

Uso do sensor TROPOMI na detecção de poluentes atmosféricos originados em incêndios florestais que se movimentam para o Sul do Brasil

Luana Pasquetti

Mestranda em Arquitetura e Urbanismo, ATITUS Educação, Brasil

luanapasquetti@gmail.com

ORCID iD: 0009-0002-5539-5786

Guilherme Peterle Schmitz

Doutorando em Arquitetura e Urbanismo, ATITUS Educação, Brasil.

guilhermepeterle99@gmail.com

ORCID iD: 0009-0005-0457-6394

Alcindo Neckel

Professor Doutor, ATITUS Educação, Brasil.

alcindo.neckel@atitus.edu.br

ORCID iD: 0000-0001-5435-3096

Caliane Christie Oliveira de Almeida Silva

Professora Doutora, ATITUS Educação, Brasil.

caliane.silva@atitus.edu.br

ORCID iD: 0000-0002-8477-389X

Grace Tibério Cardoso

Professora Doutora, ATITUS Educação, Brasil.

grace.cardoso@atitus.edu.br

ORCID iD: 0000-0002-1779-4631

Submissão: 13/11/2024

Aceite: 19/07/2025

PASQUETTI, Luana; SCHMITZ, Guilherme Peterle; NECKEL, Alcindo; SILVA, Caliane Christie Oliveira de Almeida; CARDOSO, Grace Tibério. Uso do sensor TROPOMI na detecção de poluentes atmosféricos originados em incêndios florestais que se movimentam para o Sul do Brasil. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, [S. l.], v. 21, n. 2, 2025. DOI: [10.17271/1980082721220225876](https://doi.org/10.17271/1980082721220225876). Disponível

em: https://publicacoes.amigosdanatureza.org.br/index.php/forum_ambiental/article/view/5876.

Licença de Atribuição CC BY do Creative Commons <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Uso do sensor TROPOMI na detecção de poluentes atmosféricos originados em incêndios florestais que se movimentam para o Sul do Brasil

RESUMO

Objetivo - O objetivo geral deste estudo é quantificar a poluição atmosférica no Estado do Rio Grande do Sul (Brasil), durante o período de janeiro de 2021 a setembro de 2024.

Metodologia - Foi utilizado o método qualitativo quantitativo, combinando análise ambiental e Sensoriamento Remoto em relação a disponibilização das imagens, utilizando o satélite Sentinel-5P acoplado ao TROPospheric Monitoring Instrument (TROPOMI) de domínio da Agência Espacial Europeia (ESA) para análise dos poluentes atmosféricos. Bem como o processamento das imagens coletadas pelos softwares SNAP (Sentinel Application Platform) e QGIS (Quantum GIS), além da geração de planilhas de dados aplicada à metodologia de agrupamento K-means no software JASP (versão 0.18.3.0).

Originalidade/relevância - contribuir com a criação de políticas públicas ambientais voltadas à mitigação dos níveis de poluição atmosférica.

Resultados - Os resultados demonstram níveis de CO de 0,0244 mol/m², revela-se que no dia 11 de setembro de 2024 foram ≈5,9 vezes (490,16%) maiores do que os níveis médios normais. Os níveis de NO₂ de 2024 atingiu um valor de 1.11E-5 mol/m², originando-se níveis ≈6,65 vezes (565,76%) maiores que os níveis médios decorrentes registrados.

Contribuições teóricas/metodológicas - O presente estudo contribui teoricamente ao aprofundar a compreensão sobre a aplicação de técnicas de Sensoriamento Remoto na análise da poluição atmosférica em escala regional. Metodologicamente, destaca-se pela integração de diferentes ferramentas analíticas e computacionais — como o uso conjunto dos softwares SNAP, QGIS e JASP — e pela adoção do algoritmo de agrupamento K-means como técnica estatística para a interpretação de dados ambientais. Essa abordagem interdisciplinar oferece um modelo replicável de monitoramento ambiental que pode ser adaptado a outras regiões e contextos de estudo.

Contribuições sociais e ambientais - o estudo fornece dados concretos e atualizados sobre os níveis de poluentes atmosféricos no Estado do Rio Grande do Sul, fortalecendo a base científica necessária para a formulação de políticas públicas ambientais. Ao evidenciar picos críticos de poluição e sua variação temporal, a pesquisa subsidia ações de mitigação voltadas à saúde pública, controle de emissões e gestão territorial sustentável. Além disso, estimula a conscientização da população e dos gestores sobre os impactos da poluição atmosférica, promovendo práticas voltadas ao desenvolvimento sustentável.

PALAVRAS-CHAVE: Qualidade do ar. Poluição atmosférica. Incêndios florestais.

Using the TROPOMI sensor to detect atmospheric pollutants originating from forest fires moving towards southern Brazil

ABSTRACT

Objective - The general objective of this study is to quantify air pollution in the State of Rio Grande do Sul (Brazil), during the period from January 2021 to September 2024.

Methodology - The quantitative qualitative method was used, combining environmental analysis and Remote Sensing in relation to the availability of images, using the Sentinel-5P satellite coupled to the TROPospheric Monitoring Instrument (TROPOMI) under the domain of the European Space Agency (ESA) to analyze atmospheric pollutants. As well as the processing of the images collected using the SNAP (Sentinel Application Platform) and QGIS (Quantum GIS) software, in addition to the generation of data sheets applied to the K-means clustering methodology in the JASP software (version 0.18.3.0).

Originality/relevance - to contribute to the creation of public environmental policies aimed at mitigating atmospheric pollution levels.

Results - The results show that CO levels of 0.0244 mol/m² on September 11, 2024 were ≈5.9 times (490.16%) higher than normal average levels. NO₂ levels in 2024 reached a value of 1.11E-5 mol/m², giving rise to levels ≈6.65 times (565.76%) higher than the average levels recorded.

Theoretical/methodological contributions - This study contributes theoretically by deepening our understanding of the application of remote sensing techniques in the analysis of atmospheric pollution on a regional scale. Methodologically, it stands out for its integration of different analytical and computational tools - such as the joint use of SNAP, QGIS and JASP software - and for its adoption of the K-means clustering algorithm as a statistical technique for interpreting environmental data. This interdisciplinary approach offers a replicable environmental monitoring model that can be adapted to other regions and study contexts.

Social and environmental contributions - the study provides concrete, up-to-date data on the levels of atmospheric pollutants in the state of Rio Grande do Sul, strengthening the scientific basis needed to formulate public environmental policies. By highlighting critical pollution peaks and their temporal variation, the research supports mitigation actions aimed at public health, emissions control and sustainable land management. It also stimulates awareness among the population and managers about the impacts of air pollution, promoting practices aimed at sustainable development.

KEYWORDS: Air quality. Atmospheric pollution. Forest fires.

Uso del sensor TROPOMI para detectar contaminantes atmosféricos procedentes de incendios forestales que se desplazan hacia el sur de Brasil

RESUMEN

Objetivo - El objetivo general de este estudio es cuantificar la contaminación atmosférica en el Estado de Rio Grande do Sul (Brasil), durante el período comprendido entre enero de 2021 y septiembre de 2024.

Metodología - Se utilizó el método cualitativo cuantitativo, combinando el análisis ambiental y la Teledetección en relación a la disponibilidad de imágenes, utilizando el satélite Sentinel-5P acoplado al TROPospheric Monitoring Instrument (TROPOMI), de dominio de la Agencia Espacial Europea (ESA), para analizar los contaminantes atmosféricos. Así como el procesamiento de las imágenes recogidas mediante el software SNAP (Sentinel Application Platform) y QGIS (Quantum GIS), además de la generación de hojas de datos aplicadas a la metodología de clustering K-means en el software JASP (versión 0.18.3.0).

Originalidad/Relevancia - Contribuir a la creación de políticas públicas ambientales destinadas a mitigar los niveles de contaminación atmosférica.

Resultados - Los resultados muestran que los niveles de CO de 0,0244 mol/m² el 11 de septiembre de 2024 fueron ≈5,9 veces (490,16%) superiores a los niveles medios normales. Los niveles de NO₂ en 2024 alcanzaron un valor de 1,11E-5 mol/m², dando lugar a niveles ≈6,65 veces (565,76%) superiores a los niveles medios registrados.

Aportaciones teóricas/metodológicas - Este estudio contribuye teóricamente al profundizar en el conocimiento de la aplicación de las técnicas de teledetección en el análisis de la contaminación atmosférica a escala regional. Metodológicamente, destaca por la integración de diferentes herramientas analíticas y computacionales -como el uso conjunto de los softwares SNAP, QGIS y JASP- y por la adopción del algoritmo de agrupamiento K-means como técnica estadística para la interpretación de datos ambientales. Este enfoque interdisciplinar ofrece un modelo de vigilancia ambiental replicable que puede adaptarse a otras regiones y contextos de estudio.

Contribuciones sociales y ambientales - el estudio proporciona datos concretos y actualizados sobre los niveles de contaminantes atmosféricos en el estado de Rio Grande do Sul, fortaleciendo la base científica necesaria para formular políticas públicas ambientales. Al destacar los picos críticos de contaminación y su variación temporal, la investigación subvenciona acciones de mitigación dirigidas a la salud pública, el control de emisiones y la gestión territorial sostenible. También estimula la concienciación de la población y de los gestores sobre los impactos de la contaminación atmosférica, promoviendo prácticas orientadas al desarrollo sostenible.

PALABRAS CLAVE: Calidad del aire. Contaminación atmosférica. Incendios forestales.

RESUMO GRÁFICO



1 INTRODUÇÃO

Os poluentes atmosféricos originados de queimadas e de outras fontes poluidoras potencializam alterações significativas no ambiente por grandes regiões geográficas, agravando-se nos últimos anos em decorrência das ações humanas intensificadas, por liberação de elementos químicos gasosos, capazes de ameaçar a qualidade do ar em escala global (Bodah *et al.*, 2022). Estes quantitativos de poluentes emitidos para a atmosfera, também se originam diariamente de indústrias, veículos motorizados devido à queima de combustíveis fósseis, atividades agrícolas e agropecuárias, sem deixar de considerar as causas naturais por erupções vulcânicas e incêndios (Kuśmierczyk-Michulec; Baré, 2024).

Sun *et al.* (2021) e Fadairo *et al.* (2024) enfatizam que os materiais emitidos para atmosfera se caracterizam como: material particulado (MP), monóxido de carbono (CO), dióxido de enxofre (SO₂), hidrocarbonetos (HC), óxido de nitrogênio (NO), dióxido de carbono (CO₂) e dióxido de nitrogênio (NO₂). Estes poluentes químicos gasosos contêm majoritariamente partículas ultrafinas que impactam nocivamente a saúde humana e a qualidade do ambiente. Tais contaminantes atmosféricos são responsáveis por 99% da população global respirarem um ar contaminado, conforme dados da Organização Mundial da Saúde (OMS, 2021). Estes poluentes atmosféricos foram analisados de forma quantitativa em 117 países do mundo pela Organização, atestando que afetam a saúde humana global, além de contribuir para a diminuição da qualidade de vida populacional de uma maneira geral (OMS, 2021).

Mais precisamente, convém lembrar que a OMS, em seu relatório de 2021, estimou que cerca de 7 milhões de vidas prematuras foram perdidas devido à poluição do ar (OMS, 2021). Tais contaminantes são formados por micropartículas - menores que 2,5 micrômetros é chamada de PM_{2,5} que possuem alta penetrabilidade nos pulmões e são capazes de chegar à corrente sanguínea, causando danos respiratórios, cerebrovasculares (AVC), problemas no desenvolvimento, doenças cardiovasculares, além de acometer demais órgãos que desencadeiam outras doenças respiratórias (OMS, 2021; Bodah *et al.*, 2022).

Segundo o Boletim anual do clima e qualidade do ar da Organização Mundial de Meteorologia (OMM), que analisou a qualidade do ar no ano de 2023, os incêndios florestais têm grande impacto na qualidade do ar, através da emissão em massa num curto período de nanopartículas poluentes, causando danos irreversíveis no aquecimento a curto prazo e mortes em exposição prolongada em seu pico (OMM, 2023). No Brasil, cerca de 186.692 focos de incêndios foram registrados de janeiro de 2024 a 16 de setembro de 2024, representando 51,2% dos focos de incêndio de toda América do Sul no mesmo período. Cerca de 59.641 focos foram registrados somente do dia 01 a 16 de setembro de 2024, atingindo o maior nível em 17 anos, e cobrindo cerca de 60% do território brasileiro pela fumaça (INPE, 2024).

Diante dos dados alarmantes, as queimadas florestais consistem-se num problema global devido às correntes de ar. A nuvem de poluição se desloca pela atmosfera acometendo outras regiões - como ocorreu no Estado do Rio Grande do Sul no mês de setembro de 2024 que teve pico histórico de monóxido de carbono registrado na história (Bodah *et al.*, 2022; ESA, 2024) -, e pode representar uma alerta para a nocividade da qualidade do ambiente para a saúde humana. Esta poluição atmosférica, quando originada por queimadas florestais na região Centro-Oeste e Norte do Brasil, podem transportar por massas de ar, estes contaminantes para

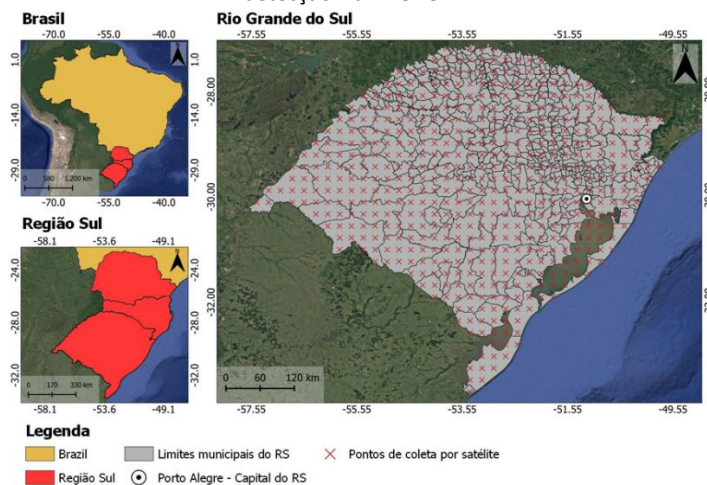
a região Sul brasileira, devido principalmente ao corredor de vapor de água atmosférica e de ventos de baixa altitude que se forma na Amazônia e vai até a região Sul; um sistema climático comum na América do Sul, à leste da Cordilheira dos Andes, responsável pelo regime de chuvas e comumente chamado de “rios voadores”.

Diante deste contexto, o objetivo geral deste estudo é quantificar a poluição atmosférica no Estado do Rio Grande do Sul (Brasil), durante o período de janeiro de 2021 a setembro de 2024, período de grande agravamento de queimadas no país, por meio de Sensoriamento Remoto, utilizando-se do satélite Sentinel-5P acoplado ao TROPOspheric Monitoring Instrument (TROPOMI) de domínio da Agência Espacial Europeia (ESA) voltado a detecção dos níveis de monóxido de carbono (CO) e dióxido de nitrogênio (NO₂). Utilizou-se do satélite Sentinel-5P, especificamente para o monitoramento da atmosfera com alta resolução espacial e temporal. Este estudo torna-se de fundamental importância ao utilizar-se do instrumento TROPOspheric Monitoring Instrument (TROPOMI) (Bodah *et al.*, 2022), na análise da qualidade do ar relacionadas às consequências dos incêndios florestais brasileiro, capazes de deslocar os contaminantes (NO₂ e CO) para o Sul do Brasil, podendo causar severos riscos à saúde humana, como comprovado pela Organização Mundial da Saúde (OMS, 2021).

2 METODOLOGIA

O estado do Rio Grande do Sul (RS), situado na região Sul do Brasil (Figura 1), possui uma área territorial de 281.748 km². Sua população estimada é de 11,4 milhões de habitantes, distribuídos em 497 municípios. A cidade de Porto Alegre, que é a capital do estado, destaca-se como o principal centro político, econômico e cultural. Do ponto de vista climático, o Rio Grande do Sul possui um clima subtropical, caracterizado por verões quentes e invernos rigorosos, com variações de temperatura significativas ao longo do ano (IBGE, 2024).

Figura 1 – Localização do estado do Rio Grande do Sul no território brasileiro, em relação a nuvem de pontos de detecção via TROPOMI.



Fonte: Elaborado a partir do base de dados do IBGE (2024).

Através do satélite Sentinel-5P, acoplado ao sensor TROPOMI, foi gerada a distribuição dos pontos de coleta por Rede de Triangulação Irregular (TIN) (Neckel *et al.*, 2022), resultando num total de 522 pontos, com espaçamento de 25km entre cada ponto, alocados no território do estado do Rio Grande do Sul (Figura 1). Os dados da coleta realizada com o sensor TROPOMI abrangem as variáveis dos poluentes CO (monóxido de carbono) e NO₂ (dióxido de nitrogênio), para os anos de 2021 e 2024, nas estações de verão (janeiro) e inverno (setembro), com as coletas realizadas ao longo de 4 dias em cada mês analisado, levando em conta a boa qualidade das imagens selecionadas para amostragem, com a redução mínima de nuvens, conforme determina os estudos de Chen *et al.* (2024) e Maheshwarkar *et al.* (2024).

Convém lembrar que a escolha do período de estudo (2021 e 2024) justifica-se a partir da leitura dos dados da European Space Agency, a qual identificou que esses anos registraram os maiores picos de concentrações dos poluentes analisados (ESA, 2024). Em relação aos dados detectados de CO e NO₂ via TROPOMI, utilizou-se de resoluções espaciais com 25 km x 25 km, normalização de 0.83 µg/mg e erro máximo 6.62%, permitindo uma análise detalhada de diferentes regiões estudadas. As datas escolhidas para tal estudo foram selecionadas por grau de contaminantes ao longo do período estudado, sendo estes atualizados diariamente, permitindo a criação de séries temporais para observar variações ao longo do tempo. A coleta de dados se baseia nas imagens de sensoriamento remoto do satélite Sentinel-5P, obtidas por meio da plataforma Copernicus Browser, que fornece acesso gratuito aos dados brutos do satélite.

O processo de coleta seguiu os seguintes passos (Bodah *et al.*, 2022; Maheshwarkar *et al.*, 2024): a) Download de imagens: as imagens diárias foram baixadas e filtradas para os dados correspondentes à área geográfica do Rio Grande do Sul; b) Período de coleta: o período de análise compreende os meses de janeiro de 2021 a setembro de 2024, cobrindo três anos e meio de observações. Esse período permitiu a análise de padrões sazonais e a correlação com eventos específicos, como queimadas e atividades industriais; c) Correção atmosférica e processamento: após o download das imagens, foi realizada a correção atmosférica e o processamento dos dados, utilizando o software ESA SNAP (Sentinel Application Platform) para assegurar a acurácia das medições.

Os dados coletados por detecção via TROPOMI foram organizados num banco de dados geoespacial, permitindo a análise de séries temporais e a visualização de mapas de distribuição espacial dos poluentes (Bodah *et al.*, 2022; Maheshwarkar *et al.*, 2024). Neste contexto, foram realizadas a interpolação dos dados utilizando-se de krigagem para preencher lacunas nas medições, proporcionando uma visualização contínua dos níveis de poluentes no estado (Chen *et al.*, 2024). Lembrando que, para às médias e desvios padrões, utilizou-se o cálculo de médias diárias, mensais e sazonais dos níveis de CO e NO₂ para entender as variações temporais. Isso facilitou a análise de padrões sazonais e anômalos, com a comparação dos níveis de poluentes ao longo de diferentes estações do ano e a identificação de anomalias que pudessem estar relacionadas a eventos específicos, conforme enfatizam Filonchyk e Peterson (2024).

A modelagem dos dados foi realizada no software QGIS (Quantum GIS), que permitiu a visualização e a análise geoespacial, além da elaboração dos mapas deste estudo. A metodologia utilizada foi cuidadosamente elaborada para proporcionar uma análise abrangente

da poluição do ar no estado do Rio Grande do Sul, utilizando os dados fornecidos pelo satélite Sentinel-5P, tornam-se de extrema importância para o entendimento da qualidade do ar em grandes regiões (Chen *et al.*, 2024). O uso de Sensoriamento Remoto, aliado a técnicas de análise geoespacial e à validação com dados terrestres, oferecem bases sólidas para compreender as concentrações de CO e NO₂ ao longo do tempo em uma determinada região (Bodah *et al.*, 2022; Maheshwarkar *et al.*, 2024). Apesar de algumas limitações relacionadas à cobertura de nuvens e resolução espacial em áreas urbanas, o método proposto permite identificar padrões de emissão e seus impactos potenciais na saúde pública (Bodah *et al.*, 2022). Estes dados coletados foram modelados, com a aplicação metodologia de agrupamento K-means (Hajihosseini *et al.*, 2024), permitindo um melhor entendimento dos resultados obtidos neste estudo. Esta abordagem oferece uma contribuição valiosa para a gestão da qualidade do ar e o monitoramento ambiental em grandes regiões, com potencial para futuras expansões com a aplicação de estudos mais detalhados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados demonstraram um conjunto de dados coletados pelo sensor TROPOMI na área de estudo (Tabela 1). Para a variável de CO, analisou-se primeiramente as médias, estáveis durante o ano de 2021, com um valor mais elevado no dia 11 de janeiro de 2021, com uma média de 0.0244 mol/m² (Figura 2 (B)), em relação aos outros períodos deste ano. No verão (Figura 2 (A, C e D)) foram encontrados os maiores valores médios deste ano na estação do inverno (Figura 2 (I, J, K e L)).

Tabela 1 - Estatística descritiva da coleta de dados realizada a partir das imagens de satélite, referente as variáveis de CO e NO₂ capturadas com o sensor TROPOMI aplicada na área de estudos do estado do Rio Grande do Sul.

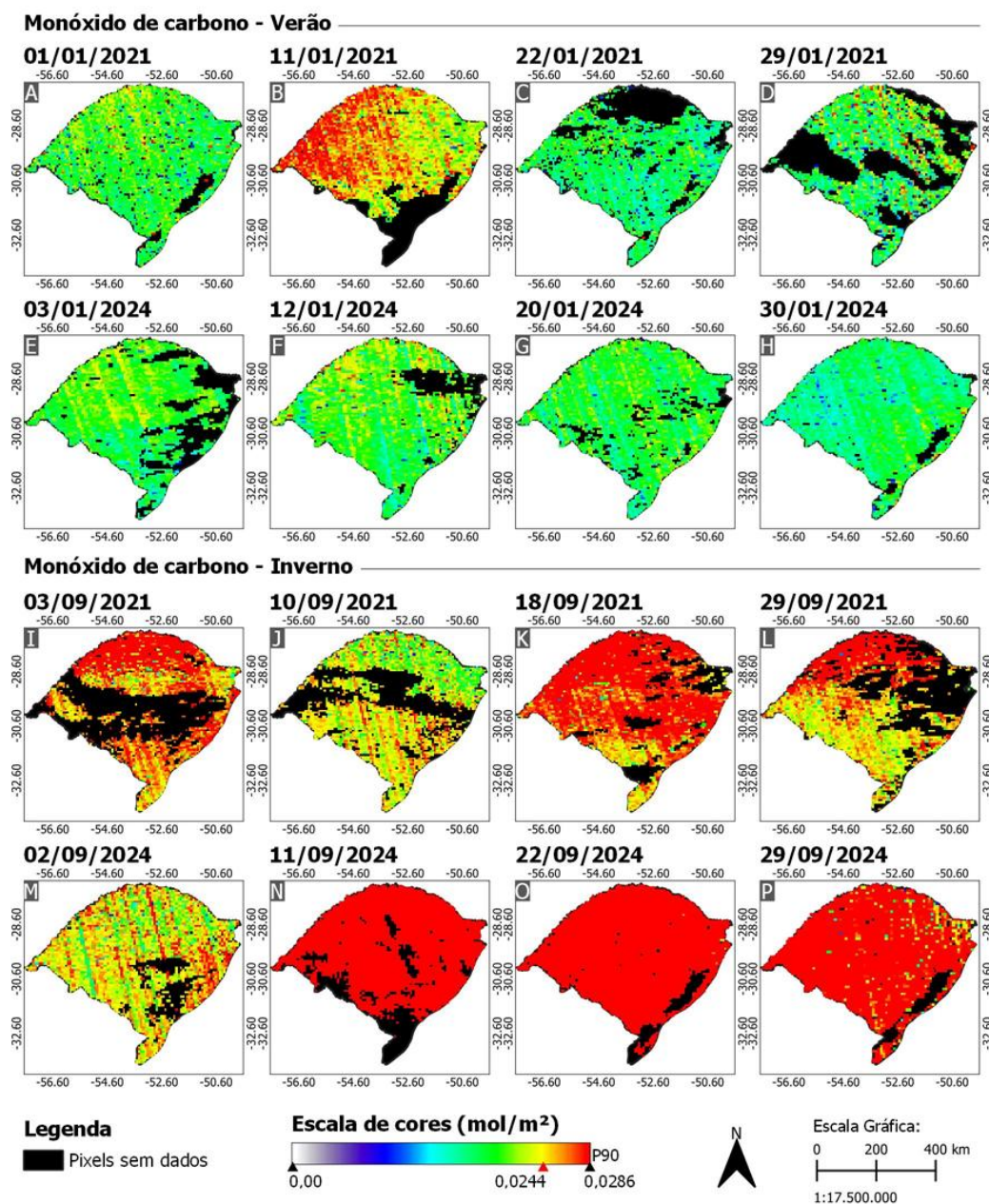
Imagens de Satélite	Válidos	Perdidos	Média	Desvio Padrão	Variância	Mínimo	Máximo
CO_SUM_2021_01_01	522	0	0.02	0.005	2.51E-05	0	0.111
CO_SUM_2021_01_11	522	0	0.025	0.004	1.29E-05	0	0.053
CO_SUM_2021_01_22	522	0	0.017	0.003	7.78E-06	0	0.027
CO_SUM_2021_01_29	522	0	0.019	0.005	2.19E-05	0	0.044
CO_WIN_2021_09_03	522	0	0.028	0.004	1.33E-05	0.01	0.047
CO_WIN_2021_09_10	522	0	0.023	0.003	9.21E-06	0.002	0.031
CO_WIN_2021_09_18	522	0	0.029	0.004	1.77E-05	0.011	0.046
CO_WIN_2021_09_29	522	0	0.027	0.004	1.59E-05	0.014	0.043
CO_SUM_2024_01_03	522	0	0.02	0.002	4.65E-06	0.01	0.027
CO_SUM_2024_01_12	522	0	0.02	0.003	8.83E-06	0	0.031
CO_SUM_2024_01_20	522	0	0.019	0.002	5.46E-06	0.005	0.025
CO_SUM_2024_01_30	522	0	0.017	0.002	5.19E-06	0.003	0.028
CO_WIN_2024_09_02	522	0	0.024	0.003	1.10E-05	0.005	0.035
CO_WIN_2024_09_11	522	0	0.144	0.044	0.002	0.064	0.255
CO_WIN_2024_09_22	522	0	0.077	0.022	4.82E-04	0.032	0.126
CO_WIN_2024_09_29	522	0	0.035	0.006	3.88E-05	0.007	0.056
NO2_SUM_2021_01_01	522	0	5.87E-05	5.59E-06	3.12E-11	4.09E-05	8.13E-05
NO2_SUM_2021_01_11	522	0	6.26E-05	5.24E-06	2.75E-11	3.56E-05	8.11E-05
NO2_SUM_2021_01_22	522	0	5.60E-05	6.03E-06	3.63E-11	3.28E-05	8.30E-05
NO2_SUM_2021_01_29	522	0	5.70E-05	4.55E-06	2.07E-11	4.49E-05	7.10E-05
NO2_WIN_2021_09_03	522	0	5.46E-05	5.21E-06	2.71E-11	4.26E-05	7.78E-05
NO2_WIN_2021_09_10	522	0	5.25E-05	4.31E-06	1.86E-11	3.80E-05	7.03E-05
NO2_WIN_2021_09_18	522	0	6.03E-05	5.33E-06	2.84E-11	4.58E-05	7.80E-05
NO2_WIN_2021_09_29	522	0	5.69E-05	4.75E-06	2.25E-11	4.36E-05	7.26E-05
NO2_SUM_2024_01_03	522	0	6.79E-05	5.31E-06	2.82E-11	5.24E-05	8.26E-05
NO2_SUM_2024_01_12	522	0	6.20E-05	5.10E-06	2.61E-11	4.57E-05	7.44E-05
NO2_SUM_2024_01_20	522	0	6.19E-05	5.06E-06	2.56E-11	4.57E-05	7.38E-05
NO2_SUM_2024_01_30	522	0	6.08E-05	3.97E-06	1.58E-11	4.95E-05	7.42E-05
NO2_WIN_2024_09_02	522	0	5.61E-05	7.07E-06	5.00E-11	3.85E-05	9.58E-05
NO2_WIN_2024_09_11	522	0	7.39E-05	6.35E-06	4.03E-11	5.23E-05	9.37E-05
NO2_WIN_2024_09_22	522	0	6.95E-05	6.77E-06	4.58E-11	5.10E-05	9.29E-05
NO2_WIN_2024_09_29	522	0	6.55E-05	6.15E-06	3.79E-11	4.54E-05	1.05E-04
CO_SUM_2021_01_01	522	0	0.02	0.005	2.51E-05	0	0.111
CO_SUM_2021_01_11	522	0	0.025	0.004	1.29E-05	0	0.053
CO_SUM_2021_01_22	522	0	0.017	0.003	7.78E-06	0	0.027
CO_SUM_2021_01_29	522	0	0.019	0.005	2.19E-05	0	0.044

Fonte: Dados detectados a partir de coletas geoespaciais por TROPOMI (ESA, 2024).

Durante o ano de 2024 observou-se que as médias de CO também se mostraram estáveis no verão (Figura 2 (E, F, G e H)), com um aumento drástico no inverno (Figura 2 (M, N, O e P)). Dentro do período observado na Tabela 1, para inverno de 2024, é notável que no dia

11 de setembro de 2024 os níveis médios de CO estavam significativamente elevados ($0,144 \text{ mol/m}^2$). Considerando que a média de CO para a região do estado do Rio Grande do Sul nos 5 últimos anos foi de $0,0244 \text{ mol/m}^2$, percebe-se que no dia 11 de setembro de 2024 (Figura 2 (N)) os níveis de CO estavam $\approx 5,9$ vezes ($490,16\%$) maiores do que os níveis médios normais para a área de estudo, sendo a maior média registrada nos 5 anos estudados (ESA, 2024).

Figura 2 – Representação dos níveis de monóxido de carbono (CO) coletados neste estudo via TROPOMI.

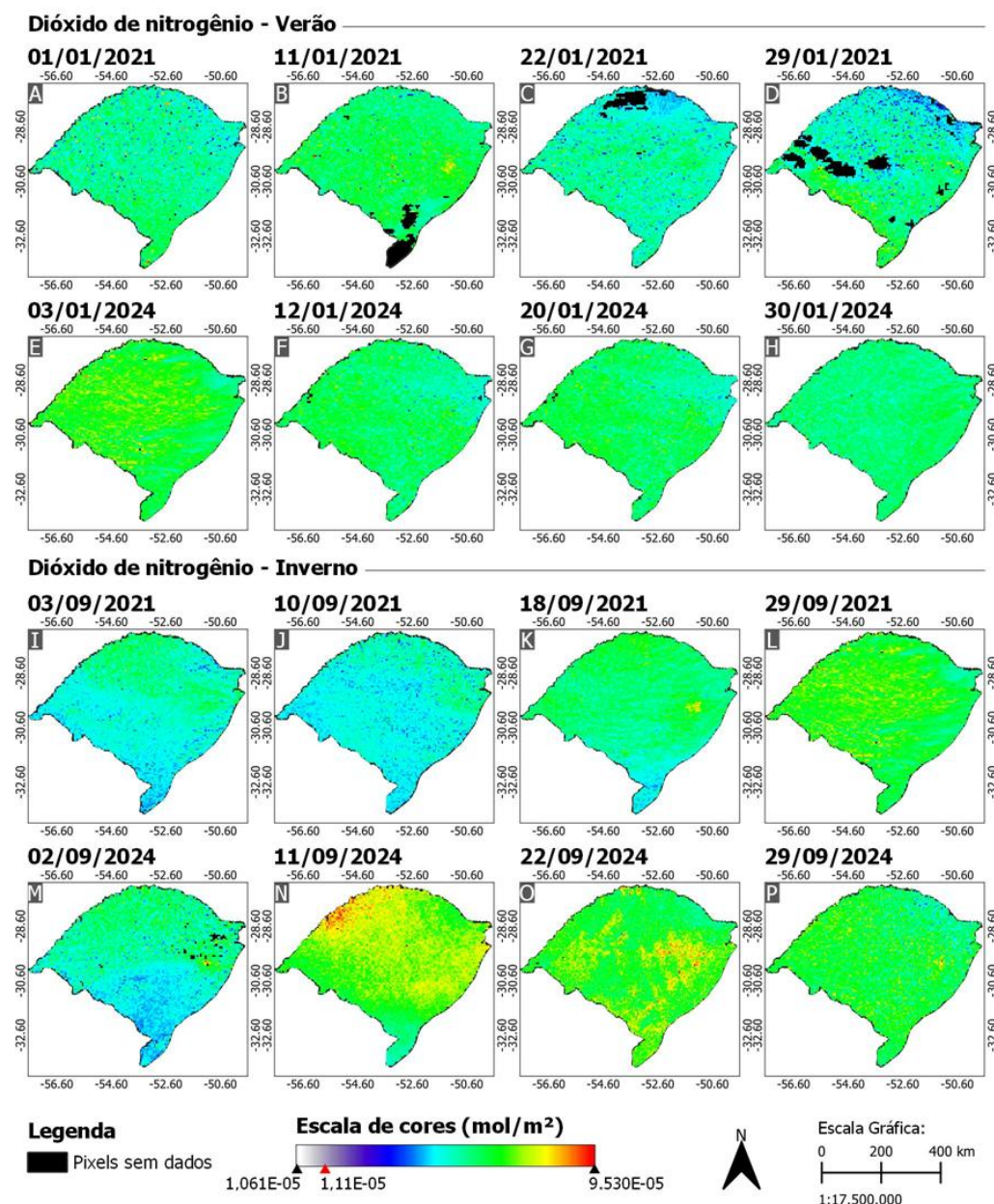


Fonte: Mapas elaborados a partir dos dados detectados via TROPOMI (ESA, 2024).

A Tabela 1 ao apresentar os valores da variável NO_2 possibilita o entendimento das médias, na qual observou-se uma maior estabilidade em 2021, com um valor médio mais elevado no verão, atingindo $6.26\text{E-}05 \text{ mol/m}^2$ em 11/01/2021 (Figura 3 (B)), comparado aos

demais períodos do ano na mesma estação (Figura 3 (A, C e D)). No inverno, as coletas dos dias 18/09/2021 e 29/09/2021 (Figura 3 (K e L)) registraram maiores concentrações de NO_2 . Estes resultados de 2021 indicaram equilíbrio nas concentrações de NO_2 entre as duas estações observadas. A diferença de entender a compreensão destes dados podem fomentar a tomada de decisão por parte de agentes governamentais, voltados à futura mitigação dos quantitativos gerados pela poluição atmosférica (Bodah *et al.*, 2022; Maheshwarkar *et al.*, 2024).

Figura 3 – Representação dos níveis de dióxido de nitrogênio (NO_2) coletados neste estudo via TROPOMI.



Fonte: Mapas elaborados a partir dos dados detectados via TROPOMI (ESA, 2024).

Os dados de 2024 mostraram que, durante o verão (Figura 3 (E, F, G e H)), as médias de NO_2 foram mais altas em comparação às duas estações analisadas em 2021. No inverno de 2024 (Figura 3 (M, N, O e P)), observa-se um aumento significativo das concentrações de NO_2

em relação às datas anteriores. Na Tabela 1, é possível notar que, em 11 de setembro de 2024, os valores médios de NO_2 estavam elevados ($7.39\text{E-}05 \text{ mol/m}^3$), semelhante à análise do poluente CO. Estes dados de NO_2 , para os anos de 2021 e 2024, revelaram-se como significativamente acima da média para a região do estado do Rio Grande do Sul, levando em consideração que dentro dos 5 últimos anos, essa média atingiu um valor de $1.11\text{E-}5 \text{ mol/m}^3$. No dia 11 de setembro de 2024 (Figura 3 (N)) foi detectado valores elevados de NO_2 com $\approx 6,65$ vezes (565,76%) maiores que os níveis médios normais para a região analisada (ESA, 2024).

Para analisar a disposição espacial dos gases poluentes na atmosfera do estado do Rio Grande do Sul, aplicou-se a metodologia de agrupamento K-means (Hajihosseini *et al.* 2024), a qual revelou a performance do modelo para a divisão em grupos do conjunto de dados coletados pelo sensor TROPOMI. Observa-se que os dados dos 522 pontos de coleta foram divididos em 5 clusters. Isso gerou um R^2 de 0.180 que determinou o modelo K-means. Os altos índices AIC (13.998) e BIC (14.680) revelam um agrupamento com um índice Silhouette de 0.050 que representa um modelo com dados espacialmente dispersos.

Em relação à performance do modelo estatístico (Hajihosseini *et al.* 2024), a Tabela 2 dispõe os dados referentes às características de cada cluster individualmente. O Cluster 1, com 67 pontos, tem uma proporção explicada de 0.142, soma dos quadrados de 1.936 e um índice Silhouette de 0.054, indicando uma separação razoável dos demais clusters. O Cluster 4, com 89 pontos, tem uma proporção explicada de 0.205, soma dos quadrados de 2.803 e o menor índice Silhouette (0.018), indicando pouca distinção dos outros clusters. O Cluster 2, com 104 pontos, apresenta uma proporção explicada de 0.212, soma dos quadrados de 2.905 e um índice Silhouette de 0.047, sugerindo uma coesão moderada. O Cluster 5, com 126 pontos, possui uma proporção explicada de 0.200, soma dos quadrados de 2.730 e o maior índice Silhouette, de 0.084, indicando uma definição mais clara. Por fim, o Cluster 3, o maior com 136 pontos, apresenta a maior proporção explicada, 0.242, soma dos quadrados de 3.304 e um índice Silhouette de 0.036, evidenciando uma separação moderada e menos definição em comparação ao Cluster 5.

Tabela 2 - Informações estatísticas dos 5 clusters gerados de dados coletados a partir do sensor TROPOMI.

Clusters	1	2	3	4	5
Tamanho	67	104	136	89	126
Proporção explicada da heterogeneidade dentro do cluster	0.142	0.212	0.242	0.205	0.2
Soma dos quadrados internos	1.936	2.905	3.304	2.803	2.730
Pontuação de silhueta	0.054	0.047	0.036	0.018	0.084

Fonte: Modelagem estatística dos dados detectados a partir de coletas geoespaciais por TROPOMI (ESA, 2024).

Através da Tabela 3 encontram-se descritas as médias de cada um dos 5 clusters analisados em relação ao conjunto de dados. O Cluster 1 tende a exibir valores mais elevados de CO (Figura 3 (E e H)). Enquanto para o poluente NO_2 foram agrupados os valores mais baixos (Figura 3 (U, W, AC e AD)). O Cluster 2 possui valores predominantemente baixos para ambas as variáveis, com destaque para as menores médias de CO (Figura 3 (O e P)), além de algumas das menores médias de NO_2 (Figura 3 (Z e AA)). O Cluster 3 apresenta valores mistos de CO e NO_2 , com dados variando em torno da média do conjunto de dados. O Cluster 4 revela os picos mais

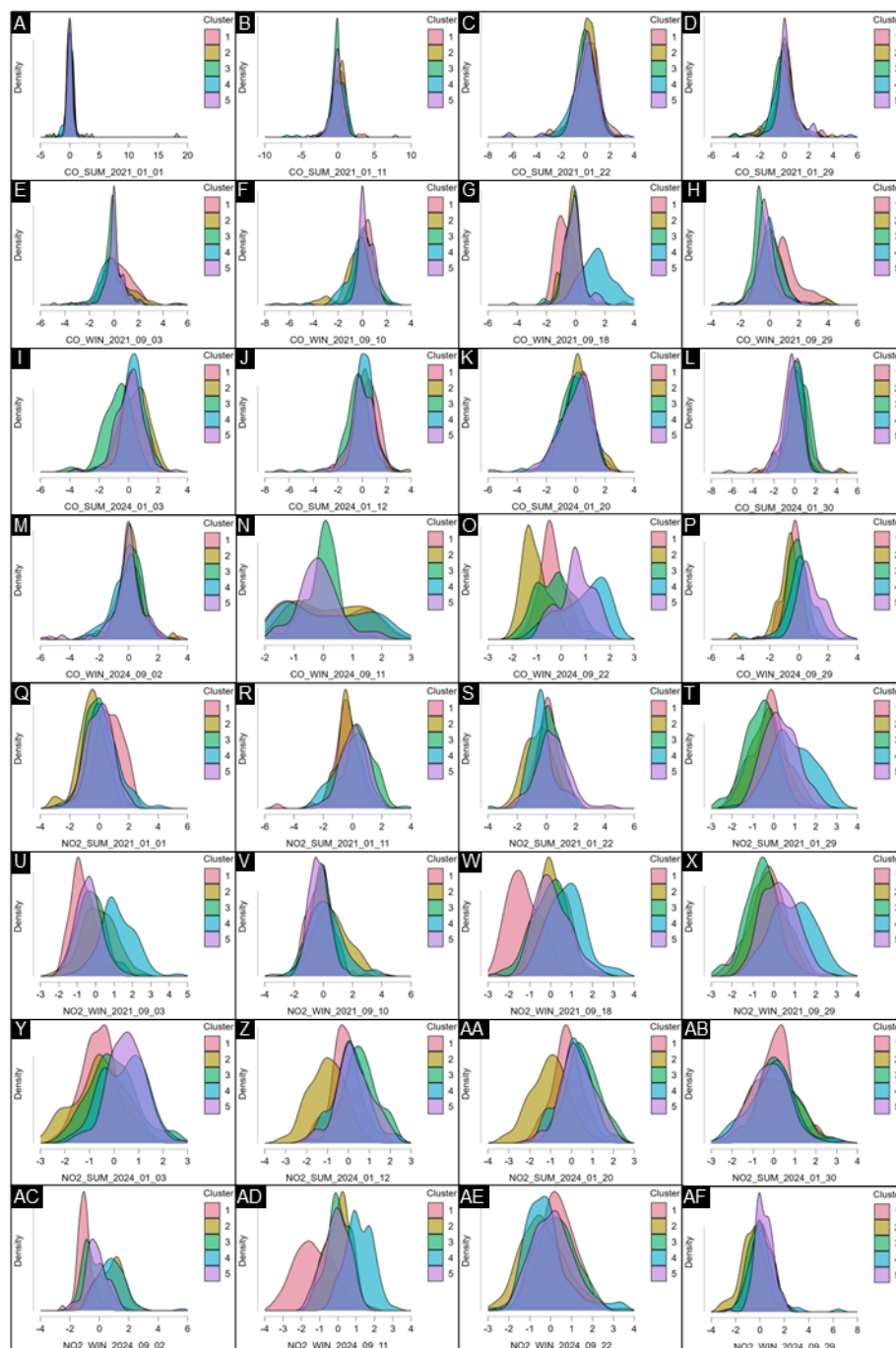
altos de NO₂ (Figura 3 (T, U, W, X, AC e AD)) e de CO (Figura 3 (G e O)), demonstraram à maioria valores moderados de CO, com dados elevados principalmente no inverno, indicando uma variação sazonal. O Cluster 5 mantém valores baixos de CO (Figura 3 (H e I)) e uma variação mais alta de NO₂ de maneira predominante no verão (Figura 3 (R, Z e AA)).

Tabela 3 - Médias dos 5 clusters em relação ao conjunto de dados das variáveis de CO e NO₂, coletados a partir do sensor TROPOMI.

Imagens de satélite	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4	Cluster 5
CO_SUM_2021_01_01	0.378	-2.52E+01	-0.018	-0.053	-0.145
CO_SUM_2021_01_11	0.168	0.203	-0.062	-0.045	-0.159
CO_SUM_2021_01_22	0.239	0.112	-0.053	-0.071	-0.112
CO_SUM_2021_01_29	0.009	0.051	0.254	-0.032	-0.299
CO_WIN_2021_09_03	0.566	0.096	0.016	-0.213	-0.247
CO_WIN_2021_09_10	0.178	-0.614	0.291	-0.276	0.294
CO_WIN_2021_09_18	-0.751	-0.223	-0.155	1.430	-0.258
CO_WIN_2021_09_29	1.014	0.200	-0.232	0.096	-0.522
CO_SUM_2024_01_03	0.176	0.392	0.081	0.351	-0.753
CO_SUM_2024_01_12	0.321	0.159	-0.032	0.180	-0.395
CO_SUM_2024_01_20	0.110	0.135	-0.067	-0.075	-0.045
CO_SUM_2024_01_30	0.204	-0.048	-0.422	-0.098	0.456
CO_WIN_2024_09_02	-0.048	0.078	-0.086	-0.209	0.202
CO_WIN_2024_09_11	-0.078	0.214	-0.128	0.092	-0.062
CO_WIN_2024_09_22	-0.330	-1.052	0.599	0.911	-0.246
CO_WIN_2024_09_29	-0.419	-0.721	0.823	0.164	-0.186
NO2_SUM_2021_01_01	0.673	-0.508	-0.001	0.277	-0.133
NO2_SUM_2021_01_11	-0.375	-0.343	0.120	-0.178	0.479
NO2_SUM_2021_01_22	0.133	-0.558	0.396	-0.271	0.153
NO2_SUM_2021_01_29	-0.326	-0.198	0.326	0.891	-0.645
NO2_WIN_2021_09_03	-0.748	0.189	-0.377	1.188	-0.190
NO2_WIN_2021_09_10	-0.243	0.561	-0.299	0.227	-0.171
NO2_WIN_2021_09_18	-1.268	0.106	0.072	0.760	-0.028
NO2_WIN_2021_09_29	-0.331	-0.186	0.269	0.907	-0.602
NO2_SUM_2024_01_03	-0.557	-0.560	0.498	0.378	-0.046
NO2_SUM_2024_01_12	-0.149	-1.050	0.277	0.126	0.558
NO2_SUM_2024_01_20	-0.171	-1.061	0.306	0.171	0.515
NO2_SUM_2024_01_30	0.227	0.021	-0.223	-0.090	0.167
NO2_WIN_2024_09_02	-0.976	0.644	-0.197	0.802	-0.366
NO2_WIN_2024_09_11	-1.387	-0.031	-0.086	1.161	0.036
NO2_WIN_2024_09_22	0.306	-0.385	0.059	-0.210	0.239
NO2_WIN_2024_09_29	0.098	-0.568	0.325	0.233	-0.099
CO_SUM_2021_01_01	0.378	-2.52E+01	-0.018	-0.053	-0.145
CO_SUM_2021_01_11	0.168	0.203	-0.062	-0.045	-0.159
CO_SUM_2021_01_22	0.239	0.112	-0.053	-0.071	-0.112
CO_SUM_2021_01_29	0.009	0.051	0.254	-0.032	-0.299

Fonte: Modelagem estatística a partir de coletas geoespaciais por TROPOMI (ESA, 2024).

Figura 4 – Representação dos clusters relacionados aos níveis de CO e NO₂ modelados a partir via TROPOMI.

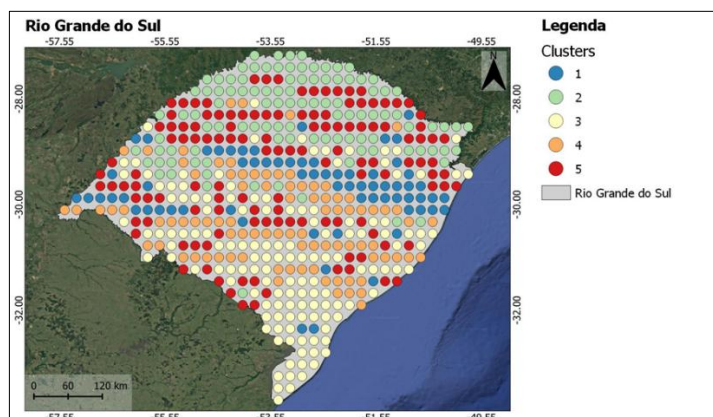


Fonte – Clusters representados a partir de coletas geoespaciais por TROPOMI (ESA, 2024).

Os dados de clusters revelam a intensidade da dispersão dos dados entre os 522 pontos analisados, o que indica grande complexidade da disposição espacial dos gases na atmosfera do estado do Rio Grande do Sul, dado a grande variabilidade inerente desta dinâmica. A Figura 5 demonstra observações, onde o cluster 1 é disposto de maneira heterogênea ao centro do estado, indicando que estas localizações contam com valores de CO mais elevados, enquanto há valores baixos de NO₂. O cluster 2 está localizado predominantemente ao norte do estado, indicando baixas concentrações de ambos os poluentes nesta localidade. O cluster 3

localiza-se em maior parte, do centro ao sul da área de estudo, indicando valores próximos da média do conjunto de dados. O cluster 4 encontra-se de maneira heterogênea ao centro do estado, revelando que as maiores concentrações dos poluentes analisados se encontram dispersos ao centro do Rio Grande do Sul por deslocamento de massas de ar. O cluster 5 localiza-se de modo disperso pela área de estudo, ilustrando valores mistos de CO e NO₂.

Figura 5 – Clusters sobrepostos no estado do Rio Grande do Sul em relação aos níveis de CO e NO₂ detectados via TROPOMI.



4 CONCLUSÃO

Este estudo revelou resultados com quantitativos dos níveis de CO de 0,0244 mol/m², atestando que no dia 11 de setembro de 2024, as concentrações foram ≈5,9 vezes (490,16%) maiores do que os níveis médios normais. Os níveis de NO₂ de 2024 atingiu um valor de 1.11E-5 mol/m², originando-se níveis ≈6,65 vezes (565,76%) maiores que os níveis médios decorrentes.

Através dos dados detectados via TROPOMI percebe-se que os poluentes apresentaram um padrão de aumento nas concentrações atmosféricas no estado do Rio Grande do Sul. Sendo que, os períodos analisados com médias mais elevadas de CO e NO₂ na região foi o mesmo dos registros de grandes queimadas na Amazônia, Pantanal e em outras localidades na América do Sul, cujos poluentes podem ter sido transportados pela direção predominante dos ventos no continente, contribuindo para a alta concentração desses poluentes na área de estudo. Portanto, atesta-se que as queimadas são a principal hipótese sobre as possíveis causas do grande valor para os poluentes atmosféricos no estado do Rio Grande do Sul.

Neste contexto, sugere-se a continuidade de estudos futuros aplicados em outros estados brasileiros, capazes de avaliar proporções mais quantitativas de poluentes atmosféricos, incluídos aerossóis. Nesse sentido, vale ressaltar, que o TROPOMI desmontou ser uma ferramenta capaz e eficaz para detectar dados geoespaciais que venham a contribuir com a criação de novas políticas públicas eficazes, capazes de mitigar a continuidade dos incêndios florestais no Brasil.

Os autores agradecem à Agência Espacial Europeia (ESA) por fornecer os dados inéditos provenientes do satélite Sentinel-5P (TROPOMI). Agradecemos também ao Núcleo de Estudos e Pesquisas em Mobilidade Urbana (NEPMOUR+S/ATITUS); à Fundação Meridional; ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Brasil pela concessão da Bolsa Produtividade em Pesquisa do CNPq - Nível 2.

5 REFERÊNCIAS

BODAH, Brian William; NECKEL, Alcindo; MACULAN, Laércio Stolfo; MILANES, Celene B.; KORCELSKI, Cleiton; RAMÍREZ, Omar; MENDEZ-ESPINOSA, Juan F.; BODAH, Eliane Thaines; OLIVEIRA, Marcos L.S. Sentinel-5P TROPOMI satellite application for NO₂ and CO studies aiming at environmental valuation. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 357, p. 131960, jul. 2022.

CHEN, Cheng; LITVINOV, Pavel; DUBOVNIK, Oleg; BINDREITER, Lukas; MATAR, Christian; FUERTES, David; LOPATIN, Anton; LAPYONOK, Tatyana; LANZINGER, Verena; HANGLER, Andreas. Extended aerosol and surface characterization from S5P/TROPOMI with GRASP algorithm. Part II: global validation and intercomparison. **Remote Sensing Of Environment**, [S.L.], v. 313, p. 114374, nov. 2024.

ESA (European Space Agency). Applications: TROPOMI. 2024. Disponível em: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-5P/Tropomi.

FADAIRO, Adebayo Afolabi; WONG, Pak Kin; IP, Weng Fai; GHADIKOLAIEI, Meisam Ahmadi; CAI, Zhe; NG, Kar Wei; LIAN, Zhen Dong. Impact of neem oil biodiesel blends on physical and chemical properties of particulate matter emitted from diesel engines. **Environmental Pollution**, [S.L.], v. 362, p. 124972, dez. 2024.

FILONCHYK, Mikalai; PETERSON, Michael P. Changes in aerosol properties at the El Arenosillo site in Southern Europe as a result of the 2023 Canadian forest fires. **Environmental Research**, [S.L.], v. 260, p. 119629, nov. 2024.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Cidades e Estados**. 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/rs.html>.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). **Programa Queimadas do INPE: BDQUEIMADAS**, 2024. <https://terrabrasilis.dpi.inpe.br/queimadas/bdqueimadas/>.

KUŚMIERCZYK-MICHULEC, Jolanta; BARÉ, Jonathan. Global atmospheric monitoring of radionuclides and noble gases: insights into the interhemispheric transport of anthropogenic emissions. **Atmospheric Environment**, [S.L.], v. 319, p. 120304, fev. 2024.

MAHESHWARKAR, Prem; CUESTA, Juan; FORMENTI, Paola; LEMMOUCHI, Farouk. Three-dimensional distribution of aerosols of multiple types at daily scale using TROPOMI spaceborne observations. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 955, p. 177037, dez. 2024.

NECKEL, Alcindo; OLIVEIRA, Marcos L.S.; DOTTO, Guilherme L.; MACULAN, Laércio Stolfo; BODAH, Brian William; SILVA, Luis F.O. Sentinel-3B OLCI satellite imagery and advanced electron microscopy of nanoparticle analysis in a marine estuary and watershed: robust multi-analytics and geospatial assessment of key contaminants. **Journal Of Hydrology**, [S.L.], v. 612, p. 128278, set. 2022.

Organização Meteorológica Mundial (OMM). **Os Impactos da Matéria Particulada na Produção Agrícola: Mecanismos, Quantificação e Opções para Mitigação (OMM-No. 1340)**. Genebra, 2023.

Organização Meteorológica Mundial (OMM). **Boletim de Qualidade do Ar e Clima da OMM**, n.º 2; OMM: Genebra, 2022.

Organização Mundial da Saúde (OMS). OMS Global Air. **Diretrizes de qualidade: material particulado (PM_{2,5} e PM₁₀), ozônio, dióxido de nitrogênio, dióxido de enxofre e monóxido de carbono**; OMS: Genebra, 2021. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>

SUN, Jian; SHEN, Zhenxing; ZHANG, Bin; ZHANG, Leiming; ZHANG, Yue; ZHANG, Qian; WANG, Diwei; HUANG, Yu; LIU, Suixin; CAO, Junji. Chemical source profiles of particulate matter and gases emitted from solid fuels for residential cooking and heating scenarios in Qinghai-Tibetan Plateau. **Environmental Pollution**, [S.L.], v. 285, p. 117503, set. 2021.

DECLARAÇÕES

CONTRIBUIÇÃO DE CADA AUTOR

Ao descrever a participação de cada autor no manuscrito, utilize os seguintes critérios:

- **Concepção e Design do Estudo:** Luana Pasquetti e Guilherme Peterle Schmitz.
 - **Curadoria de Dados:** Luana Pasquetti.
 - **Análise Formal:** Grace Tibério Cardoso.
 - **Investigação:** Grace Tibério Cardoso.
 - **Metodologia:** Guilherme Peterle Schmitz e Alcindo Neckel.
 - **Redação - Rascunho Inicial:** Caliane Christie Oliveira de Almeida.
 - **Redação - Revisão Crítica:** Caliane Christie Oliveira de Almeida.
 - **Revisão e Edição Final:** Alcindo Neckel.
 - **Supervisão:** Alcindo Neckel and Caliane Christie Oliveira de Almeida.
-

DECLARAÇÃO DE CONFLITOS DE INTERESSE

Nós, **Luana Pasquetti, Guilherme Peterle Schmitz, Alcindo Neckel, Caliane Christie Oliveira de Almeida e Grace Tibério Cardoso**, declaramos que o manuscrito intitulado **“Uso do sensor TROPOMI na detecção de poluentes atmosféricos originados em incêndios florestais que se movimentam para o Sul do Brasil”**:

1. **Vínculos Financeiros:** Não possui vínculos financeiros que possam influenciar os resultados ou interpretação do trabalho.
 2. **Relações Profissionais:** Não possui relações profissionais que possam impactar na análise, interpretação ou apresentação dos resultados.
 3. **Conflitos Pessoais:** Não possui conflitos de interesse pessoais relacionados ao conteúdo do manuscrito.
-