiões do Brasil compartilham padrões de violação sincronizados, o estudo contribui para uma nova perspectiva sobre a gestão ambiental no país, com ênfase na

necessidade de abordagens inter-regionais, baseadas em dados históricos de monitoramento e que considerem a sinergia entre fatores climáticos e emissões locais.

Este trabalho fornece uma base técnica para o desenvolvimento de políticas públicas mais eficientes, bem como para a priorização de investimentos em monitoramento e controle da poluição atmosférica. Além disso, evidencia a urgência de expansão e de melhor distribuição da rede nacional de monitoramento, de forma a permitir diagnósticos mais precisos e inclusivos em todas as regiões do território brasileiro.

5.1 Contribuições do estudo

O estudo apresenta contribuições significativas para o entendimento da qualidade do ar no Brasil sob uma perspectiva nacional, integrando análises de tendências, sazonalidade e sincronicidade das violações dos padrões legais.

Dentre as contribuições do trabalho, destacam-se: a aplicação de métodos estatísticos consolidados como o teste de Mann-Kendall e o Índice de Sazonalidade de Markham (MSI) sobre um grande volume de dados e diversidade regional; a adaptação e implementação da metodologia de sincronicidade proposta por Berghuijs et al. (2019), originalmente usada em hidrologia, para o campo de qualidade do ar, fornecendo uma nova abordagem para a avaliação da influência espacial de eventos de poluição atmosférica; a geração de mapas e visualizações que facilitam a identificação de áreas críticas e padrões de violação, oferecendo suporte visual direto para formulação de políticas públicas; e a consolidação e padronização de uma base de dados ampla, com potencial de reaproveitamento para novos estudos acadêmicos.

5.2 Limitações

Apesar dos avanços e inovações metodológicas propostos, o estudo apresenta algumas limitações que devem ser levadas em consideração.

A cobertura geográfica das estações de monitoramento ainda é desigual no território brasileiro, com ausência ou baixa densidade em diversas regiões, especialmente no Norte e no interior do Nordeste. Isso compromete a representatividade espacial de algumas análises. Além disso, a heterogeneidade na qualidade e completude das séries temporais pode ter impactado a robustez de certos resultados, especialmente nas análises de tendência e sazonalidade.

As análises realizadas no estudo não contemplaram diretamente variáveis meteorológicas nos modelos estatísticos, o que poderia ter resultado em explicações melhores e mais bem fundamentadas para os padrões de concentração e violação observados.

A janela de sincronidade fixa num intervalo de 48h, apesar de justificada metodologicamente, pode não refletir a realidade de poluentes com maior persistência ou pode não ser bem representativa de eventos atmosféricos mais duradouros.

6 REFERÊNCIAS

BERGHUIJS, Wouter R. *et al.* Growing spatial scales of synchronous river flooding in Europe. *Geophysical Research Letters*, v. 46, n. 3, p. 1423–1428, fev. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2018GL081883>.

BEYER, H. Tukey, John W.: Exploratory data analysis. Addison-Wesley Publishing Company Reading, Mass. — Menlo Park, Cal., London, Amsterdam, Don Mills, Ontario, Sydney 1977, XVI, 688 S. *Biometrical Journal*, v. 23, n. 4, p. 413–414, jan. 1981. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/bimj.4710230408>.

BEZAK, Nejc *et al.* A first assessment of rainfall erosivity synchrony scale at pan-European scale. *CATENA*, v. 198, p. 105060, mar. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.105060>.

BOARI, Arthur *et al.* Air pollution trends and exceedances: ozone and particulate matter outlook in Brazilian highly urbanized zones. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 195, n. 9, p. 1058, ago. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11654-3>.

Brasil. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução CONAMA N° 506, de 5 de julho de 2024. Estabelece padrões nacionais de qualidade do ar e fornece diretrizes para sua aplicação. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/index.php?option=com_sisconama&view=atonormativo&id=756

CHAFFE, Pedro Luiz Borges; CHAGAS, Vinícius Bogo Portal. Sincronia das cheias no Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 24., 2021, Belo Horizonte, MG. Anais. Belo Horizonte, MG: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2021. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=13353>

EMBERSON, Lisa D. *et al.* Ozone effects on crops and consideration in crop models. *European Journal of Agronomy*, v. 100, p. 19–34, out. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.06.002>.

FURTADO, Marina; PEREIRA, Jaqueline; FORNARO, Adalgiza; VIEIRA-FILHO, Marcelo. Avaliação das espécies de nitrogênio na deposição atmosférica de Lavras, Minas Gerais. Lavras, MG, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/355793090_Avaliacao_das_especies_de_nitrogenio_na_deposicao_atmosferica_de_Lavras_Minhas_Gerais.

GÓMEZ PELÁEZ, Luisa María *et al.* Air quality status and trends over large cities in South America. *Environmental Science & Policy*, v. 114, p. 422–435, dez. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.09.009>.

IBARRA-ESPINOSA, Sergio *et al.* Atmospheric effects of air pollution during dry and wet periods in São Paulo. *Environmental Science: Atmospheres*, v. 2, n. 2, p. 215–229, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/D1EA00080B>.

KRECL, Patricia; CASTRO, Lizeth Bibiana *et al.* Spatio-temporal variability and trends of air pollutants in the Metropolitan Area of Curitiba. *Heliyon*, v. 10, n. 23, p. e40651, nov. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40651>.

KRECL, Patricia; TARGINO, Admir Créso *et al.* Detecting local and regional air pollution from biomass burning at a suburban site. *Atmospheric Environment*, v. 297, p. 119591, mar. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.119591>.

LI, Chi *et al.* Reversal of trends in global fine particulate matter air pollution. *Nature Communications*, v. 14, n. 1, p. 5349, set. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41086-z>.

LIN, Xinyuan *et al.* Spatiotemporal correlations of PM_{2.5} and O₃ variations: a street-scale perspective on synergistic regulation. *Science of The Total Environment*, v. 965, p. 178578, fev. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178578>.

MARKHAM, Charles G. Seasonality of precipitation in the United States. *Annals of the Association of American Geographers*, v. 60, n. 3, p. 593–597, set. 1970. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1467-8306.1970.tb00743.x>.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA. *Relatório Anual de Acompanhamento da Qualidade do Ar 2024*. Brasília, DF, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/qualidade-ambiental-e-meio-ambiente-urbano/relatorio-anual-de-acompanhamento-da-qualidade-do-ar-2024.pdf>

MONTE, Edson Zambon *et al.* Impactos das variáveis meteorológicas na qualidade do ar da região da Grande Vitória, Espírito Santo, Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 31, n. 4 suppl 1, p. 546–554, dez. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0102-7786312314b20150100>.

NARDOCCI, Adelaide Cassia *et al.* Poluição do ar e doenças respiratórias e cardiovasculares: estudo de séries temporais em Cubatão, São Paulo, Brasil. *Cadernos de Saúde Pública*, v. 29, n. 9, p. 1867–1876, set. 2013. Disponível em: <https://cadernos.ensp.fiocruz.br/ojs/index.php/csp/article/view/5224>.

OLVERA ALVAREZ, Hector A. *et al.* The value of using seasonality and meteorological variables to model intra-urban PM_{2.5} variation. *Atmospheric Environment*, v. 182, p. 1–8, jun. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.03.007>.

REQUIA, Weeberb J. *et al.* Short-term air pollution exposure and hospital admissions for cardiorespiratory diseases in Brazil: a nationwide time-series study between 2008 and 2018. *Environmental Research*, v. 217, p. 114794, jan. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114794>.

SANTOS, Fábio Soares dos *et al.* Avaliação da influência das condições meteorológicas na concentração de material particulado fino (MP_{2,5}) em Belo Horizonte, MG. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 24, p. 371–381, maio 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522019174045>.

XU, Yating *et al.* Increasing Risk of Synchronous Floods in the Yangtze River Basin from the Shift in Flood Timing. *Science of The Total Environment*, v. 921, p. 171167, abr. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171167>.

APÊNDICE A – Scripts em Python utilizados para realizar o tratamento, organização, modelagem, plotagem e cálculos realizados com os dados.

O repositório contendo os scripts utilizados para a manipulação dos dados e geração de todos os outputs utilizados no trabalho, além de visualizações gráficas e tabelas complementares às análises realizadas pode ser acessado através de: <https://github.com/Pdrowsky/TCC-qualidade-ar>.

O código, assim como todo o restante das saídas geradas e dos procedimentos utilizados pode ser reutilizado, melhorado e replicado livre de qualquer restrição para fins de estudo e de utilização como fonte de informação.

APÊNDICE B – Figuras e tabelas de estatísticas descritivas complementares às análises realizadas

Abaixo podem ser observadas as estações com maiores taxas de violação para SO_2 e $\text{MP}_{2,5}$ em comparação com PI-2 (padrão atualmente vigente):

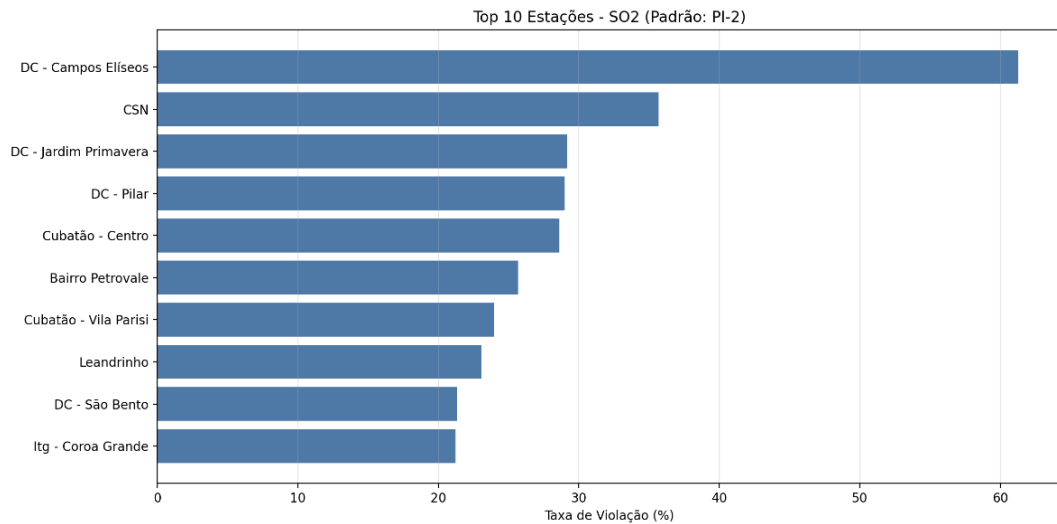


Figura B - 1 - Estações com maiores taxas de violação para SO_2 no padrão PI-2

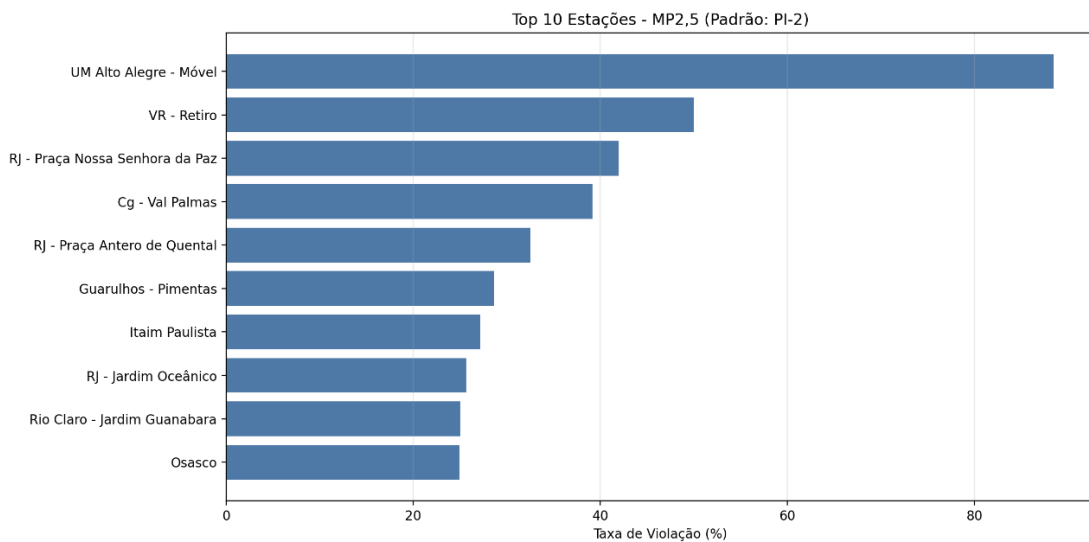


Figura B - 2 - Estações com maiores taxas de violação para $\text{MP}_{2,5}$ no padrão PI-2

Nessas estações a situação é mais crítica, sendo observado que uma grande parte das aferições violam os limites estabelecidos pela legislação para o padrão intermediário PI-2. O número de estações com taxas de violação mais elevadas é ainda mais acentuado conforme feito

comparativo frente aos padrões seguintes, com estações atingindo 100% de violações do PF, como é o caso de MP_{2,5} observado no gráfico a seguir:

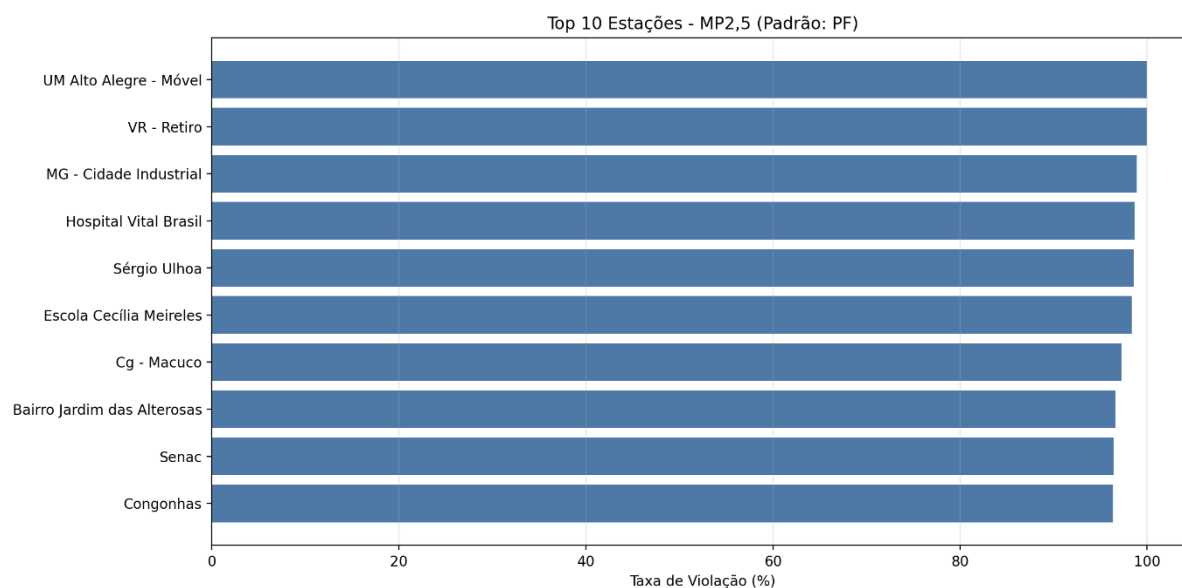


Figura B - 3 - Estações com maiores taxas de violação para MP_{2,5} no padrão PF

Abaixo podem ser observadas as tabelas (B1 à B6) contendo as inclinações (slope), direção da tendência, número de dias válidos para cálculo e o p-valor para cada um dos poluentes para as estações com tendência estatisticamente significativa ($p\text{-value} \leq 0,05$):

Tabela B - 1 - Inclinação, p-valor e dias com dados de cada estação para SO₂

| Estado | Estacao | Inclinação | p-valor | n_dias |
|--------|--------------------------------|--------------|-----------------|--------|
| MG | Bairro Petrovale | 0,048420394 | 0,0030969573732 | 92 |
| RJ | RJ - Manguinhos | 0,047754455 | 0,0230649907756 | 46 |
| PE | CPRH | 0,040040057 | 0,0000938043892 | 52 |
| RJ | Pref - Bangu | 0,039356729 | 0,0008010421493 | 57 |
| MG | Centro Administrativo | 0,032842805 | 0,0000069797820 | 88 |
| RJ | DC - São Bento | 0,028362900 | 0,0259074189504 | 94 |
| MG | Bairro Cascata | 0,025703586 | 0,0003738268547 | 84 |
| RJ | Pref - Tijuca | 0,016938460 | 0,0129867457037 | 70 |
| SP | Taubaté | 0,013970620 | 0,0004766396395 | 35 |
| PR | REPAR | 0,013868864 | 0,0489502385997 | 40 |
| MG | Bairro Piratininga | 0,008703302 | 0,0203485734258 | 93 |
| SP | Marg. Tietê - Pte dos Remédios | -0,005548108 | 0,0063218681817 | 94 |
| SP | Interlagos | -0,005920058 | 0,0360070457000 | 78 |
| SP | Cerqueira César | -0,008347867 | 0,0016505456443 | 92 |
| PE | Gaibu | -0,011797938 | 0,0026825179604 | 27 |

| | | | | |
|----|----------------------------|--------------|------------------|----|
| SP | Guarulhos - Pimentas | -0,011880971 | 0,0026854826829 | 84 |
| MG | Cariru | -0,013824317 | 0,0002193144751 | 91 |
| RJ | PR - Porto Real | -0,013910442 | 0,0003849720192 | 84 |
| MG | Cidade Nobre | -0,018045261 | 0,0000069261976 | 92 |
| SP | Congonhas | -0,020851384 | 0,0000001149830 | 83 |
| RJ | Itb - Porto das Caixas | -0,023025092 | 0,0001267642465 | 70 |
| SP | Paulínia | -0,027007751 | 0,0004757143215 | 80 |
| MG | Veneza | -0,027371304 | 0,0001698720683 | 64 |
| MG | Lobo Leite | -0,029549084 | 0,0098900424980 | 56 |
| SP | Paulínia - Santa Terezinha | -0,030581036 | 0,0301766428247 | 41 |
| SP | São Caetano do Sul | -0,034575107 | 0,0000000020938 | 87 |
| MG | Bom Retiro | -0,041509165 | 0,0000017594219 | 92 |
| ES | Jardim Camburi | -0,041849470 | 0,0000092614237 | 73 |
| ES | Cidade Continental | -0,044901097 | 0,0030012397055 | 32 |
| PE | IFPE | -0,068613864 | 0,0008932885855 | 52 |
| BA | Escola | -0,071071643 | 0,0309291487606 | 24 |
| ES | Vila Velha - Ibes | -0,073510293 | 0,0018550657621 | 58 |
| RJ | Qt - Bom Retiro | -0,076775546 | 0,0000001197414 | 82 |
| RJ | Mc - Cabiúnas | -0,081984164 | 0,0000000000450 | 84 |
| RJ | Sp - Piranema | -0,082074503 | 0,0000000016198 | 81 |
| BA | Cobre | -0,082181092 | 0,0395167129619 | 24 |
| SP | Cubatão - Vila Parisi | -0,084691424 | 0,0000100731920 | 91 |
| ES | Anchieta Centro | -0,087095146 | 0,0012261368449 | 72 |
| SP | Cubatão - Centro | -0,089091736 | 0,0000000170517 | 86 |
| MG | Basílica | -0,109308903 | 0,0000006091018 | 64 |
| SP | Santos - Ponta da Praia | -0,131624493 | 0,00000000000055 | 95 |
| RJ | Jp - Engenheiro Pedreira | -0,142353938 | 0,0000586907256 | 87 |
| ES | Laranjeiras | -0,167251616 | 0,0000000192195 | 55 |
| BA | Dique do Tororó | -0,194710563 | 0,0093747684594 | 8 |
| BA | Concórdia | -0,202504595 | 0,0026880064370 | 24 |
| BA | Av. ACM - DETRAN | -0,230644660 | 0,0354478925525 | 8 |
| RJ | Rs - Cidade Alegria | -0,272346581 | 0,0000000000131 | 80 |
| PE | Suape | -0,372307778 | 0,0335241652350 | 12 |
| RJ | Itg - Coroa Grande | -0,521551602 | 0,0117701645110 | 19 |

Tabela B - 2 - Inclinação, p-valor e dias com dados de cada estação para O₃

| Estado | Estacao | Inclinação | p-valor | n_dias |
|--------|-------------------------|-------------|-----------------|--------|
| RJ | Ma - Macuco | 1,916217002 | 0,0200446686226 | 10 |
| BA | Dique do Tororó | 1,806653466 | 0,0019817894378 | 8 |
| BA | Itaigara | 1,659285481 | 0,0068637949854 | 7 |
| RJ | SJB - Acú - 5º Distrito | 1,347517818 | 0,0000801670719 | 24 |
| BA | Machadinho | 0,679001532 | 0,0000000865024 | 36 |
| PR | Santa Cândida | 0,664385754 | 0,0173587879352 | 19 |

| | | | | |
|----|---------------------------------------|--------------|-----------------|----|
| MG | Basílica | 0,475497938 | 0,0000228411577 | 64 |
| MG | Lobo Leite | 0,399330740 | 0,0000403812541 | 58 |
| BA | Câmara | 0,394946017 | 0,0005687688682 | 36 |
| RJ | Pref - Centro | 0,339495222 | 0,0000000000051 | 76 |
| BA | Lamarão | 0,323067555 | 0,0000586534279 | 36 |
| PR | REPAR | 0,313379681 | 0,0000546024102 | 47 |
| SP | Itaquera | 0,288042062 | 0,0000000298752 | 82 |
| SP | Mooca | 0,287323318 | 0,0000000009587 | 88 |
| RJ | RJ - Campo dos Afonsos | 0,282277115 | 0,0290676443953 | 47 |
| RJ | Itg - Coroa Grande | 0,263436190 | 0,0005309937007 | 71 |
| ES | Vila Velha - Ibes | 0,240511683 | 0,0000160238266 | 68 |
| SP | Cid.Universitária USP - IPEN | 0,227774394 | 0,0000355760547 | 91 |
| SP | Araraquara | 0,223016163 | 0,0000071556951 | 90 |
| SP | Americana | 0,218044935 | 0,0362509069807 | 53 |
| RJ | Pref - Copacabana | 0,213301041 | 0,0000000428309 | 66 |
| ES | Belo Horizonte | 0,193172804 | 0,0009284895079 | 83 |
| SP | Itaim Paulista | 0,170301287 | 0,0000053618573 | 93 |
| PR | CSN | 0,156662588 | 0,0112248886277 | 58 |
| RJ | PR - Porto Real | 0,146616137 | 0,0069759089313 | 72 |
| SP | Limeira | 0,142932836 | 0,0056187567944 | 81 |
| SP | Parque Dom Pedro II | 0,137142413 | 0,0002515639215 | 93 |
| SP | Ibirapuera | 0,134179853 | 0,0003675913770 | 95 |
| RJ | Itb - Porto das Caixas | 0,130605728 | 0,0053881589951 | 94 |
| RJ | Pref - Tijuca | 0,118354264 | 0,0015648377821 | 77 |
| SP | Catanduva | 0,112554113 | 0,0076185061179 | 95 |
| RJ | Itb - Sambaetiba | 0,107814841 | 0,0150944274184 | 94 |
| SP | São José do Rio Preto | 0,104950978 | 0,0471811084568 | 78 |
| RJ | DC - Jardim Primavera | 0,104069813 | 0,0047724446834 | 88 |
| SP | Pinheiros | 0,095140399 | 0,0070416491330 | 92 |
| ES | Laranjeiras | 0,089041089 | 0,0297887144555 | 80 |
| SP | São José dos Campos - Jardim Satélite | 0,088764406 | 0,0328860212842 | 86 |
| SP | Araçatuba | 0,085832404 | 0,0402265064919 | 86 |
| MG | Bom Retiro | -0,071268624 | 0,0462224586326 | 95 |
| SP | Sorocaba | -0,079874135 | 0,0191761390196 | 90 |
| SP | Cubatão - Vale do Mogi | -0,083750132 | 0,0000072200571 | 88 |
| MG | Bairro Jardim das Alterosas | -0,085412631 | 0,0302608606545 | 91 |
| MG | Bairro Piratininga | -0,088917208 | 0,0365806843968 | 94 |
| SP | Grajaú - Parelheiros | -0,096936884 | 0,0204543353666 | 77 |
| MG | Bairro Petrovale | -0,098528074 | 0,0152019512617 | 89 |
| RJ | DC - Campos Elíseos | -0,116642352 | 0,0033661041623 | 95 |
| RJ | Pref - Bangu | -0,124088875 | 0,0375631688632 | 78 |
| RJ | SC - Adalgisa Nery | -0,135043672 | 0,0157494499718 | 77 |
| RJ | Mc - Fazenda Severina | -0,145165314 | 0,0480227873741 | 70 |

| | | | | |
|----|-------------------------|--------------|-----------------|----|
| RJ | VR - Retiro | -0,159040835 | 0,0000116875909 | 94 |
| RJ | DC - São Bento | -0,194199936 | 0,0000006217710 | 94 |
| RJ | Mt - Itacuruçá | -0,199221335 | 0,0003239013174 | 75 |
| PE | IFPE | -0,206982698 | 0,0053616087866 | 53 |
| RJ | VR - Santa Cecília | -0,228075854 | 0,0000000474621 | 92 |
| RJ | RJ - Manguinhos | -0,242214855 | 0,0238388910307 | 45 |
| RJ | VR - Belmonte | -0,275723205 | 0,0000000000003 | 95 |
| RJ | SC - Largo do Bodegão | -0,340959704 | 0,0027043696075 | 66 |
| MG | Escola Cecília Meireles | -0,358521336 | 0,0059388975328 | 47 |
| RJ | BR - São Bernardo | -0,373879252 | 0,0000208760418 | 45 |
| CE | CIPP | -0,392013596 | 0,0352047361188 | 27 |
| MG | PUC Barreiro | -0,433338277 | 0,0151832827402 | 43 |
| RJ | Cg - Macuco | -0,511303216 | 0,0153074607196 | 22 |
| PR | Londrina | -2,018441955 | 0,0356564176022 | 17 |

Tabela B - 3 - Inclinação, p-valor e dias com dados de cada estação para NO₂

| Estado | Estacao | Inclinação | p-valor | n_dias |
|--------|------------------------|--------------|-----------------|--------|
| BA | Rio Vermelho | 3,087908107 | 0,0093747684594 | 8 |
| RJ | RJ - Lab. INEA | 2,849371273 | 0,0467449410537 | 12 |
| BA | Av. Barros Reis | 2,331755079 | 0,0008366271311 | 8 |
| BA | Pirajá | 2,180767246 | 0,0019817894378 | 8 |
| BA | Av. ACM - DETRAN | 1,936233909 | 0,0354478925525 | 8 |
| BA | Campo Grande | 1,595387594 | 0,0187411367896 | 8 |
| RJ | RJ - Taquara | 1,384834286 | 0,0087061554524 | 13 |
| PR | Cascavel | 1,221537550 | 0,0085349204142 | 6 |
| RJ | BR - São Bernardo | 1,086039348 | 0,0004209318277 | 25 |
| PR | Praça Ouvidor Pardino | 1,074478465 | 0,0111748113274 | 12 |
| RJ | NI - Monteiro Lobato | 1,039679166 | 0,0467449410537 | 12 |
| BA | Dique do Tororó | 0,445006666 | 0,0187411367896 | 8 |
| SP | Congonhas | 0,141786776 | 0,0000551447635 | 87 |
| MG | Avenida Amazonas | 0,140109863 | 0,0103292582024 | 65 |
| PR | REPAR | 0,118072355 | 0,0238388910307 | 45 |
| ES | Anchieta Centro | 0,116463220 | 0,0000934192033 | 66 |
| ES | Jardim Camburi | 0,084933163 | 0,0000430181183 | 81 |
| BA | Machadinho | 0,076752976 | 0,0207439174201 | 34 |
| SP | Cubatão - Centro | 0,042075541 | 0,0279783307637 | 85 |
| RJ | Qt - Bom Retiro | 0,024721976 | 0,0095602166639 | 88 |
| MG | Cariru | -0,019541865 | 0,0043036766019 | 95 |
| RJ | Mc - Cabiúnas | -0,027113150 | 0,0000175069876 | 83 |
| SP | Taubaté | -0,035850997 | 0,0397287717866 | 80 |
| RJ | Mc - Pesagro | -0,043754997 | 0,0140687854054 | 60 |
| SP | Araraquara | -0,046152878 | 0,0329759095478 | 91 |
| RJ | Itb - Porto das Caixas | -0,046216227 | 0,0000005200546 | 90 |

| | | | | |
|----|--------------------------------|--------------|-----------------|----|
| SP | Marília | -0,047563003 | 0,0025250492632 | 83 |
| RJ | DC - Pilar | -0,048031503 | 0,0347542155980 | 96 |
| SP | Pico do Jaraguá | -0,049618645 | 0,0463406223039 | 66 |
| SP | São José dos Campos | -0,050949121 | 0,0182578833442 | 84 |
| SP | Guaratinguetá | -0,051561340 | 0,0446894450200 | 50 |
| RJ | Mc - Fazenda Severina | -0,053310083 | 0,0014732109342 | 61 |
| MG | Bom Retiro | -0,055144108 | 0,0000000048726 | 95 |
| RJ | DC - Jardim Primavera | -0,057693632 | 0,0084238455264 | 88 |
| MG | Bairro Piratininga | -0,058862227 | 0,0045723955076 | 95 |
| RJ | DC - Campos Elíseos | -0,063154626 | 0,0034516861757 | 84 |
| SP | Ibirapuera | -0,067388817 | 0,0213186734953 | 87 |
| SP | Jaú | -0,068628077 | 0,0005063811738 | 92 |
| SP | Pinheiros | -0,077888682 | 0,0373124841736 | 87 |
| SP | São Bernardo do Campo - Centro | -0,084157472 | 0,0048808096377 | 88 |
| PE | CPRH | -0,092781808 | 0,0152743170406 | 50 |
| SP | Campinas - Taquaral | -0,093136109 | 0,0067954209829 | 74 |
| SP | Parque Dom Pedro II | -0,094504075 | 0,0054153231457 | 90 |
| MG | Bairro Petrovale | -0,095718226 | 0,0000042950106 | 93 |
| RJ | Itg - Coroa Grande | -0,097291269 | 0,0000163317492 | 73 |
| SP | Cubatão - Vila Parisi | -0,101167657 | 0,0271617917550 | 92 |
| SP | Jacareí | -0,106939644 | 0,0185007236446 | 51 |
| RJ | Mt - Itacuruçá | -0,107213992 | 0,0000000001466 | 76 |
| CE | CIPP | -0,112609400 | 0,0091491475796 | 27 |
| SP | Cerqueira César | -0,115950383 | 0,0001446650740 | 93 |
| RJ | RJ - Ilha de Paqueta | -0,135325744 | 0,0036468419609 | 53 |
| RJ | Pref - Campo Grande | -0,143399897 | 0,0007323058737 | 62 |
| BA | Gravatá | -0,152808973 | 0,0052337511293 | 36 |
| RJ | SC - Adalgisa Nery | -0,175749123 | 0,0000051736848 | 68 |
| RJ | Pref - Irajá | -0,181511451 | 0,0004774930060 | 65 |
| SP | São Caetano do Sul | -0,188232268 | 0,0000000103451 | 93 |
| RJ | Itg - Monte Serrat | -0,195584701 | 0,0000000000001 | 93 |
| RJ | Pref - Tijuca | -0,299741986 | 0,0028758419357 | 57 |
| RJ | SJB - Barra do Açu | -0,340212702 | 0,0005320055051 | 15 |
| PE | Gaibu | -0,395587470 | 0,0000888363404 | 27 |
| RJ | RJ - Engenhão | -0,523736253 | 0,0397373957867 | 39 |
| BA | Câmara | -0,621747581 | 0,0000138871300 | 35 |
| BA | Malembá | -0,652827667 | 0,0124822265845 | 20 |
| RJ | RJ - Campo dos Afonsos | -0,989853455 | 0,0424416762700 | 19 |

Tabela B - 4 - Inclinação, p-valor e dias com dados de cada estação para MP_{2,5}

| Estado | Estacao | Inclinação | p-valor | n_dias |
|--------|-------------|-------------|------------------|--------|
| MG | Panorama | 0,924351445 | 0,01237158120452 | 13 |
| RJ | Cg - Macuco | 0,449587549 | 0,00097034888819 | 24 |

| | | | | |
|----|--------------------------------|--------------|------------------|----|
| MG | Matriz | 0,358114697 | 0,00003970701377 | 46 |
| MG | Volta da Capela | 0,234178198 | 0,02094093367374 | 19 |
| MG | PUC Barreiro | 0,195814120 | 0,00010390213977 | 50 |
| MG | Sapo | 0,172540824 | 0,00000120146098 | 56 |
| MG | MG - Cidade Industrial | 0,151055562 | 0,00024937865775 | 43 |
| MG | Escola Municipal Filhinha Gama | 0,107207904 | 0,00224722224047 | 61 |
| MG | Nova Plataforma | 0,098711115 | 0,03918554717058 | 40 |
| MG | Centro - Av. do Contorno | 0,064773227 | 0,00360109573382 | 85 |
| MG | Bom Retiro | 0,020950355 | 0,04153199477785 | 85 |
| ES | Vila Velha - Ibes | -0,031777887 | 0,00661585427551 | 54 |
| SP | São Bernardo do Campo - Centro | -0,035008994 | 0,01033731253131 | 91 |
| SP | Ibirapuera | -0,041133631 | 0,02335163411390 | 84 |
| SP | Congonhas | -0,045521804 | 0,00506614240866 | 92 |
| SP | Santos - Ponta da Praia | -0,051845280 | 0,00000068259604 | 96 |
| SP | Pico do Jaraguá | -0,052326981 | 0,00657896549454 | 72 |
| SP | Guarulhos - Pimentas | -0,062783237 | 0,02225452427387 | 79 |
| SP | Grajaú - Parelheiros | -0,064856400 | 0,00135514222884 | 88 |
| MG | Jardim Encantado | -0,071549212 | 0,00635615898721 | 73 |
| SP | São Caetano do Sul | -0,072918944 | 0,03286940171754 | 54 |
| SP | Itaim Paulista | -0,080628133 | 0,01031023553973 | 70 |
| MG | Sérgio Ulhoa | -0,096212867 | 0,00296065167434 | 79 |
| MG | Escola Cecília Meireles | -0,237888450 | 0,03451974428667 | 28 |
| MG | Senac | -0,442434101 | 0,00087560607242 | 23 |
| MG | Sementinha | -0,457275887 | 0,01236233278009 | 27 |
| RJ | Cg - Val Palmas | -0,588442493 | 0,00000705715033 | 32 |
| RJ | RJ - Manguinhos | -1,298061811 | 0,01626093678045 | 7 |

Tabela B - 5 - Inclinação, p-valor e dias com dados de cada estação para MP₁₀

| Estado | Estacao | Inclinação | p-valor | n_dias |
|--------|--------------------|-------------|------------------|--------|
| PR | Foz do Iguaçu | 84,18200845 | 0,00079505254834 | 9 |
| BA | Av. Barros Reis | 2,65325242 | 0,00443400830310 | 8 |
| RJ | RJ - Manguinhos | 1,22432870 | 0,00000084738851 | 30 |
| BA | Paralela - CAB | 1,12280084 | 0,00937476845943 | 8 |
| RJ | Sp - Piranema | 0,92032338 | 0,00154460835639 | 58 |
| RJ | Cg - Macuco | 0,59132479 | 0,00026609796275 | 24 |
| PE | Ipojuca | 0,45269227 | 0,00000089425800 | 32 |
| BA | Malembá | 0,44336482 | 0,00858917924581 | 20 |
| MG | Lobo Leite | 0,43880646 | 0,00009069941098 | 61 |
| PE | CPRH | 0,41848892 | 0,00048406903355 | 44 |
| PE | Gaibu | 0,38610475 | 0,02183878958420 | 27 |
| MG | Rio Doce | 0,36212287 | 0,00069061920247 | 33 |
| MG | Santana do Deserto | 0,20772167 | 0,00276149957458 | 43 |
| MG | Volta da Capela | 0,19893949 | 0,00016970237779 | 63 |

| | | | | |
|----|--------------------------------|-------------|------------------|----|
| MG | Escola Municipal Filhinha Gama | 0,17443724 | 0,00428669703268 | 64 |
| MG | Paracatu de Baixo | 0,16976132 | 0,02688923233442 | 48 |
| MG | Sementinha | 0,16422992 | 0,00000390296573 | 93 |
| MG | SAAE | 0,15487220 | 0,00646186101471 | 60 |
| MG | Aeroporto CMD | 0,15090982 | 0,00788179227895 | 69 |
| MG | Aeroporto CMD | 0,14570428 | 0,00788179227895 | 69 |
| MG | Centro - Av. do Contorno | 0,10374388 | 0,00271368563115 | 94 |
| ES | Vila Velha - Centro | 0,10284460 | 0,00441656925801 | 36 |
| MG | Félix | 0,10202641 | 0,00435583634740 | 82 |
| BA | Gravatá | 0,08174101 | 0,01984990813576 | 36 |
| RJ | PR - Porto Real | 0,05501182 | 0,00001042086696 | 92 |
| ES | Anchieta Centro | -0,04954151 | 0,00095309549615 | 90 |
| SP | Cubatão - Centro | -0,05527414 | 0,01844036886380 | 89 |
| SP | Campinas - Centro | -0,06855809 | 0,00093674252554 | 93 |
| ES | Vila Velha - Ibes | -0,07217753 | 0,00000114393347 | 80 |
| SP | Santo André - Capuava | -0,07283196 | 0,00467534700096 | 94 |
| RJ | Itg - Monte Serrat | -0,07444826 | 0,03368088879994 | 96 |
| MG | Sapo | -0,07532803 | 0,01676172696611 | 67 |
| SP | Diadema | -0,07677951 | 0,00164397181023 | 86 |
| RJ | Itt - Campo Alegre | -0,07887604 | 0,00336610416228 | 95 |
| SP | Sorocaba | -0,08628765 | 0,00076058776882 | 90 |
| RJ | DC - Pilar | -0,09354671 | 0,02360957751628 | 95 |
| RJ | VR - Santa Cecília | -0,09451959 | 0,00232396112499 | 80 |
| RJ | Pref - Tijuca | -0,10495939 | 0,00014172349394 | 84 |
| SP | Santos - Ponta da Praia | -0,10501564 | 0,00056773646199 | 95 |
| RJ | Pref - Campo Grande | -0,10700484 | 0,00188829926933 | 79 |
| RJ | VR - Belmonte | -0,11186399 | 0,02242538921986 | 84 |
| SP | Santo Amaro | -0,11481395 | 0,00015639200249 | 88 |
| SP | Grajaú - Parelheiros | -0,11722746 | 0,00233227788595 | 91 |
| RJ | DC - Jardim Primavera | -0,12294028 | 0,04469859251088 | 88 |
| RJ | Itg - Coroa Grande | -0,12392656 | 0,00000000001966 | 92 |
| MG | Centro Administrativo | -0,12473905 | 0,02664907022252 | 90 |
| MG | São Domingos | -0,12718331 | 0,01880320057407 | 85 |
| RJ | SC - Adalgisa Nery | -0,14266259 | 0,00119297131645 | 83 |
| MG | Córregos | -0,14266586 | 0,00341972720246 | 68 |
| SP | São Caetano do Sul | -0,14944049 | 0,00000450541958 | 90 |
| MG | Clube da União | -0,15766650 | 0,02762482869879 | 66 |
| MG | Bairro Petrovale | -0,16392564 | 0,00000008380440 | 96 |
| RJ | DC - São Bento | -0,16783871 | 0,00005679807607 | 93 |
| SP | Cubatão - Vale do Mogi | -0,17591155 | 0,00000116666274 | 95 |
| ES | Jardim Camburi | -0,17985378 | 0,00000871381130 | 59 |
| RJ | RJ - Ilha do Governador | -0,18387360 | 0,00011586023293 | 74 |
| ES | Cariacica | -0,18876654 | 0,02640480461887 | 36 |

| | | | | |
|----|-----------------------------|--------------|------------------|----|
| MG | Comunidade do Feijão | -0,19551893 | 0,00166041731067 | 80 |
| RJ | DC - Vila São Luiz | -0,22242412 | 0,00000416031447 | 93 |
| MG | Bairro Jardim das Alterosas | -0,22775170 | 0,00000045022230 | 91 |
| MG | Bairro Cascata | -0,23644819 | 0,00000007831050 | 86 |
| MG | Avenida Amazonas | -0,23775841 | 0,00000651581504 | 57 |
| SP | Cubatão - Vila Parisi | -0,23982840 | 0,00018077429490 | 96 |
| RJ | Itb - Porto das Caixas | -0,24102081 | 0,00000000025570 | 94 |
| RJ | BM - Sesi | -0,24266205 | 0,00000447068470 | 81 |
| ES | Laranjeiras | -0,32782987 | 0,00000257447841 | 53 |
| RJ | SC - Largo do Bodegão | -0,33337631 | 0,00000948484578 | 72 |
| RJ | Cg - Val Palmas | -0,39873741 | 0,00000000000100 | 68 |
| RJ | RJ - Engenho | -1,51769061 | 0,01753070337305 | 15 |
| RJ | RJ - Lourenço Jorge | -1,69202765 | 0,00062854474892 | 17 |
| PR | Cascavel | -63,99068577 | 0,03182312738649 | 10 |

Tabela B - 6 - Inclinação, p-valor e dias com dados de cada estação para CO

| Estado | Estacao | Inclinação | p-valor | n_dias |
|--------|-------------------------------|--------------|------------------|--------|
| RJ | RJ - Centro | 0,044159644 | 0,00000069471368 | 22 |
| RJ | RJ - Lourenço Jorge | 0,025768564 | 0,00001513751580 | 28 |
| PR | PETROSIX | 0,025116294 | 0,04760395472787 | 9 |
| PE | CPRH | 0,016717569 | 0,00043747223642 | 43 |
| MG | PUC São Gabriel | 0,015169859 | 0,00000653325149 | 42 |
| RJ | SJB - Mato Escuro 5º Distrito | 0,014614303 | 0,00026609796275 | 24 |
| PE | Ipojuca | 0,009059535 | 0,00000034158769 | 31 |
| RJ | SG - UERJ | 0,007340424 | 0,00051404671783 | 36 |
| RJ | SC - Adalgisa Nery | 0,006767376 | 0,00504107709688 | 80 |
| RJ | Sp - Piranema | 0,004883354 | 0,00000065683216 | 76 |
| MG | Bairro Piratininga | 0,004720432 | 0,00000000000000 | 95 |
| RJ | Mc - Fazenda Aires | 0,004429817 | 0,00474746117632 | 83 |
| SP | Ribeirão Preto | 0,003444931 | 0,00171096960340 | 47 |
| MG | Bairro Petrovale | 0,003052924 | 0,00005536927610 | 95 |
| RJ | RJ - Ilha de Paquetá | 0,003032780 | 0,00000208638550 | 63 |
| MG | PUC Barreiro | 0,002861813 | 0,01547788965407 | 47 |
| MG | Bairro Cascata | 0,002302185 | 0,00000012303935 | 86 |
| RJ | DC - Campos Elíseos | 0,002295254 | 0,00000071149602 | 94 |
| RJ | Qt - Bom Retiro | 0,002189982 | 0,00000129438954 | 94 |
| MG | Centro - Av. do Contorno | 0,002044144 | 0,00000020586842 | 93 |
| ES | Belo Horizonte | 0,001656779 | 0,00374971129874 | 77 |
| ES | Cariacica | 0,001144825 | 0,00989004249801 | 56 |
| RJ | VR - Santa Cecília | 0,001107014 | 0,01244579979358 | 92 |
| ES | Laranjeiras | -0,000408714 | 0,00163514469292 | 93 |
| RJ | Pref - Copacabana | -0,000556765 | 0,00101168163051 | 66 |
| MG | Cidade Nobre | -0,000686702 | 0,01480809510174 | 95 |

| | | | | |
|----|---------------------------------------|--------------|------------------|----|
| RJ | NI - Jardim Guandu | -0,000905208 | 0,02770301130990 | 94 |
| MG | Cariru | -0,001037182 | 0,00139443700461 | 95 |
| RJ | Jp - Engenheiro Pedreira | -0,001126444 | 0,00000000037353 | 94 |
| RJ | Pref - Tijuca | -0,001144481 | 0,00068051169554 | 81 |
| MG | Bairro Jardim das Alterosas | -0,001164780 | 0,02162575310489 | 92 |
| RJ | Pref - São Cristovão | -0,001210903 | 0,00037008490586 | 80 |
| RJ | Itb - Sambaetiba | -0,001260595 | 0,01680665969352 | 94 |
| MG | Lobo Leite | -0,001341982 | 0,04576485819600 | 61 |
| RJ | DC - Vila São Luiz | -0,001480715 | 0,00003395012632 | 93 |
| SP | São Bernardo do Campo - Centro | -0,001589202 | 0,00057438836233 | 90 |
| SP | Congonhas | -0,001930290 | 0,02907942625890 | 85 |
| RJ | RJ - Ilha do Governador | -0,002076914 | 0,00043663173953 | 69 |
| RJ | VR - Belmonte | -0,002103608 | 0,00039797243941 | 87 |
| SP | Pinheiros | -0,002133342 | 0,02856000355317 | 80 |
| SP | Cerqueira César | -0,002154115 | 0,00000465820245 | 90 |
| SP | Santo Amaro | -0,002297610 | 0,00417234260871 | 78 |
| BA | Leandrinho | -0,002298958 | 0,04525554618596 | 36 |
| PR | REPAR | -0,002309686 | 0,00125336271661 | 44 |
| SP | Parque Dom Pedro II | -0,002381980 | 0,00003557605473 | 91 |
| SP | Campinas - Centro | -0,002518319 | 0,00000000047936 | 91 |
| SP | Guarulhos - Pimentas | -0,002650374 | 0,01473002550094 | 38 |
| SP | São Caetano do Sul | -0,003045258 | 0,00030127760567 | 93 |
| SP | Mooca | -0,003106494 | 0,00002350403586 | 82 |
| SP | Marg. Tietê - Pte dos Remédios | -0,003332636 | 0,00010287671202 | 77 |
| RJ | Mc - Pesagro | -0,004016749 | 0,00126279857563 | 70 |
| SP | São José dos Campos - Jardim Satélite | -0,004208649 | 0,00000000000287 | 82 |
| SP | Santo André - Paço Municipal | -0,004320183 | 0,00591065927765 | 42 |
| RJ | Itb - Porto das Caixas | -0,004422145 | 0,00000037774658 | 95 |
| SP | Osasco | -0,004513818 | 0,00000002385939 | 95 |
| PE | IFPE | -0,005435216 | 0,00000002245434 | 53 |
| SP | Grajaú - Parelheiros | -0,005734763 | 0,00000034388796 | 67 |
| BA | Malembá | -0,006486856 | 0,01248222658445 | 20 |
| RJ | SJB - Acú - 5º Distrito | -0,008397216 | 0,00589998362460 | 24 |
| BA | Gravatá | -0,009128086 | 0,00168935460931 | 30 |
| RJ | Mc - Fazenda Severina | -0,010027287 | 0,00000000057152 | 72 |
| RJ | RJ - Taquara | -0,012164467 | 0,00189281948588 | 16 |
| RJ | SJB - Barra do Açu | -0,023816735 | 0,00410140086190 | 15 |
| BA | Paralela - CAB | -0,033802086 | 0,01874113678960 | 8 |
| ES | Linhares 2 | -0,110375327 | 0,00012756912052 | 50 |

APÊNDICE C – Mapas de concentração, tendência, violações e sincronicidade dos poluentes com diferentes focos

A sincronicidade por estado para os poluentes MP_{10} , O_3 , SO_2 e $MP_{2,5}$ podem ser observadas nas figuras C1, C2, C3 e C4, respectivamente:

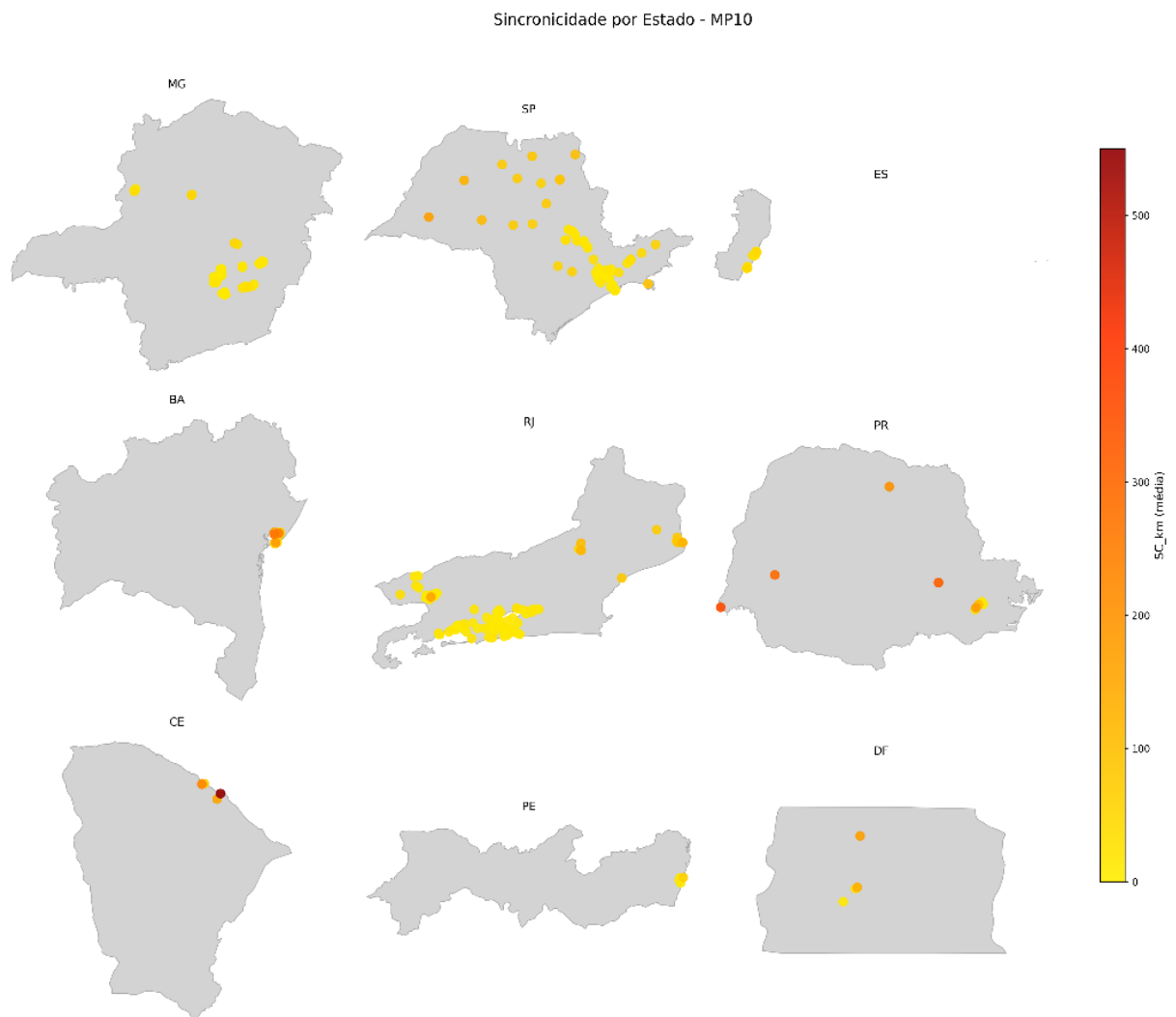
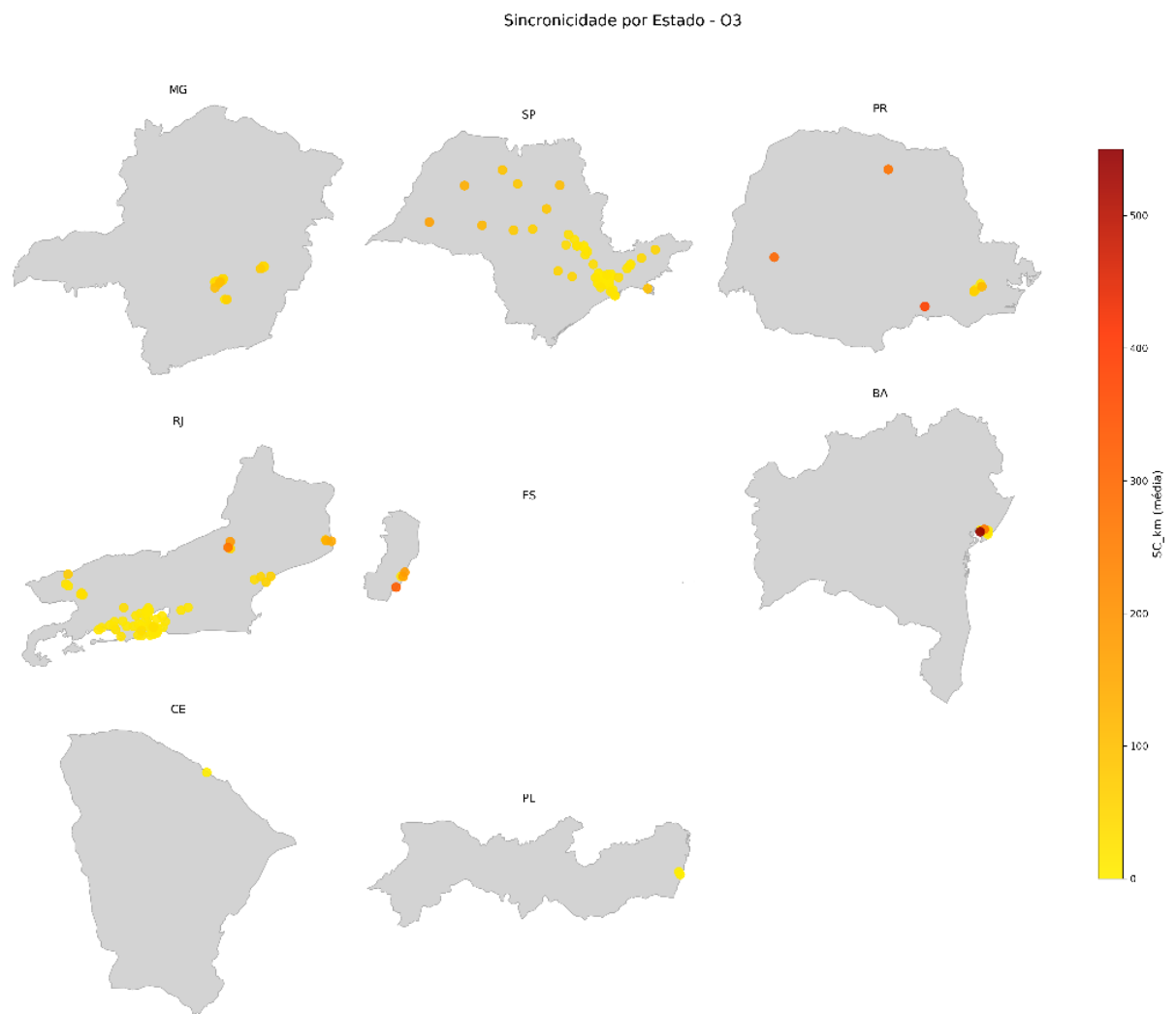
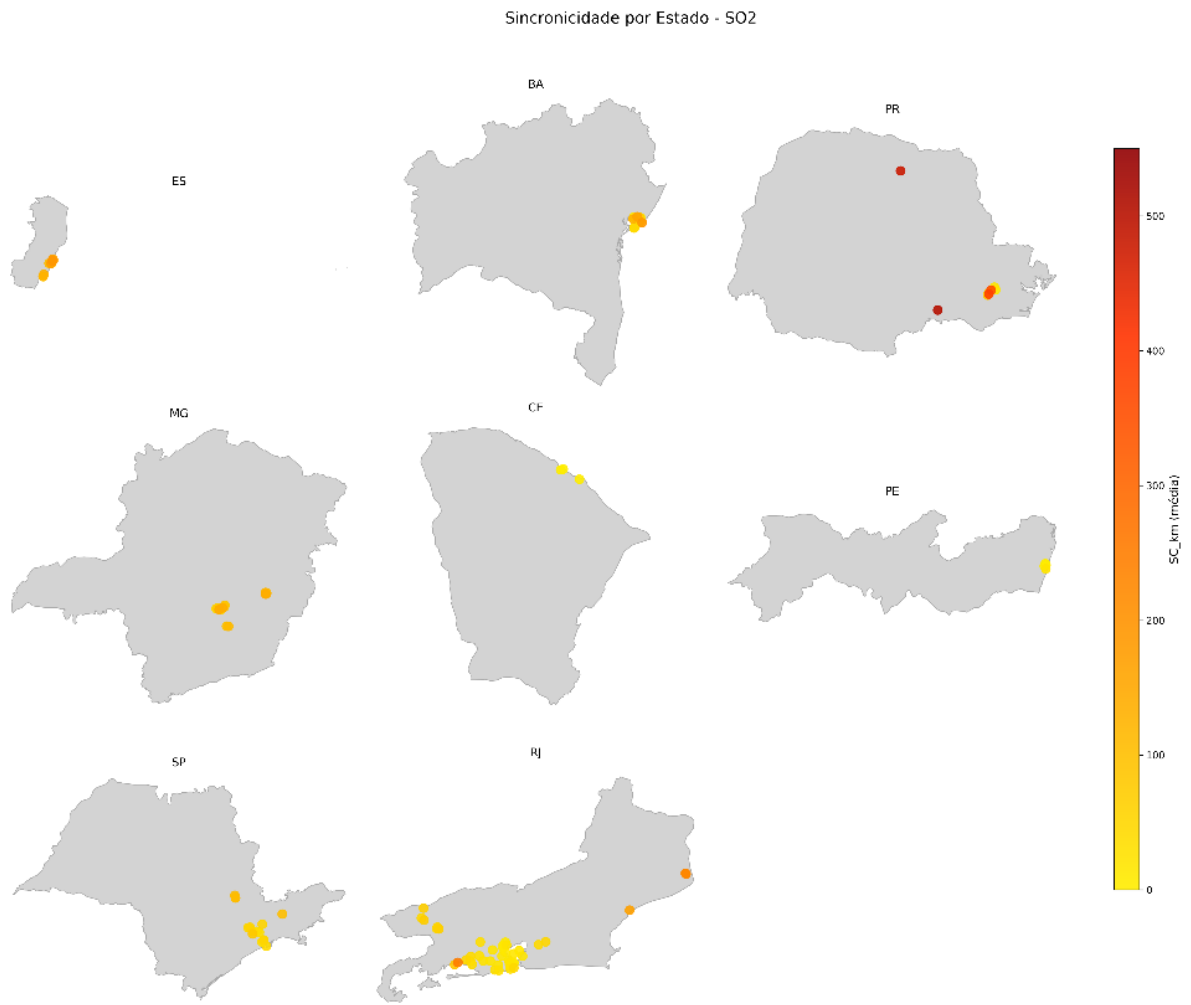


Figura C - 1 - Sincronicidade de MP_{10} por estado

Figura C - 2 - Sincronicidade O₃ por estado

Figura C - 3 - Sincronicidade de SO₂ por estado

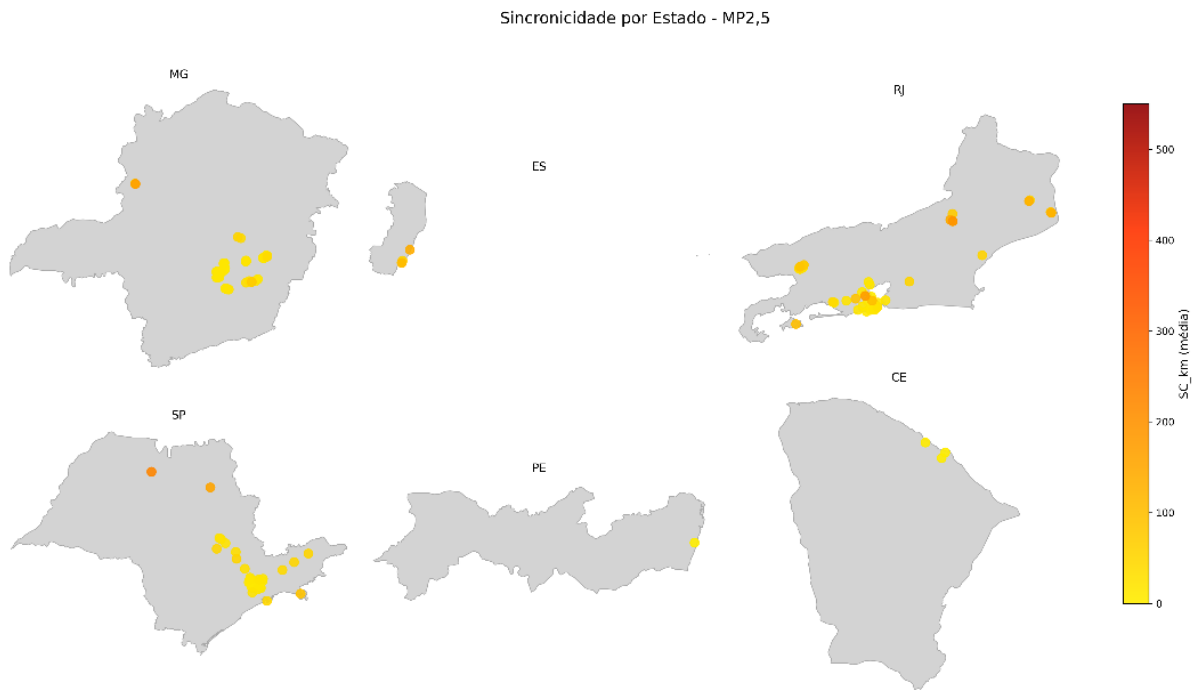


Figura C - 4 - Sincronicidade de MP_{2,5} por estado