



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO – UFMA
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE – CCBS
COORDENAÇÃO DO CURSO OCEANOGRAFIA - COOC
CURSO DE OCEANOGRAFIA

BEATRIZ CAMARA XAVIER

ANÁLISE DA QUALIDADE DO AR EM ÁREAS ADJACENTES AO COMPLEXO
PORTUÁRIO DO ITAQUI, SÃO LUÍS – MA

SÃO LUÍS/MA

2026

BEATRIZ CAMARA XAVIER

**ANÁLISE DA QUALIDADE DO AR EM ÁREAS ADJACENTES AO COMPLEXO
PORTUÁRIO DO ITAQUI, SÃO LUÍS – MA**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao curso de Oceanografia da
Universidade Federal do Maranhão para
obtenção do grau de bacharelado em
Oceanografia.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos Leal
de Castro

SÃO LUÍS/MA

2026

**ANÁLISE DA QUALIDADE DO AR EM ÁREAS ADJACENTES AO COMPLEXO
PORTUÁRIO DO ITAQUI, SÃO LUÍS – MA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Oceanografia da Universidade Federal do Maranhão para obtenção do grau de bacharelado em Oceanografia.

Aprovado em: / /

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Antonio Carlos Leal de Castro (Orientador)
Universidade Federal do Maranhão - UFMA

Profa. Dra. Paula Verônica Campos Jorge Santos
Universidade Federal do Maranhão - UFMA

Prof. Dr. Denilson Silva Bezerra
Universidade Federal do Maranhão – UFMA

Prof. Dr. Marcelo Henrique Lopes Silva (Suplente)
Universidade Federal do Maranhão - UFMA

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Xavier, Beatriz Camara.

ANÁLISE DA QUALIDADE DO AR EM ÁREAS ADJACENTES AO
COMPLEXO PORTUÁRIO DO ITAQUI, SÃO LUÍS MA / Beatriz
Camara Xavier. - 2026.
65 f.

Orientador(a): Antonio Carlos Leal de Castro.
Curso de Oceanografia, Universidade Federal do
Maranhão, Universidade Federal do Maranhão - Ufma, 2026.

1. Poluição Atmosférica. 2. Portos. 3. Qualidade do
Ar. 4. Saúde Pública. I. Castro, Antonio Carlos Leal de.
II. Título.

*A minha filha, meu marido e minha
família que tanto me apoiaram,
fazendo com que as dificuldades
fossem vencidas uma por uma, dia a
dia.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, dedico este trabalho a Deus, cuja luz guiou meus passos mesmo quando meus olhos cansaram.

Dedico a mim mesma Beatriz Camara Xavier, à mulher que enfrentou silêncios, tempestades e dúvidas, mas ainda assim seguir com coragem porque sabia que cada queda também ensinava a levantar.

À minha filha Eárine Cristine, que é vento doce e força discreta, lembrando-me todos os dias do porquê eu continuo.

A Igor Augusto, por sustentar o chão quando o caminho pesou, por segurar o que eu não pude e por caminhar ao meu lado com firmeza e amor.

À minha mãe Regiane Simone, cuja presença foi abrigo, palavra firme, porto seguro força que nunca me deixou naufragar.

Aos meus avós, Beatriz Martins e José Domingos, que me criaram com cuidado e ternura, e que deram suporte à minha mãe quando o mundo exigia dela mais horas do que havia no dia.

As minhas tias Rosiane, Josivania, Rosinalva, Reginalva e Tio Jucinaldo, que tantas vezes foram mãos estendidas e vozes de incentivo.

Aos meus irmãos Kanandra Silva e Vinicius Camara, parte essencial dos meus laços e da minha história.

Aos meus primos Vitoria, Deusilene, Emerson, Enzo Kawan, João Pedro, Arlisson André e Joana Valentina, que, com carinho, presença e risadas, fez meus dias mais leves e aqueceram o coração nos momentos em que a caminhada parecia maior do que eu.

E ao Mosenildo (Pretinho), pelas conversas profundas e por sempre me instigar a querer aprender mais, buscando novos conhecimentos para enriquecer nossos debates nas reuniões familiares.

Ao meu padrasto Ademar, por cada ida e vinda para os lugares de que eu precisava, por sempre falar sobre estudo com brilho nos olhos, por incentivar nossos caminhos e por ser o companheiro leal da minha mãe.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Antonio Carlos Leal de Castro, cuja paixão pela ciência e generosidade em ensinar acenderam caminhos que eu nem sabia que poderia trilhar.

Ao Prof. Marcelo Henrique e ao Prof. James, pelo apoio e pelos ensinamentos

que moldaram grande parte da minha formação.

Ao Prof. Walter Muedas, que me acolheu no início da iniciação científica e compartilhou saberes que levo comigo.

Aos amigos Alcione, Ingryd e Filipe França, que dividiram comigo estrada, desafios, gargalhadas e memórias que o tempo não leva.

Aos amigos de laboratório Scarlleth Patrícia, Danielle Viana, Larissa, Suzane, Daniele Sousa (Dani Tec), Luana e Yarle pelos momentos, pelas trocas e pelos dias cheios de companheirismo.

Aos colegas que cruzaram meu percurso e deixaram marcas gentis: Felipe Martins, Rodrigo, Nicolle, Lanna, Nívea Fernanda, Luis Henrique (in memoriam), Raian, Felipe Oliveira, Marina e Luciana Amorim.

E à FAPEMA, pelo apoio, através das bolsas concedidas, que possibilitaram meus projetos de pesquisa e impulsionaram esta caminhada até aqui

“Quem acredita sempre alcança.”

Renato Russo.

RESUMO

Este estudo avaliou a qualidade do ar no entorno do Complexo Portuário do Itaqui, em São Luís (MA), no período pós-pandemia (2021–2022), com base em dados das estações de monitoramento do Distrito Industrial de São Luís (DISAL). Foram analisados os poluentes NO_2 , SO_2 , O_3 , CO, MP_{10} e $\text{MP}_{2,5}$, comparando-se os registros com os padrões da Resolução CONAMA nº 491/2018 e com os níveis de Atenção, Alerta e Emergência, além da influência de variáveis meteorológicas. Os resultados indicaram que MP_{10} , $\text{MP}_{2,5}$ e CO permaneceram dentro dos limites normativos, caracterizando um perfil de poluição predominantemente gasosa. O NO_2 apresentou as maiores frequências de ultrapassagens ao PI-1, especialmente nas estações Santa Bárbara, Vila Maranhão, Coqueiros e Pedrinhas, refletindo a forte influência do tráfego pesado e das operações portuárias. O SO_2 , embora com menor frequência, apresentou episódios críticos de Alerta e Emergência, associados à queima de combustíveis fósseis. O O_3 destacou-se pela elevada ocorrência de episódios de Emergência em Santa Bárbara em 2022, indicando intensa formação fotoquímica. A comparação entre os anos mostrou que, em 2021, a menor atividade portuária permitiu melhor dispersão dos poluentes, enquanto em 2022 a retomada das operações superou a capacidade de autodepuração atmosférica. Entende-se que a degradação da qualidade do ar na região é predominantemente originada pelas atividades portuárias, representando risco à saúde das populações vizinhas.

Palavras-chave: Poluição atmosférica; Portos; NO_2 ; SO_2 ; Ozônio; Qualidade do ar; Saúde pública.

ABSTRACT

This study evaluated air quality in the surroundings of the Itaquí Port Complex, in São Luís (Maranhão, Brazil), during the post-COVID-19 period (2021–2022), using data from the air quality monitoring stations of the Industrial District of São Luís (DISAL). The pollutants NO₂, SO₂, O₃, CO, PM₁₀ and PM_{2.5} were analyzed and compared with the limits established by Brazilian Resolution CONAMA No. 491/2018, as well as with the Attention, Alert and Emergency levels, considering the influence of meteorological variables. The results showed that PM₁₀, PM_{2.5} and CO generally remained within legal limits, indicating a predominantly gaseous pollution profile. NO₂ presented the highest frequency of exceedances, especially at Santa Bárbara, Vila Maranhão, Coqueiros and Pedrinhas, reflecting the strong influence of heavy-duty vehicle traffic and port activities. SO₂ showed fewer exceedances but registered critical pollution episodes, while O₃ presented high emergency levels in Santa Bárbara in 2022, indicating intense photochemical formation. The comparison between years revealed that air quality was more favorable in 2021, still influenced by pandemic restrictions, whereas in 2022 the resumption of port operations led to a deterioration of air quality, posing health risks to nearby populations.

Key words: Air pollution; Ports; NO₂; SO₂; Ozone; Air quality; Public health.

SUMÁRIO

1-	INTRODUÇÃO	12
2-	OBJETIVOS	14
	2.1 Objetivo Geral	14
	2.2 Objetivos Específicos	14
3-	REVISÃO DE LITERATURA	14
	3.1 Qualidade do ar e poluição atmosférica	14
	3.2 Poluentes atmosféricos	15
	3.2.1 Material particulado (MP10 e MP2,5)	15
	3.2.2 Óxidos de nitrogênio (NO ₂).....	15
	3.2.3 Dióxido de enxofre (SO ₂).....	15
	3.2.4 Monóxido de carbono (CO)	16
	3.2.5 Ozônio troposférico (O ₃).....	16
	3.2.6 Partículas totais em suspensão (PTS).....	16
	3.3 Poluição atmosférica em áreas portuárias.....	16
	3.4 Influência das Condições Meteorológicas.....	17
	3.5 A Pandemia de COVID-19 e Seus Efeitos na Qualidade do Ar	17
	3.6 Impactos da Poluição do Ar na Saúde Humana	18
4-	REFERÊNCIAS	20
5-	CAPÍTULO	20
6-	INTRODUÇÃO	21
7-	MATERIAL E MÉTODOS.....	22
	6.1 Área de estudo	22
	6.2 Coleta de dados	23
	6.3 Análise de dados.....	25
8-	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	26
	8.1 Panorama Geral das Ultrapassagens e Excedências	26
9-	CONCLUSÃO	39

Lista de Figura

Figura 1- Estações de Monitoramento de Qualidade do Ar, São Luís, Maranhão Estações de Monitoramento de Qualidade do Ar, São Luís, Maranhão.....	22
Figura 2. Frequência de excedências e episódios críticos de NO ₂ nas estações adjacentes ao Complexo Portuário do Itaqui para o ano de 2021.	28
Figura 3. Frequência de excedências e episódios críticos de NO ₂ nas estações adjacentes ao Complexo Portuário do Itaqui para o ano de 2022.	29
Figura 4. Ocorrência de ultrapassagens ao padrão intermediário (PI-1) e níveis de severidade do SO ₂ nas estações do DISAL para o ano de 2021.	30
Figura 5. Ocorrência de ultrapassagens ao padrão intermediário (PI-1) e níveis de severidade do SO ₂ nas estações do DISAL para o ano de 2022.	30
Figura 6. Distribuição das excedências e dos níveis críticos de O ₃ por estação de monitoramento para o ano de 2021.....	31
Figura 7. Distribuição das excedências e dos níveis críticos de O ₃ por estação de monitoramento para o ano de 2022.....	32
Figura 8. Comportamento sazonal dos episódios de emergência de NO ₂ e da velocidade média dos ventos em Santa Bárbara para o ano de 2021.	34
Figura 9. Comportamento sazonal dos episódios de emergência de NO ₂ e da velocidade média dos ventos em Santa Bárbara para o ano de 2022.	35
Figura 10. Variação mensal das ultrapassagens de SO ₂ e da pluviosidade média na estação Coqueiro do ano de 2021.....	36
Figura 11. Variação mensal das ultrapassagens de SO ₂ e da pluviosidade média na estação Coqueiro do ano de 2022.....	37
Figura 12. Variação mensal das ultrapassagens de O ₃ e da temperatura média em Santa Bárbara no ano de 2021.....	38
Figura 13. Variação mensal das ultrapassagens de O ₃ e da temperatura média em Santa Bárbara no ano de 2022.....	38

Lista de tabelas

Tabela 1- Padrões Nacionais de Qualidade do Ar (Resolução CONAMA N° 491 de 19/11/2018). 1. Média aritmética anual; 2. Média horária; 3. Máxima média móvel obtida no dia; 4. Média geométrica anual; 5. Medido nas partículas totais em suspensão. ppm = partes por m..... 24

Tabela 2. Anexo III níveis de atenção, alerta e emergência para poluentes e suas concentrações 25

Tabela 3 – Consolidado da distribuição das excedências e episódios de poluição atmosférica por poluente e estação de monitoramento no entorno do Complexo Portuário do Itaqui do ano. 27

1- INTRODUÇÃO

A qualidade do ar constitui um dos principais fatores determinantes para a saúde humana, o equilíbrio ambiental e o bem-estar das populações urbanas. A exposição contínua a poluentes atmosféricos está associada a milhões de mortes prematuras anualmente, o que reforça a necessidade de monitoramento e controle adequados em escala global (HEI, 2020; WHO, 2021).

Em áreas com elevada concentração de atividades econômicas, especialmente aquelas relacionadas ao transporte, ao armazenamento e ao processamento de cargas, observa-se tendência ao aumento das concentrações de poluentes devido à intensificação das emissões antrópicas (Rezende; Chein, 2020). Nesse contexto, os complexos portuários destacam-se como zonas estratégicas para o fluxo de mercadorias, mas também como potenciais emissores de poluentes provenientes de embarcações, movimentação de caminhões, equipamentos de pátio e processos industriais associados (Bauer, 2024).

No Brasil, o debate sobre qualidade do ar tem se fortalecido nas últimas décadas, impulsionado tanto pela ampliação das políticas públicas quanto pela crescente evidência dos impactos das emissões atmosféricas sobre a saúde e o meio ambiente. A Resolução CONAMA nº 491/2018, que estabelece os padrões nacionais de qualidade do ar, representa um marco importante nesse processo, ao definir limites mais rigorosos e incentivar o monitoramento contínuo, especialmente em regiões com maior pressão emissora (Brasil, 2018). Apesar desses avanços, diversos ambientes portuários brasileiros ainda carecem de estudos detalhados sobre a dinâmica da poluição atmosférica e seus efeitos sobre a população vizinha.

O Complexo Portuário do Itaqui, localizado em São Luís, Maranhão, destaca-se como um dos principais portos brasileiros em movimentação de combustíveis, grãos, minérios e cargas gerais, desempenhando papel essencial na economia regional e nacional (Maranhão, 2025). Entretanto, a intensa circulação de veículos pesados, embarcações de grande porte e máquinas industriais contribui para a emissão de poluentes atmosféricos, com destaque para os materiais particulados (MP), compostos nitrogenados e sulfurados. Estudos realizados na região já apontam indícios de impactos da atividade

portuária sobre os níveis de poluição em bairros adjacentes, como Anjo da Guarda, Vila Maranhão, Vila Sarney, Coqueiro, Santa Bárbara e Pedrinhas (Cologna *et al.*, 2017).

Além das fontes emissoras, as condições meteorológicas, incluindo velocidade e direção dos ventos, precipitação, radiação solar, temperatura e umidade, exercem influência decisiva sobre a dispersão, transformação e remoção dos poluentes (Brasil, 2016). Em regiões costeiras, como São Luís, caracterizadas pela atuação constante dos ventos alísios, elevada radiação solar e estação chuvosa bem definida, compreender a interação entre variáveis meteorológicas e concentrações de poluentes é fundamental para interpretar adequadamente os padrões observados e identificar períodos de maior vulnerabilidade (Silva; Ferreira, 2019).

A falta de estudos recentes que combinem dados de monitoramento da qualidade do ar com fatores climáticos e urbanos na região do porto representa uma lacuna importante. Este projeto busca suprir a carência de estudos, analisando criticamente os dados disponíveis. Utilizando a literatura e normas atuais como base, o objetivo é gerar informações que possam subsidiar a criação de políticas públicas mais eficientes e conscientizar a população sobre os perigos da poluição atmosférica.

Considerando a importância estratégica do Porto do Itaqui para a economia local, regional e nacional, é crucial avaliar se o crescimento econômico do setor está sendo acompanhado por medidas adequadas de controle ambiental e de proteção à saúde humana. Embora existam iniciativas de monitoramento contínuo no entorno do porto, ainda persistem lacunas relacionadas à análise temporal e espacial da poluição atmosférica, especialmente quando se consideram séries históricas recentes e múltiplos poluentes.

Assim, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a qualidade do ar em áreas adjacentes ao Complexo Portuário do Itaqui, em São Luís (MA), no período de 2020 a 2023, integrando informações sobre concentrações de poluentes, condições meteorológicas e distribuição espacial das estações.

Pretende-se identificar os poluentes críticos, os fatores meteorológicos associados, as áreas de maior vulnerabilidade e as possíveis implicações ambientais e para a saúde pública. Os resultados apresentados contribuem para

o fortalecimento do diagnóstico ambiental local e fornecem subsídios para ações de mitigação, planejamento portuário e gestão ambiental.

2- OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Analisar a qualidade do ar em áreas adjacentes ao Complexo Portuário do Itaqui, em São Luís, Maranhão.

2.2 Objetivos Específicos

- Levantar e sistematizar os dados de concentração de poluentes atmosféricos (NO₂, SO₂, MP10, MP2,5, O₃ e CO) registrados nas estações de monitoramento localizadas no entorno do Complexo Portuário do Itaqui, no período recente disponível;
- Comparar os valores obtidos com os padrões de qualidade do ar estabelecidos pela Resolução CONAMA n° 491/2018 e demais referências técnicas pertinentes;
- Analisar as correlações entre os níveis de poluentes atmosféricos e os fatores meteorológicos na área do Complexo Portuário do Itaqui, em São Luís;
- Avaliar os riscos potenciais à saúde pública das comunidades vizinhas ao complexo portuário, como Anjo da Guarda, Vila Maranhão e Coqueiros.

3- REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Qualidade do ar e poluição atmosférica

A qualidade do ar refere-se ao estado da atmosfera em relação à presença de poluentes capazes de causar impactos ambientais ou riscos à saúde humana (Brasil, 2020). A poluição do ar, é caracterizada pela presença de substâncias tóxicas em concentrações suficientes para interferir direta ou indiretamente no meio ambiente, na saúde, na segurança e no bem-estar das pessoas (Elson, 1992). A OMS (2021) define a poluição atmosférica como a presença de partículas e gases tóxicos em concentrações que ultrapassam a capacidade de dispersão natural do ambiente, podendo provocar consequências sanitárias graves, especialmente em populações vulneráveis.

Nas últimas décadas, estudos têm evidenciado que regiões urbanas, industriais e portuárias apresentam maiores concentrações de material

particulado e gases tóxicos devido à intensa movimentação de veículos, operações de carga e descarga e emissões de maquinário pesado (Dantas *et al.*, 2020; Le Quéré *et al.*, 2020). A poluição do ar ligada à operação portuária afeta diretamente a qualidade do ar tanto nos portos, quanto no seu entorno, podendo atingir comunidades próximas. Essa poluição atmosférica pode, então, gerar graves riscos à saúde, como problemas respiratórios tanto para os trabalhadores portuários quanto para as populações circunvizinhas do empreendimento (Guedes, 2005).

3.2 Poluentes atmosféricos

A Resolução CONAMA nº 491/2018 estabelece padrões nacionais de qualidade do ar para uma série de poluentes atmosféricos, incluindo o material particulado (MP10 e MP2,5), ozônio (O₃), dióxido de nitrogênio (NO₂), dióxido de enxofre (SO₂), monóxido de carbono (CO) e Partículas Totais em Suspensão (PTS).

3.2.1 Material particulado (MP10 e MP2,5)

O material particulado engloba partículas sólidas e líquidas presentes na atmosfera. O MP10 possui diâmetro aerodinâmico $\leq 10 \mu\text{m}$ e está associado principalmente a poeira ressuspensa, emissões veiculares pesadas e operações de granéis. Já o MP2,5, com diâmetro $\leq 2,5 \mu\text{m}$, apresenta maior capacidade de penetração no sistema respiratório, alcançando os alvéolos pulmonares e aumentando o risco de doenças cardiovasculares e respiratórias (CETESB, 2022).

3.2.2 Óxidos de nitrogênio (NO₂)

São formados durante processos de combustão. Em grandes cidades, os veículos geralmente são os principais responsáveis pela emissão dos óxidos de nitrogênio. O NO, sob a ação de luz solar se transforma em NO₂ tem papel importante na formação de oxidantes fotoquímicos como o ozônio. Dependendo das concentrações, o NO₂ causa prejuízos à saúde (CETESB, 2022).

3.2.3 Dióxido de enxofre (SO₂)

Resulta principalmente da queima de combustíveis que contém enxofre, como óleo diesel, óleo combustível industrial e gasolina. É um dos principais

formadores da chuva ácida. O dióxido de enxofre pode reagir com outras substâncias presentes no ar formando partículas de sulfato que são responsáveis pela redução da visibilidade na atmosfera (Lorensetti, 2023).

3.2.4 Monóxido de carbono (CO)

É um gás incolor e inodoro que resulta da queima incompleta de combustíveis de origem orgânica (combustíveis fósseis, biomassa etc.). Em geral é encontrado em maiores concentrações nas cidades, emitido principalmente por veículos automotores. Altas concentrações de CO são encontradas em áreas de intensa circulação de veículos (Lorensetti, 2023).

3.2.5 Ozônio troposférico (O₃)

O O₃ é um poluente secundário formado por reações fotoquímicas envolvendo compostos orgânicos voláteis e dióxido de nitrogênio, potencializado por altas temperaturas e radiação solar intensa (Lorensetti, 2023).

3.2.6 Partículas totais em suspensão (PTS)

Podem ser definidas de maneira simplificada como aquelas cujo diâmetro aerodinâmico é menor ou igual a 50 µm. Uma parte dessas partículas é inalável e pode causar problemas à saúde, outra parte pode afetar desfavoravelmente a qualidade de vida da população, interferindo nas condições estéticas do ambiente e prejudicando as atividades normais da comunidade (CETESB, 2022).

3.3 Poluição atmosférica em áreas portuárias

Ambientes portuários são reconhecidos como áreas críticas de emissão devido à combinação de atividades industriais e logísticas. Estudos internacionais demonstram que portos apresentam elevados níveis de Material Particulado (MP10 e MP2,5), Dióxido de Enxofre (SO₂) e Dióxido de Nitrogênio NO₂, poluentes amplamente associados à operação de navios e atividades de movimentação de carga (Seinfeld, Pandis, 2006; WHO, 2021). Tais concentrações são particularmente elevadas em períodos secos, quando há maior ressuspensão de poeira e condições menos favoráveis à dispersão atmosférica (Zoran *et al.*, 2020).

No Brasil, portos como Santos, Rio Grande, Paranaguá e Itaquí apresentam padrões semelhantes. Nesses locais, as concentrações de poluentes tendem a aumentar no período seco e diminuir no período chuvoso (Pinheiro; Venturi; Galvani, 2020). As operações de descarga e manuseio de grãos sólidos (minérios, carvão, fertilizantes e grãos) contribuem diretamente para o aumento dos níveis de partículas em suspensão (MP10 e MP2,5), caracterizando uma fonte significativa de poluição local (Pinheiro; Venturi; Galvani, 2020).

3.4 Influência das Condições Meteorológicas

A dispersão dos poluentes atmosféricos depende fortemente de variáveis meteorológicas como velocidade e direção do vento, umidade relativa do ar, precipitação e estabilidade atmosférica (Seinfeld; Pandis, 2006). Em São Luís, a sazonalidade é marcante: o período chuvoso (dezembro a maio) está associado à redução dos níveis de MP10 e MP2,5, devido ao mecanismo de lavagem da atmosfera pela chuva (Pinheiro; Venturi; Galvani, 2020). Por outro lado, o período seco (junho a novembro) favorece o aumento dos níveis de partículas.

A interação entre ventos predominantes do quadrante leste, temperatura elevada e baixa precipitação, características da estação seca em São Luís, favorece a permanência dos poluentes na Camada Limite Atmosférica (CLA). Essa condição de estabilidade ou baixa dispersão contribui para o acúmulo de poluentes, especialmente nas regiões próximas ao Complexo Portuário do Itaquí (Pinheiro; Venturi; Galvani, 2020).

3.5 A Pandemia de COVID-19 e Seus Efeitos na Qualidade do Ar

A pandemia de COVID-19 (2020–2021) representou um evento sem precedentes na dinâmica ambiental global. As medidas de isolamento social e restrições de circulação de veículos e atividades industriais, implementadas a partir de março de 2020, provocaram uma redução significativa em poluentes atmosféricos como NO₂, MP10 e MP2,5, que estão diretamente relacionados à mobilidade urbana e fontes industriais (Le Quéré *et al.*, 2020; OMS, 2021).

Estudos globais apontaram reduções de 20% a 60% nas concentrações de NO₂ durante os lockdowns (Le Quéré *et al.*, 2020). Na América do Sul,

padrões semelhantes foram observados em diversas cidades brasileiras, incluindo a diminuição do material particulado e de gases associados ao transporte pesado (Dantas *et al.*, 2020).

Em áreas portuárias, a literatura mostrou efeitos variáveis: alguns portos registraram queda no fluxo de cargas, enquanto outros mantiveram ou até ampliaram operações essenciais, o que sugere a complexidade da resposta local (JBI, 2025). Contudo, a pandemia alterou o fluxo de caminhões e carretas, horários de operação, circulação de veículos leves nos bairros adjacentes e as emissões associadas ao transporte urbano.

Portanto, ao analisar os dados de qualidade do ar que contemplem o período pandêmico é imprescindível considerar essas condições excepcionais, pois as oscilações nos níveis de poluentes e o número de excedências podem ser explicados pela menor mobilidade e pelas variações nas emissões do setor de transporte (Dantas *et al.*, 2020).

3.6 Impactos da Poluição do Ar na Saúde Humana

A poluição do ar é considerada o maior risco ambiental para a saúde global, estando associada à morte de cerca de 7 milhões de pessoas a cada ano (OMS, 2021). A exposição prolongada a poluentes atmosféricos está associada ao aumento de mortalidade e hospitalizações por doenças respiratórias e cardiovasculares (OMS, 2021; INCA, 2022).

Os principais efeitos na saúde incluem:

- Crises de asma e bronquite;
- Desenvolvimento e agravamento da Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica (DPOC);
- Aumento de hospitalizações pediátricas e agravo de doenças cardíacas;
- Câncer de pulmão, especialmente devido à exposição ao MP2,5, que é capaz de penetrar profundamente nos pulmões e entrar na corrente sanguínea.

Com base na literatura analisada, observa-se que a qualidade do ar em ambientes urbanos e portuários constitui um fenômeno complexo, fortemente condicionado pela interação entre fontes emissoras antrópicas, características operacionais das atividades econômicas e variáveis meteorológicas locais. A

predominância de poluentes como material particulado (MP_{10} e $MP_{2,5}$), óxidos de nitrogênio, dióxido de enxofre, monóxido de carbono e ozônio troposférico, amplamente documentada em áreas portuárias e industriais, reforça a relevância desses ambientes como zonas críticas de exposição humana.

Assim, entende-se que a exposição contínua a esses poluentes constitui um relevante fator de risco à saúde humana, especialmente em populações residentes no entorno de complexos portuários, o que reforça a necessidade de abordagens integradas que articulem monitoramento ambiental, planejamento urbano, gestão portuária e políticas públicas que conciliem desenvolvimento econômico, proteção ambiental e promoção da saúde coletiva.

4-REFERÊNCIAS

BAINY, B. K.; ALVES, D. D.; PEREIRA, G.; KERR, A. S. Avaliação da qualidade do ar no Sudeste do Brasil durante a pandemia da COVID-19. *Ciência & Saúde Coletiva*, Rio de Janeiro, v. 26, n. 9, p. 3493–3505, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/csp/a/vtTV7NsmvyynsFkpZNB3sMB/>. Acesso em: 13 nov. 2025.

BAUER, G.; OLIVEIRA-SALES, E.; RAMIRES, R.; MAQUIGUSSA, E.; BASTOS, P. A emissão de NOx gerada pelos navios no Porto de Santos e a ocorrência de eventos de saúde relacionados a doenças respiratórias no Município de Santos. *Research, Society and Development*, v. 13, e6713746311, 2024. DOI: 10.33448/rsd-v13i7.46311. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/382951462>. Acesso em: 30 jun. 2025.

BLOG COONTROL. Tipos de gases poluentes para o meio ambiente. Disponível em: <https://blog.coontrol.com.br/tipos-de-gases-poluentes-para-o-meio-ambiente/>. Acesso em: 30 jun. 2025.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). *Resolução nº 491, de 19 de novembro de 2018*. Dispõe sobre os padrões de qualidade do ar. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 20 nov. 2018.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. *Qualidade do ar no Estado de São Paulo – 2022*. São Paulo: CETESB, 2022. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/>. Acesso em: 23 nov. 2025.

CONCAWE. The impact of shipping emissions on urban air quality in Europe – a port/city analysis. *Concawe Review*, v. 32, n. 2, p. 1–16, 2024. Disponível em: <https://www.concawe.eu/wp-content/uploads/The-impact-of-shipping-emissions-on-urban-air-quality-in-Europe-a-port-city-analysis.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2025.

DANTAS, G.; SICILIANO, B.; FRANÇA, B. B.; SILVA, C. M.; ARBILLA, G. The impact of COVID-19 partial lockdown on the air quality of the city of Rio de

Janeiro, Brazil. *Science of the Total Environment*, v. 729, p. 139085, 2020. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139085.

ENDRESEN, Ø. et al. Emission from international sea transportation and environmental impact. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 108, n. D17, 2003. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2003JGRD..108.4560E>. Acesso em: 30 jun. 2025.

FEPAM – Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler. *Relatório da qualidade do ar da região do Porto de Rio Grande*. Porto Alegre: FEPAM, 2019.

JBÍ – Instituto Joanna Briggs. *Impacto da pandemia de COVID-19 na emissão de poluentes atmosféricos em regiões portuárias*. Santos: UNIMES, 2025. Disponível em: <https://mestrado-saude-meio-ambiente.unimes.br/wp-content/uploads/2023/11/Dissertacao-Sandro-Mastellari-07-07.pdf>. Acesso em: 23 nov. 2025.

KAMPA, M.; CASTANAS, E. Human health effects of air pollution. *Environmental Pollution*, v. 151, n. 2, p. 362–367, 2008. DOI: 10.1016/j.envpol.2007.06.012. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17646040/>. Acesso em: 30 jun. 2025.

LE QUÉRE, C. et al. Temporary reduction in daily global CO₂ emissions during the COVID-19 pandemic. *Nature Climate Change*, v. 10, p. 647–653, 2020. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41558-020-0797-x>. Acesso em: 23 nov. 2025.

LIMA, S. O impacto da poluição industrial do ar na mortalidade no Brasil. *Nexo Jornal*, 3 fev. 2025. Disponível em: <https://www.nexojornal.com.br/externo/2025/02/03/o-impacto-da-poluicao-industrial-do-ar-na-mortalidade-no-brasil>. Acesso em: 30 jun. 2025.

LORENSETTI, R. Conheça os tipos de gases poluentes para o meio ambiente. Disponível em: <https://blog.coontrol.com.br/tipos-de-gases-poluentes-para-o-meio-ambiente/>. Acesso em: 30 jun. 2025.

MARANHÃO. Governo do Estado do Maranhão. *Modernização, descarbonização e eficiência logística do Porto do Itaqui são destaques na Intermodal South America 2025*. São Luís, 2025.

NAKADA, L. Y. K.; URBAN, R. C. COVID-19 pandemic: impacts on the air quality during the partial lockdown in São Paulo state, Brazil. *Science of the Total Environment*, v. 730, p. 139087, 2020. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139087.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE (OMS). *Air quality guidelines: global update 2021*. Geneva: WHO, 2023.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE (OMS). *Poluição do ar ambiente (externo)*. Geneva: WHO, 2024. Disponível em: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health). Acesso em: 30 jun. 2025.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE (OMS). *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. Geneva: WHO, 2021.

PINHEIRO, C. F.; VENTURI, A. C. T.; GALVANI, E. Poluição atmosférica: estudo de caso do Município de São Luís do Maranhão. *Sociedade e Natureza*, v. 32, p. 808–819, 2020. DOI: 10.14393/SN-v32-2020-56162.

PORTOS RS. *Estudo de Impacto Ambiental do Porto de Rio Grande*. Rio Grande: Portos RS, 2023. Disponível em: <https://www.portosrs.com.br/site/public/uploads/site/resp-ambiental/35.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2025.

SARAÇOĞLU, H.; DENİZ, C.; KILIÇ, A. An investigation on the effects of ship

sourced emissions in Izmir Port, Turkey. *The Scientific World Journal*, v. 2013, art. 218324, 2013. DOI: 10.1155/2013/218324. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3807719/>. Acesso em: 30 jun. 2025.

SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2016.

SEMA – Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Naturais (MA). *Relatório de Monitoramento da Qualidade do Ar no Distrito Industrial de São Luís – DISAL*. São Luís: SEMA, 2020.

SILVA, A. E. P. P. da et al. Avaliação dos impactos da poluição atmosférica nas grandes cidades: consequências para a saúde pública e o meio ambiente. *IOSR Journal of Business and Management*, v. 27, n. 1, p. 25–34, 2025. Disponível em: <http://www.iosrjournals.org/iosr-jbm/papers/Vol27-issue1/Ser2/C2701022534.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2025.

SILVA, C. A. Estudos e técnicas de pesquisa de clima urbano com foco no subsistema físico-químico. In: _____. *Clima e gestão do território*. Jundiaí: Paco Editorial, 2016. p. 51–68.

STATE OF GLOBAL AIR (SoGA). *State of Global Air Report 2024*. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://www.stateofglobalair.org/resources/report/state-global-air-report-2024>. Acesso em: 27 jun. 2025.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). *WHO global air quality guidelines*. Geneva: WHO, 2021.

5-CAPÍTULO

ANÁLISE DA QUALIDADE DO AR EM ÁREAS ADJACENTES AO COMPLEXO PORTUÁRIO DO ITAQUI, SÃO LUÍS – MA

Beatriz Camara Xavier, Antonio Carlos Leal de Castro¹

¹*Universidade Federal do Maranhão*

RESUMO

Este estudo avaliou a qualidade do ar no entorno do Complexo Portuário do Itaqui, em São Luís (MA), no período pós-pandemia (2021–2022), com base em dados das estações de monitoramento do Distrito Industrial de São Luís (DISAL). Foram analisados os poluentes NO₂, SO₂, O₃, CO, MP₁₀ e MP_{2,5}, comparando-se os registros com os padrões da Resolução CONAMA nº 491/2018 e com os níveis de Atenção, Alerta e Emergência, além da influência de variáveis meteorológicas. Os resultados indicaram que MP₁₀, MP_{2,5} e CO permaneceram dentro dos limites normativos, caracterizando um perfil de poluição predominantemente gasosa. O NO₂ apresentou as maiores frequências de ultrapassagens ao PI-1, especialmente nas estações Santa Bárbara, Vila Maranhão, Coqueiros e Pedrinhas, refletindo a forte influência do tráfego pesado e das operações portuárias. O SO₂, embora com menor frequência, apresentou episódios críticos de Alerta e Emergência, associados à queima de combustíveis fósseis. O elemento O₃ destacou-se pela elevada ocorrência de episódios de Emergência em Santa Bárbara em 2022, indicando intensa formação fotoquímica. A comparação entre os anos mostrou que, em 2021, a menor atividade portuária permitiu melhor dispersão dos poluentes, enquanto em 2022 a retomada das operações superou a capacidade de autodepuração atmosférica. Conclui-se que a degradação da qualidade do ar na região é predominantemente controlada pelas atividades portuárias, representando risco à saúde das populações vizinhas

Palavras-chave: Poluição atmosférica; Portos; NO₂; SO₂; Ozônio; Qualidade do ar; Saúde pública.

.

Artigo a ser submetido na Atmospheric Environment – Qualis: A1.

6- INTRODUÇÃO

A poluição atmosférica constitui um problema urgente, com impactos significativos tanto para o meio ambiente quanto para a saúde humana em escala global sobretudo devido ao crescimento das cidades, das atividades econômicas ligadas ao uso de combustíveis fósseis e aos processos industriais (Silva *et al.*, 2025). No entanto, a ocorrência de queimadas, o uso de veículos desregulados, construtivos urbanos inadequados e ruas sem cobertura asfáltica, podem contribuir de forma mais significativa para geração de poluição do que contaminantes industriais (Silva, 2016).

A exposição prolongada a poluentes como material particulado, dióxido de nitrogênio e dióxido de enxofre está diretamente associada ao aumento de doenças respiratórias e cardiovasculares, além de elevar a mortalidade prematura (OMS, 2023). Segundo a OMS (2024), estima-se que em 2019 a poluição do ar causou cerca de 4,2 milhões de mortes precoces, sobretudo em países de renda baixa e média (89%). Em 2021, estima-se que a poluição causou 8,1 milhões de mortes, tornando-se o segundo maior fator de risco para mortalidade, atrás apenas da hipertensão (SoGA, 2024).

No Brasil, frequentemente as regiões industrializadas apresentam níveis de poluição atmosférica que excedem os padrões estabelecidos pela resolução nacional (CONAMA n° 491/2018). Isso reforça a necessidade urgente de políticas mais eficazes de monitoramento e controle ambiental, especialmente em municípios industriais, que concentram as maiores taxas de mortalidade por poluição do ar (Lima, 2025).

A cidade de São Luís, capital do estado do Maranhão, abriga o Complexo Portuário do Itaqui, uma das maiores e mais movimentadas instalações portuárias do Brasil, movimentando mais de 34 milhões de toneladas em 2024 (MARANHÃO, 2025). A proximidade do Complexo Portuário do Itaqui com áreas residenciais densamente povoadas expõe diariamente milhares de moradores à poluição atmosférica (Pinheiro *et al.*, 2020). Estudos realizados no Distrito Industrial de São Luís, onde o Complexo está inserido, indicaram concentrações elevadas de NO₂, SO₂ e material particulado (MP10 e MP2,5) (SEMA, 2020).

A pandemia de COVID-19 gerou um evento ambiental sem precedentes, principalmente devido às medidas de isolamento social, restrições de circulação de veículos e atividades industriais (Le Quéré *et al.*, 2020). Essas restrições resultaram em uma redução significativa de poluentes atmosféricos ligados à mobilidade urbana e fontes industriais, como NO_2 , MP_{10} e $\text{MP}_{2,5}$ (OMS, 2021). Estima-se que os níveis de NO_2 tenham apresentado diminuição global entre 20% e 60% (Le Quéré *et al.*, 2020). No Brasil, registrou-se redução de material particulado e gases associados ao transporte pesado (Dantas *et al.*, 2020).

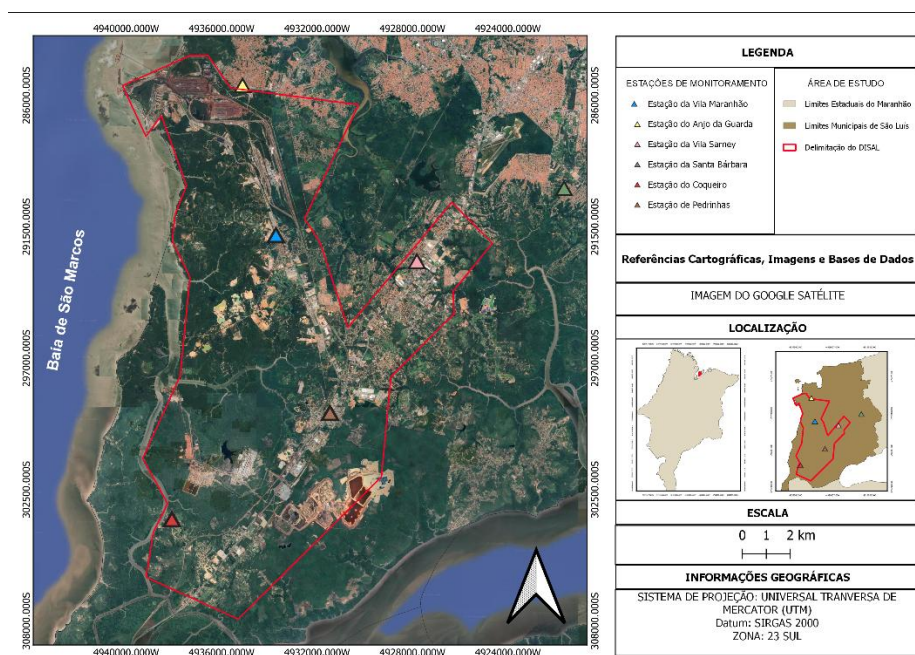
Diante desse cenário, analisar a qualidade do ar nas áreas próximas ao Complexo Portuário do Itaqui oferece, em escala local, importantes insights globais sobre os riscos da poluição para a saúde pública, além de evidenciar os impactos da poluição atmosférica de origem humana.

7- MATERIAL E MÉTODOS

6.1 Área de estudo

A pesquisa foi realizada a partir dados coletados nas áreas adjacentes ao Complexo Portuário do Itaqui, localizado na porção sudoeste da Ilha de São Luís, no estado do Maranhão, Brasil (Figura 1).

Figura 1- Estações de Monitoramento de Qualidade do Ar, São Luís, Maranhão



Além do Porto do Itaqui, a região abriga outros terminais como o da Alumar, Ponta da Madeira (Vale S.A.), além de diversos empreendimentos industriais inseridos no Distrito Industrial de São Luís (DISAL).

A área de influência direta do estudo abrange os bairros Anjo da Guarda, Vila Maranhão, Coqueiros, Pedrinhas, Vila Sarney e Santa Barbara regiões urbanas que sofrem influência direta das atividades portuárias e industriais.

Essas áreas são também pontos estratégicos de monitoramento da qualidade do ar, contando com estações automáticas operadas por órgãos ambientais estaduais e/ou instituições conveniadas, as quais fornecem dados em tempo real sobre a concentração de poluentes atmosféricos.

6.2 Coleta de dados

A seleção do período de análise se deu com base no período pós pandemia de COVID-19 (2021-2022). Os dados de qualidade do ar foram obtidos a partir de relatórios da rede de monitoramento RAMQar DISAL disponibilizados pela Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Naturais (SEMA/MA). Na ocasião foram analisados os valores de dióxido de nitrogênio (NO₂), dióxido de enxofre (SO₂), monóxido de carbono (CO), ozônio troposférico (O₃), material particulado inalável (MP₁₀) e material particulado fino (MP_{2,5}) dos meses de janeiro a novembro de ambos os anos.

Para as avaliações dos riscos potenciais à saúde pública das comunidades vizinhas ao complexo portuário foram comparados os valores de ultrapassagem ao longo dos dois anos das seis estações de monitoramento com os padrões da CONAMA nº 491/2018 e analisando os possíveis impactos na saúde humana.

A Resolução CONAMA nº 491, de 19 de novembro de 2018, estabelece os Padrões Nacionais de Qualidade do Ar no Brasil como instrumentos de gestão ambiental voltados à proteção da saúde e do meio ambiente, organizando-os de forma progressiva para promover a melhoria contínua da qualidade do ar. Nessa estrutura, os Padrões Intermediários (PI-1, PI-2 e PI-3) representam valores temporários de concentração de poluentes atmosféricos (Tabela 1) que devem ser adotados em etapas sucessivas, funcionando como metas graduais para a

redução da poluição ambiente até que se alcance o nível mais rigoroso de controle.

O Padrão Final (PF), por sua vez, corresponde ao valor-guia definitivo de qualidade do ar, baseado nas recomendações da Organização Mundial da Saúde, utilizado como parâmetro de referência para a proteção da saúde humana ao término da transição entre os níveis intermediários (BRASIL 2018).

Tabela 1- Padrões Nacionais de Qualidade do Ar (Resolução CONAMA N° 491 de 19/11/2018). 1. Média aritmética anual; 2. Média horária; 3. Máxima média móvel obtida no dia; 4. Média geométrica anual; 5. Medido nas partículas totais em suspensão. ppm = partes por m.

Poluente Atmosférico	Sigla	Período de Referência	PI-1 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PI-2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PI-3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PF ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Ppm
Material Particulado	MP10	24 horas	120	100	75	50	-
		Anual ¹	40	35	30	20	-
Material Particulado	MP2,5	24 horas	60	50	37	25	-
		Anual ¹	20	17	15	10	-
Dióxido de Enxofre	SO ₂	24 horas	125	50	30	20	-
		Anual ¹	40	30	20	-	-
Dióxido de Nitrogênio	NO ₂	1 horas ²	260	240	220	200	-
		Anual ¹	40	50	45	40	-
Partículas Totais em Suspensão	PTS	24 horas	-	-	-	240	-
		Anual ⁴	-	-	-	80	-
Fumaça	-	24 horas	120	100	75	50	-
		Anual ¹	40	35	30	20	-
Ozônio	O ₃	8 horas ³	140	130	120	100	-
Monóxido de Carbono	CO	8 horas ³	-	-	-	-	9
Chumbo	Pb ⁵	Anual ¹	-	-	-	0,5	-

A mesma resolução também dispõe sobre a gestão de episódios críticos de poluição, classificando-os em níveis de Atenção, Alerta e Emergência (Tabela 2), os quais devem ser declarados quando as concentrações de poluentes atingem limites específicos previstos em norma técnica (incluídos no Anexo III), acionando protocolos de resposta para mitigar riscos à população exposta (BRASIL, 2018).

Tabela 2. Anexo III níveis de atenção, alerta e emergência para poluentes e suas concentrações

Poluentes e Concentrações						
Nível	SO ₂	Material Particulado		CO	O ₃	NO ₂
	µg/m ³ ±24h	MP ₁₀ µg/m ³ (± 24h)	MP _{2,5} µg/m ³ (±24h)	ppm (± 8h)	µg/m ³ (±8h)	µg/m ³ ±1h)
Atenção	800	250	125	15	200	1.130
Alerta	1.600	420	210	30	400	2.260
Emergência	2.100	500	250	40	600	3.000

Para analisar as correlações entre os níveis de poluentes atmosféricos e os fatores meteorológicos foram utilizados dados de monitoramento da SEMA/MA e informações meteorológicas da própria estação de monitoramento de ar que registrou também dados de meteorologia para o período analisado.

6.3 Análise de dados

A análise estatística e gráfica dos dados foi realizada com o auxílio dos softwares Microsoft Office Excel (versão 2016). Os dados foram organizados em tabelas e gráficos comparativos, que relacionam as concentrações de poluentes aos padrões legais vigentes e às variações meteorológicas.

Foram elaboradas tabelas para analisar os valores de ultrapassagens dos padrões de qualidade do ar das seis estações de monitoramento, para todas as séries de dados de poluentes atmosféricos (MP10, MP2,5, SO2, NO2, O3) e de parâmetros meteorológicos (temperatura, umidade, direção e velocidade do vento) a fim de caracterizar o comportamento geral de cada variável, identificar as concentrações típicas e a variabilidade dos dados ao longo do período do estudo.

Gráficos de séries temporais foram confeccionados para acompanhar a evolução das concentrações de poluentes e dos fatores meteorológicos ao longo do tempo. Gráficos de dispersão foram utilizados para ilustrar as relações entre pares de variáveis, como poluente e temperatura.

A comparação direta dos dados com os padrões da Resolução CONAMA no 491/2018, foram feitas através de gráficos de barras e linhas que evidenciem os períodos de ultrapassagem. Além disso, foi avaliado o número de vezes em que os valores ficaram fora dos padrões de qualidade do ar e sua distribuição temporal e espacial, a fim de permitir uma interpretação integrada sobre os

fatores que influenciam os níveis de poluição e sua relação com as atividades portuárias e urbanas. Para georreferenciamento das estações e espacialização dos dados utilizou-se o software QGIS (versão 3.44.0).

8- RESULTADOS E DISCUSSÃO

8.1 Panorama Geral das Ultrapassagens e Excedências

A análise integrada dos dados de qualidade do ar e das condições meteorológicas no entorno do Complexo Portuário do Itaqui, no período de 2021 a 2022, revela padrões consistentes que evidenciam a influência direta das operações portuárias, do tráfego pesado e da variabilidade atmosférica sobre a dinâmica dos poluentes.

De acordo com os estudos de Toscano (2023) e Owusu-Mfum *et al.* (2023), as áreas adjacentes a portos marítimos tendem a apresentar concentrações elevadas de poluentes devido à sobreposição de fontes móveis e estacionárias, como navios, equipamentos de carga e veículos logísticos. No caso específico do Itaqui, esse cenário é agravado pela intensa circulação de caminhões de grande porte para o escoamento de grãos, combustíveis e minérios, o que resulta na liberação contínua de óxidos de nitrogênio, dióxido de enxofre e material particulado na atmosfera (EMAP,2023).

Embora o tráfego de veículos pesados seja uma fonte conhecida de material particulado, observa-se que, ao longo do período analisado, os índices de MP100, MP10, MP2,5 e monóxido de carbono (CO) não apresentaram excedências relevantes aos padrões estabelecidos. Isso indica que a poluição atmosférica na região é predominantemente associada a poluentes gasosos, com destaque para o dióxido de nitrogênio NO₂, que apresentou a maior frequência de violações ao Índice de Qualidade do Ar (PI-1). Esse poluente registrou valores elevados especialmente nas estações de Vila Maranhão (41,2%), Santa Bárbara (36,2%), Coqueiros (27,5%) e Pedrinhas (26,4%), reforçando a tese de que a queima de diesel em fontes móveis e as atividades portuárias contínuas são os principais vetores de degradação da qualidade do ar local.

Quanto ao dióxido de enxofre SO₂, apesar de uma frequência de excedência inferior à do NO₂, foram registrados episódios críticos que atingiram

os níveis de Alerta e Emergência, principalmente nas estações de Santa Bárbara (11,2%) e Pedrinhas (9,1%). Tais eventos caracterizam episódios de poluição aguda, diretamente associados a emissões industriais e à queima de combustíveis fósseis no complexo. Paralelamente, o ozônio O₃ apresentou um comportamento distinto, com elevadas frequências de níveis de Emergência na estação Santa Bárbara (43,7%) e em Vila Sarney como mostrado na (Tabela 3). Esse fenômeno indica uma intensa formação fotoquímica a partir de precursores emitidos tanto na área industrial quanto portuária, o que torna mais complexo o perfil de poluição da região.

Tabela 3 – Consolidado da distribuição das excedências e episódios de poluição atmosférica por poluente e estação de monitoramento no entorno do Complexo Portuário do Itaquí do ano.

Poluentes	Estações	acima PI-1	PI-1 %	atenção / evento	Atenção %	Alerta evento	Alerta %	Emergência	Emergência %
MP10	Todas	-	0,00%	-	0,00%	-	0,00%	-	0,00%
MP2,5	Todas	-	0,00%	-	0,00%	-	0,00%	-	0,00%
MP100 (PTS)	Todas	-	0,00%	-	0,00%	-	0,00%	-	0,00%
NO ₂	Anjo da Guarda	1968	12,90 %	55	0,60%	2	0,10%	4	0,70%
NO ₂	Coqueiros	4369	27,00 %	1200	8,40%	145	1,20%	-	0,00%
NO ₂	Pedrinhas	3640	26,40 %	176	1,20%	22	0,30%	-	0,00%
NO ₂	Santa Bárbara	5947	36,20 %	373	2,30%	6	0,10%	-	0,00%
NO ₂	Vila Maranhão	1135	41,20 %	11	0,10%	-	0,00%	-	0,00%
NO ₂	Vila Sarney	3628	25,40 %	1788	11,10%	263	1,60%	-	0,00%
SO ₂	Anjo da Guarda	224	33,30 %	19	2,90%	2	0,30%	1	0,20%
SO ₂	Coqueiros	191	28,10 %	55	8,20%	16	2,40%	20	3,00%
SO ₂	Pedrinhas	91	14,40 %	14	2,30%	2	0,30%	59	9,10%
SO ₂	Santa Barbara	54	8,30%	37	5,60%	10	1,60%	76	11,20%
SO ₂	Vila Maranhão	268	40,50 %	16	2,30%	0	0,00%	-	0,00%
SO ₂	Vila Sarney	72	11,90 %	15	3,80%	2	0,50%	4	1,30%
O ₃	Anjo da Guarda	15	1,20%	26	1,40%	16	0,80%	14	0,80%
O ₃	Coqueiros	9	0,70%	23	3,40%	5	0,70%	21	3,30%
O ₃	Pedrinhas	33	0,90%	26	1,50%	25	1,40%	218	7,70%
O ₃	Santa Bárbara	-	0,00%	6	0,90%	72	10,70 %	291	43,70%
O ₃	Vila Maranhão	5	0,70%	-	0,00%	1	0,20%	27	4,10%
O ₃	Vila	48	3,20%	193	29,70%	65	8,90%	54	3,80%

CO	Sarney Anjo da Guarda	-	0,00%	-	0,00%	-	0,00%	-	0,00%
CO	Coqueiros	-	0,00%	-	0,00%	-	0,00%	-	0,00%
CO	Pedrinhas	1	0,10%	-	0,00%	-	0,00%	-	0,00%
CO	Santa Bárbara	12	1,70%	-	0,00%	-	0,00%	-	0,00%
CO	Vila Maranhão	-	0,00%	-	0,00%	-	0,00%	-	0,00%
CO	Vila Sarney	-	0,00%	-	0,00%	-	0,00%	-	0,00%

Já na análise da distribuição das Ultrapassagens de NO₂ entre 2021 e 2022, apresentadas na Figura 2 e 3, revela uma mudança significativa no padrão espacial da poluição na região. Enquanto em 2021 as ultrapassagens ao nível de Plano de Intervenção 1 (PI-1) e os episódios de Atenção e Alerta estavam dispersos entre as estações de Coqueiros, Pedrinhas e Vila Sarney, o ano de 2022 registrou uma forte concentração desses eventos na estação Santa Bárbara. Esse deslocamento sugere que a poluição, antes caracterizada por uma natureza na zona mais industrial, passou a refletir predominantemente o impacto de fontes industriais e automobilística vinculadas ao complexo DISAL, no setor urbano dada a sua proximidade da estação Santa Bárbara com essa área de operação.

Figura 2. Frequência de excedências e episódios críticos de NO₂ nas estações adjacentes ao Complexo Portuário do Itaquí para o ano de 2021.

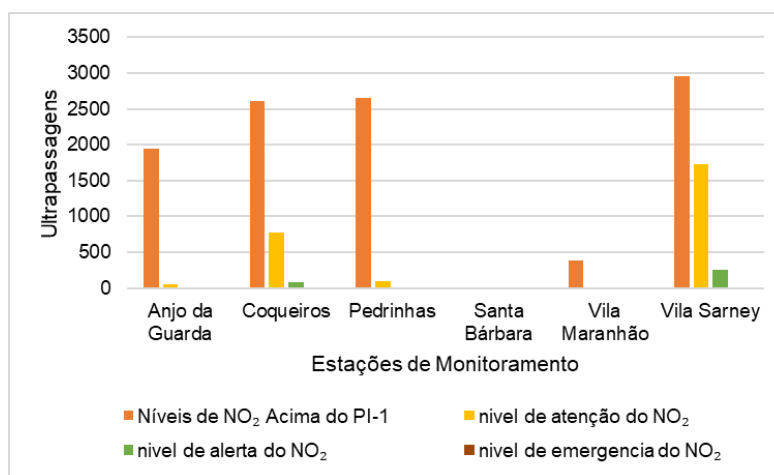
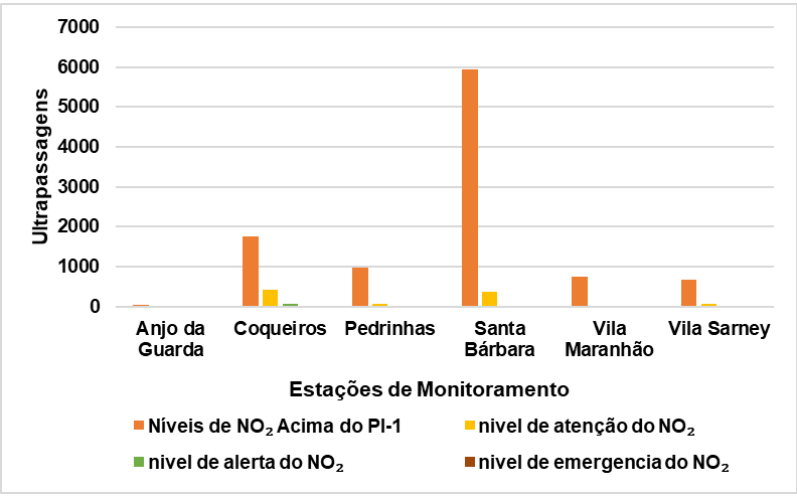


Figura 3. Frequência de excedências e episódios críticos de NO₂ nas estações adjacentes ao Complexo Portuário do Itaqui para o ano de 2022.



Essa predominância do NO₂ em áreas portuárias é corroborada pelos estudos de Kampa e Castana (2008), que associam o poluente diretamente a fontes primárias de combustão em alta temperatura, incluindo caminhões a diesel, máquinas de pátio e navios em processo de atracação. Os óxidos de nitrogênio (NO_x), reconhecidos como importantes indicadores das emissões veiculares e marítimas, apresentam concentrações elevadas em zonas costeiras em função das emissões provenientes dos motores principais e auxiliares das embarcações, bem como do elevado fluxo de veículos pesados, comprometendo de forma significativa a qualidade do ar local (Endresen *et al.*, 2003; Saracoglu *et al.*, 2013).

De acordo com Bauer (2024), essa dinâmica é uma característica recorrente em grandes complexos logísticos, a exemplo do Porto de Santos, onde a correlação entre as emissões de NO_x de origem marítima e o aumento de problemas respiratórios na população local tem sido objeto de estudo. No Brasil, o Porto de Rio Grande enfrenta desafios ambientais semelhantes devido à sua alta movimentação (Portos RS, 2023), enquanto, no cenário internacional, o Porto de Rotterdam apresenta dados ainda mais expressivos, com a literatura indicando que o transporte marítimo pode ser responsável por até 60% das concentrações de NO₂ nas áreas adjacentes (CONCAWE, 2024). Portanto, os dados observados em 2022 reforçam a influência direta da atividade portuária sobre o perfil atmosférico da região de Santa Bárbara.

Na análise comparativa das excedências de SO₂ revela uma mudança significativa no perfil das emissões industriais e logísticas na área de influência

do Complexo Portuário do Itaqui. Em 2021, o registro de eventos de emergência em Pedrinhas e Santa Bárbara sugeria um impacto distribuído, indicando episódios agudos, porém menos localizados (Figura 4). No entanto, em 2022, a expressiva concentração desses episódios na estação Santa Bárbara, somada ao aumento de registros em Coqueiros e Vila Sarney, evidencia uma intensificação direta da atividade emissora vinculada às operações portuárias (Figura 5). Conforme aponta a IMO (2020), o dióxido de enxofre é um poluente intrinsecamente associado à queima de combustíveis fósseis, sendo que as emissões de navios que utilizam óleo combustível pesado representam uma das principais fontes globais desse gás em zonas costeiras.

Figura 4. Ocorrência de ultrapassagens ao padrão intermediário (PI-1) e níveis de severidade do SO₂ nas estações do DISAL para o ano de 2021.

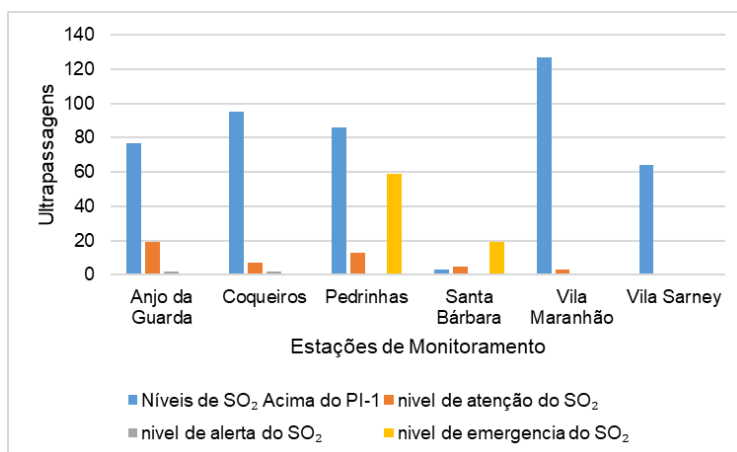
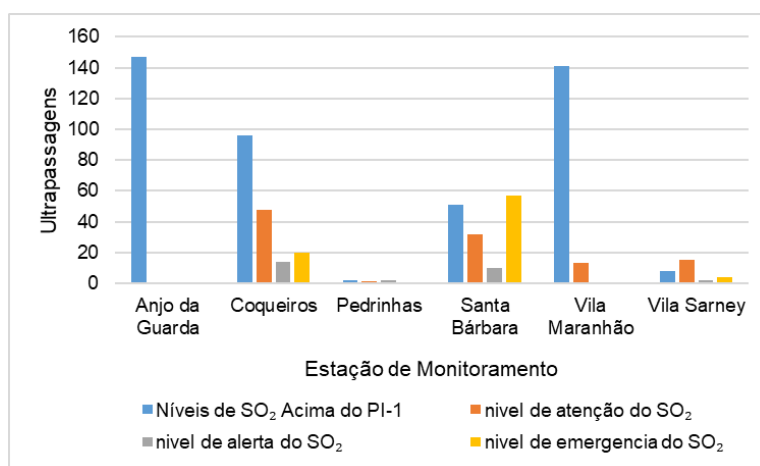


Figura 5. Ocorrência de ultrapassagens ao padrão intermediário (PI-1) e níveis de severidade do SO₂ nas estações do DISAL para o ano de 2022.



Assim, o agravamento dos eventos de emergência em 2022 reflete uma maior carga operacional e o aumento da densidade logística no porto. A literatura

destaca que o tráfego de grandes embarcações e o uso de diesel de alto teor de enxofre em locomotivas e maquinário de pátio são determinantes para a degradação da qualidade do ar local (Ekmekçioğlu *et al*, 2022). Segundo a World Health Organization (2021), a persistência de altas concentrações de SO₂ em áreas residenciais a complexos industriais é um fator de risco crítico, uma vez que este poluente pode causar inflamação das vias aéreas mesmo em exposições de curto prazo, o que justifica a gravidade dos episódios registrados nas estações que circundam o perímetro operacional do Itaqui.

Por outro lado, o deslocamento das plumas para zonas como Vila Sarney e Coqueiros consolida o complexo como o principal ponto focal de poluição por enxofre na região. Estudos realizados em grandes complexos portuários indicam que a proximidade dos terminais de granéis líquidos e sólidos é o fator preponderante para a ocorrência de excedências severas, independentemente de fatores externos, devido à natureza contínua das operações de carga e descarga e ao funcionamento dos motores auxiliares dos navios atracados (Fink *et al.*, 2023).

A análise das (Figuras 6 e 7), que detalham a distribuição das excedências de ozônio O₃ entre 2021 e 2022, revela uma transição importante na dinâmica atmosférica da região. Enquanto em 2021 os níveis elevados de O₃ estavam dispersos por estações como Pedrinhas, Santa Bárbara e Vila Sarney indicando uma formação fotoquímica distribuída, o ano de 2022 apresentou uma mudança para um padrão fortemente concentrado na estação Santa Bárbara. Esta estação não apenas registrou um aumento expressivo de eventos em nível de emergência, como também contrastou com a redução acentuada nas demais áreas monitoradas. Esse fenômeno evidencia o papel de Santa Bárbara como uma zona receptora crítica, onde ocorre a transformação dos precursores (especialmente NO₂) transportados a partir do complexo portuário em ozônio, consolidando-a como a principal área de impacto secundário.

Figura 6. Distribuição das excedências e dos níveis críticos de O₃ por estação de monitoramento para o ano de 2021.

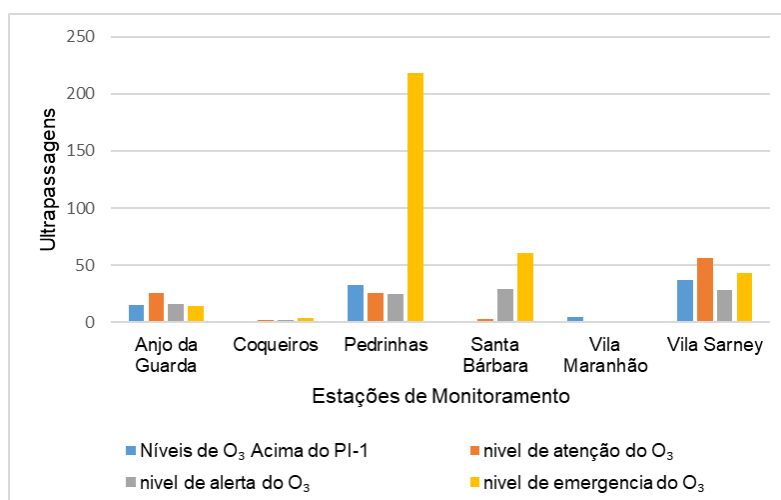
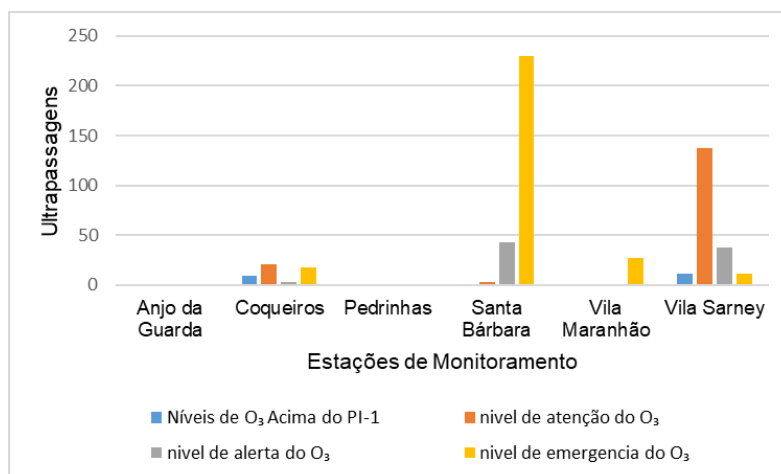


Figura 7. Distribuição das excedências e dos níveis críticos de O₃ por estação de monitoramento para o ano de 2022.



Essa observação é coerente com a natureza química do O₃, um poluente secundário cuja formação não ocorre por emissão direta, mas por reações complexas entre óxidos de nitrogênio NO_x e compostos orgânicos voláteis (COVs) na presença de alta radiação solar. Segundo Seinfeld e Pandis (2016) e a CETESB (2022), tais condições são típicas de regiões tropicais, onde a intensidade luminosa acelera esses processos fotoquímicos. A concentração observada em 2022 sugere que a intensificação das atividades portuárias promoveu uma carga maior de precursores que, ao interagirem sob as condições climáticas locais, resultaram em picos agudos de ozônio em áreas específicas de impacto.

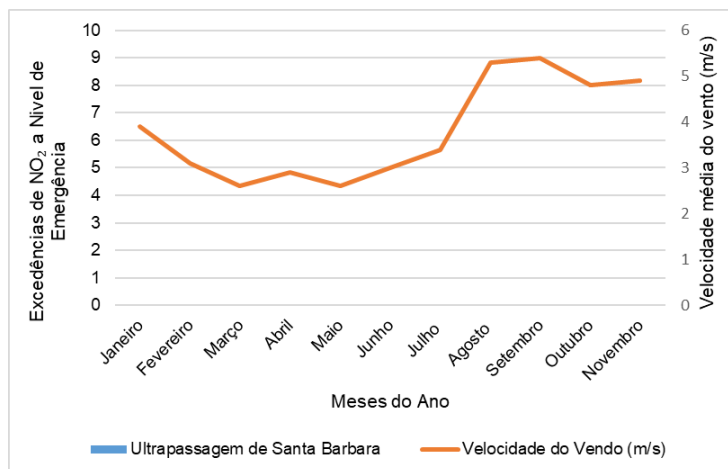
Além disso, os resultados podem ser interpretados à luz das dinâmicas observadas no período pós-pandemia. Conforme discutido por Siciliano et al. (2020), durante as restrições sanitárias, muitas áreas urbanas registraram

aumento de O_3 devido à redução do efeito de "titulação", no qual o monóxido de nitrogênio NO_2 emitido em abundância pelos veículos consome o ozônio local. Com a retomada plena das atividades logísticas e industriais em 2022, o aumento expressivo de emissões de precursores em Santa Bárbara, aliado à manutenção da elevada radiação solar, parece ter sobreposto qualquer efeito de titulação, favorecendo uma produção fotoquímica líquida mais intensa. Portanto, os dados observados guardam total coerência com a literatura científica, confirmando que o deslocamento espacial do O_3 reflete diretamente a localização das fontes de precursores e o tempo necessário para o processamento químico da pluma poluidora.

8.2 Dinâmica dos Poluentes e Influência Meteorológica

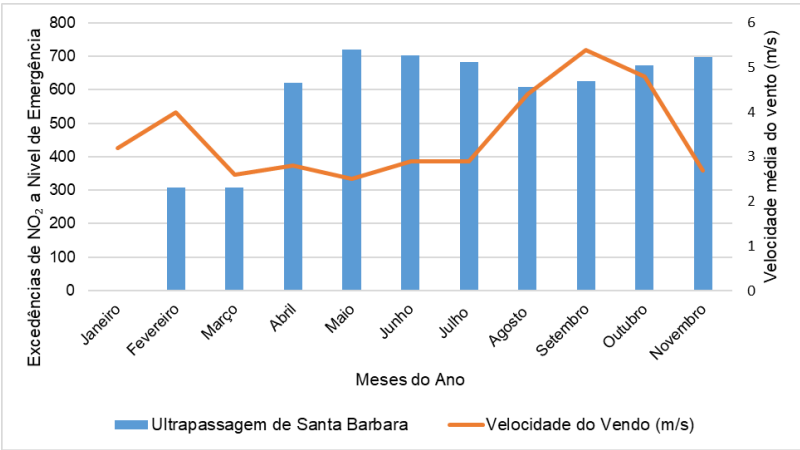
A análise comparativa da qualidade do ar na estação Santa Bárbara revela uma mudança significativa no padrão de concentração de dióxido de nitrogênio NO_2 entre os anos de 2021 e 2022. No primeiro ano do biênio (Figura 8), observou-se a ausência de ultrapassagens dos limites do Padrão Intermediário 1 (PI-1), mesmo diante de oscilações na velocidade média do vento, que variaram entre 2,5 e 5,0 m/s. Essa ausência de excedências corrobora as observações de Sarra (2022), que identificou uma redução significativa nas concentrações de NO_2 e dióxido de enxofre SO_2 em zonas de influência portuária durante o período de restrições da pandemia. Segundo a autora, essa redução foi reflexo direto da menor circulação de veículos de carga e da desaceleração das operações logísticas. No contexto de Santa Bárbara, o baixo nível de pressão emissora em 2021 sugere que a atmosfera ainda refletia o "efeito lockdown", onde a carga poluidora era insuficiente para saturar a capacidade de dispersão local, independentemente da variabilidade meteorológica.

Figura 8. Comportamento sazonal dos episódios de emergência de NO_2 e da velocidade média dos ventos em Santa Bárbara para o ano de 2021.



Em contrapartida, o ano de 2022 (Figura 9), apresentou um comportamento nitidamente distinto, com ultrapassagens expressivas e persistentes do PI-1 ao longo de quase todo o período, especialmente entre abril e novembro. Essa mudança drástica sinaliza o fenômeno de "rebatimento" ou retomada econômica plena. Gillingham e Huang (2021) destacam que a intensificação das atividades portuárias eleva linearmente as emissões de NO_2 , uma vez que os motores de grandes embarcações e o tráfego intenso de caminhões pesados são fontes primárias de óxidos de nitrogênio NO_x . Entre os meses de abril e julho de 2022, o elevado número de excedências coincidiu com velocidades médias do vento mais baixas ($\approx 2,5\text{--}3,0$ m/s), o que confirma a tese de Martins e Andrade (2008), que apontam a velocidade do vento como um dos fatores meteorológicos mais determinantes: em baixas velocidades, ocorre a estagnação da camada limite planetária, impedindo a diluição dos poluentes e favorecendo picos de concentração próximos à fonte.

Figura 9. Comportamento sazonal dos episódios de emergência de NO₂ e da velocidade média dos ventos em Santa Bárbara para o ano de 2022.

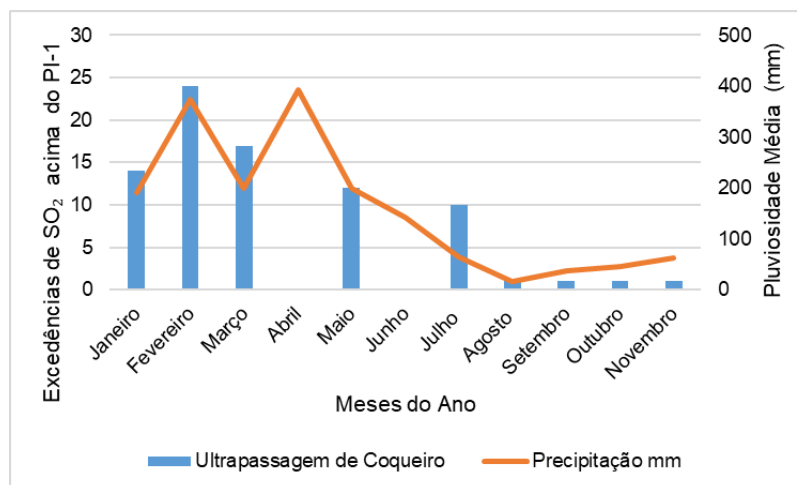


Por outro lado, o comportamento registrado em outubro e novembro de 2022, onde as ultrapassagens ocorreram mesmo com ventos superiores a 5,0 m/s, introduz a complexidade do transporte de plumas de poluição. Conforme discutido por Feitosa (2024) em estudos sobre portos brasileiros, o vento atua de forma ambivalente: enquanto velocidades elevadas geralmente promovem a dispersão, elas também podem atuar como vetores de transporte, carregando poluentes de áreas industriais e portuárias para zonas residenciais adjacentes, dependendo da direção predominante. Esse padrão observado em Santa Bárbara reforça que a direção de leste e sudeste é o fator crítico que conecta as emissões do porto ao receptor (o bairro), sobrepondo-se ao efeito benéfico da velocidade do vento e evidenciando que a dinâmica atmosférica passou a atuar como vetor de transporte de massas de ar poluídas.

Em suma, a comparação direta entre os dois anos demonstra que a degradação da qualidade do ar em Santa Bárbara não decorre exclusivamente da variabilidade climática, mas sim da intensificação das fontes antrópicas. A reincidência de valores acima do PI-1 em 2022 coloca a área em desacordo com as metas progressivas de qualidade do ar estabelecidas pela Resolução CONAMA nº 491/2018. Como enfatizado por Vormittag (2021), a ultrapassagem reiterada desses padrões em áreas urbanas exige não apenas o monitoramento meteorológico, mas políticas rigorosas de controle de emissões móveis e operacionais no setor portuário. Os dados evidenciam, portanto, que a retomada das atividades no pós-pandemia ocorreu sem as mitigações necessárias, transformando a variabilidade meteorológica local em um mero modulador de uma poluição cuja causa raiz é a pressão das atividades logísticas e industriais.

A transição de regime observada na estação coqueiros entre 2021 e 2022 evidencia a complexa interação entre os mecanismos de autodepuração da atmosfera e a magnitude das fontes emissoras. o comportamento registrado em 2021 (Figura 10), onde a redução das ultrapassagens de dióxido de enxofre SO_2 acompanhou a sazonalidade climática, corrobora o conceito de deposição úmida (wet scavenging). conforme explicam Seinfeld e Pandis (2016), o SO_2 é um gás altamente solúvel em água, sendo rapidamente incorporado às gotas de chuva e convertido em ácido sulfúrico H_2SO_4 ou íons sulfato. esse processo de "lavagem" é um dos principais sumidouros naturais de poluentes gasosos, e sua eficácia em 2021 sugere que a pressão emissora ainda era compatível com a capacidade de resiliência do ecossistema local.

Figura 10. Variação mensal das ultrapassagens de SO_2 e da pluviosidade média na estação Coqueiro do ano de 2021.

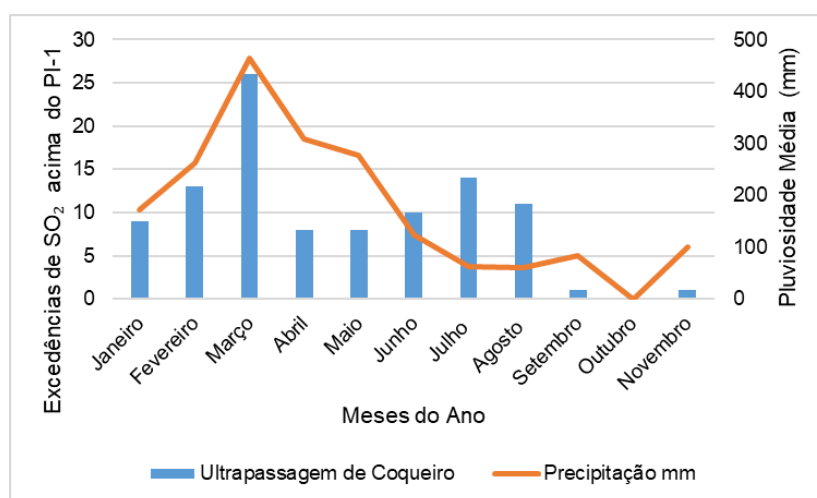


Essa fase de maior equilíbrio em 2021 pode ser atribuída à desaceleração industrial e logística decorrente da crise sanitária global. segundo Sarra (2022), o período de restrições da pandemia de covid-19 gerou um "laboratório natural" que demonstrou como a redução da queima de combustíveis fósseis em zonas portuárias permite que os fenômenos meteorológicos, como a precipitação, mantenham a qualidade do ar dentro de níveis seguros. no contexto de coqueiros, a atmosfera ainda possuía "reserva de qualidade" para que a pluviosidade atuasse como um controle eficiente.

Em contrapartida, os dados de 2022 (Figura 11) revelam que a retomada das operações no complexo portuário do itaquí atingiu um patamar de emissão que superou os benefícios da lavagem atmosférica. a persistência das

ultrapassagens mesmo sob elevados volumes de chuva caracteriza o que Santos (2018) definem como um regime dominado pela fonte. segundo os autores, quando a taxa de emissão de uma área industrial ou portuária é contínua e volumosa, a reposição do poluente na camada limite é mais rápida do que a sua remoção pela chuva, neutralizando o efeito de limpeza e resultando em concentrações crônicas.

Figura 11. Variação mensal das ultrapassagens de SO₂ e da pluviosidade média na estação Coqueiro do ano de 2022.



Essa mudança de patamar em 2022 é frequentemente associada ao uso de combustíveis de baixo custo e alta densidade energética em grandes embarcações e maquinário pesado. Gillingham e Huang (2021) enfatizam que as emissões portuárias de SO₂ são particularmente sensíveis ao volume de carga movimentada e à frequência de manobras de navios, que são fontes intensas de óxidos de enxofre. em coqueiros, a proximidade com as fontes emissoras do porto faz com que a pluma de poluição seja constantemente renovada. como aponta Vormittag (2021), em cenários de poluição crônica, a dependência excessiva de mecanismos naturais de dispersão ou remoção é insuficiente para garantir a saúde pública, exigindo o cumprimento rigoroso dos padrões estabelecidos pela resolução CONAMA nº 491/2018.

A forte correlação observada entre a temperatura e as concentrações de ozônio O₃ na estação Santa Bárbara em 2022, em contraste com o padrão de 2021 (Figuras 13 e 14), reflete a natureza do ozônio como um poluente secundário, cuja formação depende de uma complexa interação entre

precusores químicos e energia solar. De acordo com Seinfeld e Pandis (2016), a temperatura do ar atua como um catalisador cinético: o aumento do calor acelera as taxas de reações químicas na atmosfera e, frequentemente, está associado a condições de alta radiação ultravioleta e baixa nebulosidade, elementos fundamentais para a fotólise do dióxido de nitrogênio NO_2 , que inicia o ciclo de formação do O_3 .

Figura 12. Variação mensal das ultrapassagens de O_3 e da temperatura média em Santa Bárbara no ano de 2021.

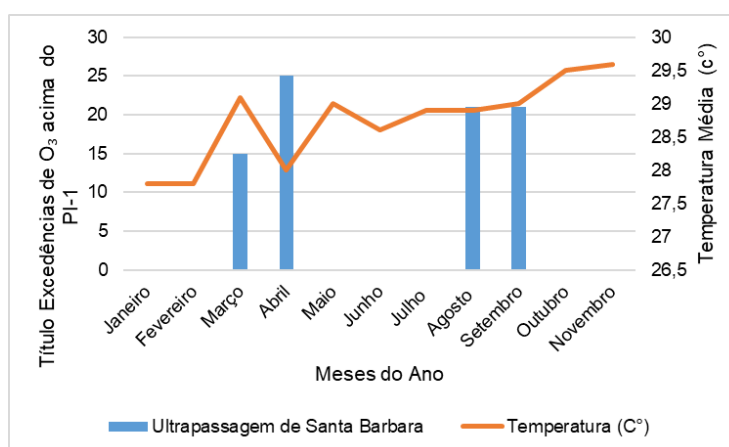
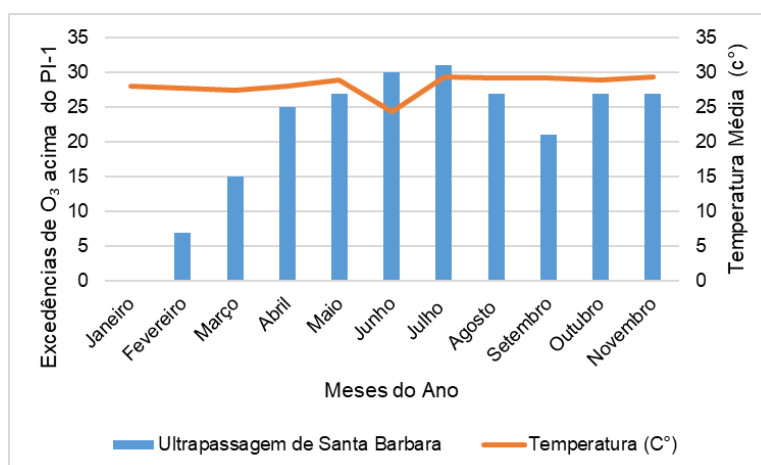


Figura 13. Variação mensal das ultrapassagens de O_3 e da temperatura média em Santa Bárbara no ano de 2022.



O cenário de 2021, caracterizado por temperaturas elevadas (28°C a 30°C), mas com ultrapassagens esporádicas, exemplifica o que a literatura define como um regime limitado por precursores. Martins e Andrade (2008) explicam que, mesmo sob condições meteorológicas ideais, a produção de ozônio não ocorre de forma linear se não houver uma concentração crítica de óxidos de

nitrogênio (NO_x) e compostos orgânicos voláteis (VOCs). No contexto da retomada gradual pós-pandemia, o baixo nível de emissões portuárias e veiculares em 2021 manteve a "janela fotoquímica" aberta, mas sem o "combustível" necessário para gerar excedências persistentes.

A transição para o comportamento observado em 2022 sugere uma alteração na disponibilidade desses precursores no Complexo Portuário do Itaquí. Gillingham e Huang (2021) ressaltam que as atividades portuárias modernas, intensificadas pela logística de combustíveis e minérios, são fontes massivas de NO_x devido à combustão em motores diesel de grande porte (navios e caminhões). Em Santa Bárbara, a estabilidade das altas temperaturas em 2022, combinada com o aumento das emissões antrópicas, permitiu que o sistema atingisse o estado estacionário fotoquímico com maior frequência. Como aponta Alves et al. (2010), em áreas sob influência de fontes móveis pesadas, a temperatura não apenas acelera a formação de O₃, mas também pode intensificar a emissão evaporativa de VOCs de tanques de combustíveis e áreas industriais, alimentando o ciclo poluidor.

A persistência das ultrapassagens em 2022, atingindo o ápice em julho, reforça a preocupação com o cumprimento da Resolução CONAMA nº 491/2018. Como enfatizado por Raposo (2021), o ozônio é um dos poluentes de monitoramento mais desafiadores no Brasil, pois seu controle exige a redução simultânea de diversos precursores em áreas urbanas e industriais. Os dados de Santa Bárbara demonstram que, em 2022, a temperatura deixou de ser apenas uma variável climática para se tornar um fator amplificador de uma poluição cuja causa raiz é a pressão das atividades logísticas. Esse cenário de "poluição fotoquímica persistente" indica que a capacidade de suporte atmosférico da região foi superada pela intensificação das atividades no período pós-pandemia, exigindo estratégias de controle de emissões que considerem o regime térmico local.

9- CONCLUSÃO

A análise integrada da qualidade do ar e das variáveis meteorológicas no entorno do Complexo Portuário do Itaquí entre 2021 e 2022 demonstra, de forma inequívoca, que a degradação atmosférica na região é predominantemente controlada pela intensidade das atividades antrópicas, em

especial as operações portuárias, industriais e logísticas, e não apenas pela variabilidade climática. O período estudado revelou uma clara transição de regime: em 2021, ainda sob influência das restrições da pandemia, a pressão emissora manteve-se relativamente compatível com a capacidade de dispersão e remoção da atmosfera; já em 2022, a retomada plena das atividades elevou as emissões a um patamar que superou os mecanismos naturais de autodepuração.

Os resultados mostram que o material particulado ($MP_{2,5}$, MP_{10}) e o monóxido de carbono (CO) permaneceram dentro dos limites normativos, indicando que a poluição na área do DISAL assume um perfil majoritariamente gasoso. Nesse contexto, o dióxido de nitrogênio (NO_2), o dióxido de enxofre (SO_2) e o ozônio (O_3) configuraram-se como os principais indicadores de risco ambiental e sanitário. O NO_2 apresentou elevadas taxas de ultrapassagem do PI-1, especialmente nas estações Vila Maranhão, Santa Bárbara, Coqueiros e Pedrinhas, evidenciando a forte influência da queima de diesel por caminhões, equipamentos portuários e embarcações. A redistribuição espacial observada em 2022, com forte concentração das excedências em Santa Bárbara, revela um deslocamento do núcleo de impacto para áreas urbanas diretamente influenciadas pelas plumas do complexo portuário.

O SO_2 , embora com menor frequência de ultrapassagens, apresentou episódios críticos de Alerta e Emergência, sobretudo em Santa Bárbara, Pedrinhas e Coqueiros, caracterizando eventos de poluição aguda associados à queima de combustíveis fósseis de alto teor de enxofre em navios, maquinário e operações industriais. A persistência desses episódios em 2022, mesmo sob condições de elevada precipitação, confirma a transição para um regime dominado pela fonte emissora, no qual a reposição contínua do poluente neutraliza os efeitos de lavagem atmosférica.

O comportamento do O_3 reforça ainda mais a complexidade do sistema atmosférico local. A concentração de episódios de Emergência em Santa Bárbara em 2022 indica que a região atua como uma zona receptora de poluentes secundários, onde os precursores emitidos pelo porto (NO_x e COVs) são transformados fotoquimicamente em ozônio sob altas temperaturas e intensa radiação solar. Assim, a meteorologia não apenas modulou as

concentrações, mas amplificou os efeitos das emissões antrópicas, consolidando um cenário de poluição fotoquímica persistente.

Em síntese, os dados demonstram que a retomada econômica pós-pandemia ocorreu sem a implementação proporcional de medidas de controle ambiental, levando o sistema atmosférico do entorno do Porto do Itaqui a ultrapassar sua capacidade de suporte. A reincidência de violações aos padrões da Resolução CONAMA nº 491/2018, especialmente em 2022, evidencia um quadro de risco crônico à saúde da população residente nas áreas adjacentes, como Santa Bárbara, Vila Sarney, Coqueiros e Pedrinhas. Dessa forma, os resultados reforçam a necessidade urgente de políticas públicas integradas, que envolvam o controle rigoroso das emissões portuárias e veiculares, a modernização dos combustíveis e equipamentos utilizados, e o fortalecimento do monitoramento ambiental, sob pena de a região consolidar-se como um dos principais hotspots de poluição atmosférica urbana-industrial do Maranhão.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA EUROPEIA DO AMBIENTE (EEA). *Air quality around ports and airports*. Copenhagen: European Environment Agency, 2025.
- ALVES, L. S.; SANTOS, L. L.; COUTO, E. R. Distribuição das concentrações de ozônio (O₃) na área de influência de polo industrial. *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, 2020.
- BAUER, M. et al. Global burden and strength of evidence for 88 risk factors in 204 countries and 811 subnational locations, 1990–2021: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2021. *The Lancet*, v. 403, n. 10440, p. 2162–2203, 2024.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). *Resolução nº 491, de 19 de novembro de 2018*. Dispõe sobre os padrões de qualidade do ar. Brasília, DF, 2018.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. *Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima: volume 2 – estratégias setoriais e temáticas*. Brasília: MMA, 2016.
- COLOGNA, F. S. et al. A qualidade do ar e materiais particulados nos Portos do Itaqui e Ponta da Madeira – São Luís (MA). *Revista de Ciência e Tecnologia*, v. 21, n. 41, p. 103–116, 2017. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/331126625>. Acesso em: 23 nov. 2025.
- CONCAWE. *The impact of shipping emissions on urban air quality in Europe — a port/city analysis*. Concawe Review, v. 32, n. 2, 2024.
- DANTAS, G. et al. The impact of COVID-19 partial lockdown on the air quality of the city of Rio de Janeiro, Brazil. *Science of the Total Environment*, v. 729, p. 139085, 2020.

- FEITOSA, V. K. *Poluição atmosférica relacionada às atividades portuárias: potenciais impactos nas áreas naturais protegidas da Mata Atlântica Paranaense*. 2024. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2024. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/xmlui/handle/1884/89648>. Acesso em: 10 jan. 2026.
- GILLINGHAM, K.; HUANG, P. Racial disparities in the health effects from air pollution: evidence from ports. *NBER Working Paper*, n. 29108, 2021.
- GOVERNO DO MARANHÃO. *Modernização, descarbonização e eficiência logística do Porto do Itaqui são destaques na Intermodal South America 2025*. São Luís, 2025.
- HEALTH EFFECTS INSTITUTE (HEI). *State of global air 2020: a special report on global exposure to air pollution and its disease burden*. Boston: HEI, 2020.
- INCA – Instituto Nacional de Câncer José Alencar Gomes da Silva. *Poluição do ar, câncer e outras doenças: o que você precisa saber?* Rio de Janeiro: INCA, 2022.
- LE QUÉRÉ, C. et al. Temporary reduction in daily global CO₂ emissions during the COVID-19 pandemic. *Nature Climate Change*, v. 10, p. 647–653, 2020.
- MARTINS, L. D.; ANDRADE, M. F. Ozone formation potentials of volatile organic compounds and ozone sensitivity to their emission in the megacity of São Paulo, Brazil. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2008.
- OMS – ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. *Diretrizes globais de qualidade do ar*. Washington, D.C.: OPAS, 2021.
- PINHEIRO, C. F.; VENTURI, A. C. T.; GALVANI, E. Poluição atmosférica: estudo de caso do Município de São Luís do Maranhão. *Sociedade e Natureza*, v. 32, p. 808–819, 2020.

RAPOSO, A.; ASSIS, W. L.; NORTON, S. R. Revisão bibliográfica dos efeitos da poluição do ar sobre a saúde humana e uma breve análise crítica da atual legislação brasileira (CONAMA 491/2018). *Cadernos do Leste*, 2021.

SANTOS, T. C. dos. Investigação da relação entre variáveis atmosféricas e a concentração de MP10 e O₃ no estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br>. Acesso em: 12 jan. 2026.

SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. 2. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006.

SILVA, C. M. S. D.; FERREIRA, F. G. Estimativa da concentração média diária de material particulado fino na região do Complexo Industrial e Portuário do Pecém, Ceará, Brasil. *Cadernos de Saúde Pública*, v. 35, n. 10, 2019.

SKIPPER, T. N. et al. Local scale air quality impacts in the Los Angeles Basin from increased port activity during 2021 supply chain disruptions. *Environmental Science: Atmospheres*, 2024. DOI: 10.1039/D3EA00166K.

TANG, L. et al. The impact of ship emissions on air quality and human health in the Gothenburg area – Part 1. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 20, p. 7509–7530, 2020.

WHO – WORLD HEALTH ORGANIZATION. *WHO global air quality guidelines*. Geneva: WHO, 2021.

688 ANEXO (Normas da revista escolhida)

07/01/2026, 14:06

Guide for authors - Atmospheric Environment - ISSN 1352-2310 | ScienceDirect.com by Elsevier

Atmospheric Environment

Supports open access • Open archive

Guide for authors

About the journal

- Aims and scope
- Article types
- Peer review
- Open access

Ethics and policies

- Ethics in publishing
- Submission declaration
- Authorship
- Changes to authorship
- Declaration of competing interests
- Funding sources
- Declaration of generative AI use
- Preprints
- Use of inclusive language
- Reporting sex- and gender-based analyses
- Jurisdictional claims

Writing and formatting

- File format
- Title page
- Abstract
- Keywords
- Highlights
- Graphical abstract
- Units, classifications codes and nomenclature
- Math formulae
- Tables
- Figures, images and artwork
- Generative AI and Figures, images and artwork
- Supplementary material
- Video
- Research data
- Data statement
- Data linking
- Research Elements
- Co-submission of related data, methods or protocols
- Article structure
- References

Submitting your manuscript

- Submission checklist
- Submit online

After receiving a final decision

- Article Transfer Service
- Publishing agreement
- License options
- Open access
- Permission for copyrighted works
- Proof correction
- Share Link
- Responsible sharing

Resources for authors

- Elsevier Researcher Academy
- Language and editing services

Getting help and support

<https://www.sciencedirect.com/journal/atmospheric-environment/publish/guide-for-authors>

1/17

Atmospheric Environment

About the journal

Aims and scope

Atmospheric composition and its impacts

Atmospheric Environment has an open access journal, *Atmospheric Environment: X*, which covers emissions science and reductions strategies: If you have a paper related to those themes, [please submit your paper here](#). Alternatively, if your paper is related to the scope of *Atmospheric Environment* (see below) please submit your paper using the link on the left of this page - "submit your paper".

Atmospheric Environment is the international journal for scientists in different disciplines related to atmospheric composition and its impacts. The journal publishes scientific articles with atmospheric relevance of emissions and depositions of gaseous and particulate compounds, chemical processes and physical effects in the atmosphere, as well as impacts of the changing atmospheric composition on human health, air quality, climate change, and ecosystems.

The overarching aim of *Atmospheric Environment* is to publish original research, reviews, and perspectives that advance the international scientific community's understanding of the composition of the atmosphere. *Atmospheric Environment* has adopted a broad perspective of the atmosphere to include the background locations in the troposphere and stratosphere, continental and urban locations, as well as indoor environments and microenvironments that expose humans to atmospheric components.

The scope of the journal includes natural and anthropogenic sources, transformations, and transport of atmospheric components, as well as the impacts of atmospheric components on global and regional climate, sensitive ecosystems, visibility, and human health. *Atmospheric Environment* specifically focuses on policy-relevant science that will influence regulations, management and protection of atmospheric resources, protection of ecosystems and human health, and will drive future scientific research efforts that investigate the atmosphere. Additional information about the evolving and expanding scope of *Atmospheric Environment* is presented below.

The editors of *Atmospheric Environment* will manage the journal to best advance its goals, whilst serving the atmospheric science community through delivery of the most recent high-quality research.

Atmospheric Environment encourages submissions describing novel experimental and modeling studies that advance understanding of the composition of the atmosphere and that elucidate sources, transport and transformations, and impacts from atmospheric components.

To be considered for publication in *Atmospheric Environment*, manuscripts should clearly show that the research directly advances the understanding of the composition of the atmosphere.

The following manuscripts will NOT be considered for publication:

1. studies of new experimental methods that are neither applied or do not advance the understanding of the composition of the atmosphere,
2. studies that examine emissions from novel atmospheric sources but do not demonstrate how these emissions impact the composition of the atmosphere,
3. studies that examine atmospheric transport but do not directly show how the investigated transport process impact the composition of the atmosphere,
4. computational studies that do not demonstrate the atmospheric relevancy of the computed chemical pathways or intermediate products, and
5. studies that focus on well-established or routine monitoring and modeling methods to investigate air pollution issues of local interest.

As research tools continue to advance and broaden the understanding of the impacts of atmospheric components, *Atmospheric Environment* is currently encouraging additional manuscript submissions in these developing areas:

1. indoor air quality,
2. satellites and remote sensing,
3. human health,
4. the use of real-time or semi-continuous experimental observations of the composition of the atmosphere, and
5. the use of data science to understand sources, transformation, transport, and the impacts of atmospheric components. Please note that studies that utilize novel data science tools that focus on forecasting and do not provide insight into atmospheric sources, processes, and impacts are not suitable for publication in *Atmospheric Environment*.

Atmospheric Environment

This journal welcomes contributions that support and advance the UN's sustainable development goals, in particular SDG 7 (Affordable and clean energy) and SDG 13 (Climate Action)

Article types

The Journal publishes Original Research Papers, as well as Review Papers. Special Issues on topical themes are published regularly. Please see our Journal Home Page for details of Special Issue Calls for Papers.

Editor-invited submissions:

To add to the Original Research submitted, the Editors will also consider Invited Submissions. These are articles written by experts to assess, curate and add to the vast amount of research undertaken globally in this field. Editor-invited submissions may also include innovation insights (shorter communications on innovative scientific ideas for demand creation and/or field-based demand) and science status (i.e. overviews of the status of research in this field globally, regionally and nationally as smaller opinion pieces).

If you have an idea for an Editor-invited submission, please contact the Editor-in Chief in the first instance." Please note that the Journal no longer publishes "New Directions" pieces. Please consider proposing an Editor-invited submissions instead

Peer review

This journal follows a single anonymized review process. Your submission will initially be assessed by our editors to determine suitability for publication in this journal. If your submission is deemed suitable, it will typically be sent to a minimum of two reviewers for an independent expert assessment of the scientific quality. The decision as to whether your article is accepted or rejected will be taken by our editors.

Read more about [peer review](#).

Our editors are not involved in making decisions about papers which:

- they have written themselves.
- have been written by family members or colleagues.
- relate to products or services in which they have an interest.

Any such submissions will be subject to the journal's usual procedures and peer review will be handled independently of the editor involved and their research group. Read more about [editor duties](#).

Authors may submit a formal appeal request to the editorial decision, provided it meets all the requirements and follows the procedure outlined in [Elsevier's Appeal Policy](#). Only one appeal per submission will be considered and the appeal decision will be final.

Special issues and article collections

The peer review process for special issues and article collections follows the same process as outlined above for regular submissions, except, a guest editor may send the submissions out to the reviewers and may recommend a decision to the journal editor. The journal editor oversees the peer review process of all special issues and article collections to ensure the high standards of publishing ethics and responsiveness are respected and is responsible for the final decision regarding acceptance or rejection of articles.

Open access

We refer you to our [open access information page](#) to learn about open access options for this journal.

Ethics and policies

Ethics in publishing

Authors must follow ethical guidelines stated in [Elsevier's Publishing Ethics Policy](#).

Submission declaration

When authors submit an article to an Elsevier journal it is implied that:

- the work described has not been published previously except in the form of a preprint, an abstract, a published lecture, academic thesis or registered report. See our policy on [multiple, redundant or concurrent publication](#).
- the article is not under consideration for publication elsewhere.
- the article's publication is approved by all authors and tacitly or explicitly by the responsible authorities where the work was carried out.

Atmospheric Environment

Authorship

All authors should have made substantial contributions to all of the following:

1. The conception and design of the study, or acquisition of data, or analysis and interpretation of data.
2. Drafting the article or revising it critically for important intellectual content.
3. Final approval of the version to be submitted.

Authors should appoint a corresponding author to communicate with the journal during the editorial process. All authors should agree to be accountable for all aspects of the work to ensure that the questions related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

Changes to authorship

The editors of this journal generally will not consider changes to authorship once a manuscript has been submitted. It is important that authors carefully consider the authorship list and order of authors and provide a definitive author list at original submission.

The policy of this journal around authorship changes:

- All authors must be listed in the manuscript and their details entered into the submission system.
- Any addition, deletion or rearrangement of author names in the authorship list should only be made prior to acceptance, and only if approved by the journal editor.
- Requests to change authorship should be made by the corresponding author, who must provide the reason for the request to the journal editor with written confirmation from all authors, including any authors being added or removed, that they agree with the addition, removal or rearrangement.
- All requests to change authorship must be submitted using [this form](#). Requests which do not comply with the instructions outlined in the form will not be considered.
- Only in exceptional circumstances will the journal editor consider the addition, deletion or rearrangement of authors post acceptance.
- Publication of the manuscript may be paused while a change in authorship request is being considered.
- Any authorship change requests approved by the journal editor will result in a corrigendum if the manuscript has already been published.
- Any unauthorized authorship changes may result in the rejection of the article, or retraction, if the article has already been published.

Declaration of competing interests

All authors must disclose any financial and personal relationships with other people or organizations that could inappropriately influence or bias their work. Examples of potential competing interests include:

- Employment
- Consultancies
- Stock ownership
- Honoraria
- Paid expert testimony
- Patent applications or registrations
- Grants or any other funding
- Affiliation with the journal as an Editor or Advisory Board Member

The [declarations tool](#) should always be completed.

Atmospheric Environment

regarding its peer-review. Full responsibility for the editorial process for this article was delegated to another journal editor.

Authors with no competing interests to declare should select the option "I have nothing to declare".

The resulting Word document containing your declaration should be uploaded at the "attach/upload files" step in the submission process. It is important that the Word document is saved in the .doc/.docx file format. Author signatures are not required.

Funding sources

Authors must disclose any funding sources who provided financial support for the conduct of the research and/or preparation of the article. The role of sponsors, if any, should be declared in relation to the study design, collection, analysis and interpretation of data, writing of the report and decision to submit the article for publication. If funding sources had no such involvement this should be stated in your submission.

List funding sources in this standard way to facilitate compliance to funder's requirements:

Funding: This work was supported by the National Institutes of Health [grant numbers xxxx, yyyy]; the Bill & Melinda Gates Foundation, Seattle, WA [grant number zzzz]; and the United States Institutes of Peace [grant number aaaa].

It is not necessary to include detailed descriptions on the program or type of grants, scholarships and awards. When funding is from a block grant or other resources available to a university, college, or other research institution, submit the name of the institute or organization that provided the funding.

If no funding has been provided for the research, it is recommended to include the following sentence:

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Declaration of generative AI use

Authors must declare the use of generative AI in the manuscript preparation process upon submission of the paper.

Elsevier recognizes the potential of generative AI and AI-assisted technologies ("AI Tools"), when used responsibly, to help researchers work efficiently, gain critical insights fast and achieve better outcomes. Increasingly, these tools, including AI agents and deep research tools, are helping researchers to synthesize complex literature, provide an overview of a field or research question, identify research gaps, generate ideas, and provide tailored support for tasks such as content organization and improving language and readability.

Authors preparing a manuscript for an Elsevier journal can use AI Tools to support them. However, these tools must never be used as a substitute for human critical thinking, expertise and evaluation. AI technology should always be applied with human oversight and control.

Ultimately, authors are responsible and accountable for the contents of their work. This includes accountability for:

- Carefully reviewing and verifying the accuracy, comprehensiveness, and impartiality of all AI-generated output (including checking the sources, as AI-generated references can be incorrect or fabricated).
- Editing and adapting all material thoroughly to ensure the manuscript represents the author's authentic and original contribution and reflects their own analysis, interpretation, insights and ideas.
- Ensuring the use of any tools or sources, AI-based or otherwise, is made clear and transparent to readers. If AI Tools have been used, we require a disclosure statement upon submission; please see example below.
- Ensuring the manuscript is developed in a way that safeguards data privacy, intellectual property and other rights, by checking the terms and conditions of any AI tool that is used.

Finally, authors must not list or cite AI Tools as an author or co-author on the manuscript since authorship implies responsibilities and tasks that can only be attributed to, and performed by, humans.

The use of AI Tools in the manuscript preparation process must be declared by adding a statement at the end of the manuscript when the paper is first submitted. The statement will appear in the published work and should be placed in a new section before the references list.

An example:

- Title of new section: *Declaration of generative AI and AI-assisted technologies in the manuscript preparation process.*
- Statement: *During the preparation of this work the author(s) used [NAME OF TOOL / SERVICE] in order to [REASON]. After using this tool/service, the author(s) reviewed and edited the content as needed and take(s) full responsibility for the content of the published article.*

Atmospheric Environment

Please read Elsevier's author policy on the use of generative AI and AI-assisted technologies, which can be found in our [generative AI policies for journals](#).

Please note: to protect authors' rights and the confidentiality of their research, this journal does not currently allow the use of generative AI or AI-assisted technologies such as ChatGPT or similar services by reviewers or editors in the peer review and manuscript evaluation process, as is stated in our [generative AI policies for journals](#). We are actively evaluating compliant AI Tools and may revise this policy in the future.

Preprints

Preprint sharing

Authors may share preprints in line with Elsevier's [article sharing policy](#). Sharing preprints, such as on a preprint server, will not count as prior publication.

We advise you to read our policy on [multiple, redundant or concurrent publication](#).

Use of inclusive language

Inclusive language acknowledges diversity, conveys respect to all people, is sensitive to differences, and promotes equal opportunities. Authors should ensure their work uses inclusive language throughout and contains nothing which might imply one individual is superior to another on the grounds of:

- age
- gender
- race
- ethnicity
- culture
- sexual orientation
- disability or health condition

We recommend avoiding the use of descriptors about personal attributes unless they are relevant and valid. Write for gender neutrality with the use of plural nouns ("clinicians, patients/clients") as default. Wherever possible, avoid using "he, she," or "he/she."

No assumptions should be made about the beliefs of readers and writing should be free from bias, stereotypes, slang, reference to dominant culture and/or cultural assumptions.

These guidelines are meant as a point of reference to help you identify appropriate language but are by no means exhaustive or definitive.

Reporting sex- and gender-based analyses

There is no single, universally agreed-upon set of guidelines for defining sex and gender. We offer the following guidance:

- Sex and gender-based analyses (SGBA) should be integrated into research design when research involves or pertains to humans, animals or eukaryotic cells. This should be done in accordance with any requirements set by funders or sponsors and best practices within a field.
- Sex and/or gender dimensions of the research should be addressed within the article or declared as a limitation to the generalizability of the research.
- Definitions of sex and/or gender applied should be explicitly stated to enhance the precision, rigor and reproducibility of the research and to avoid ambiguity or conflation of terms and the constructs to which they refer.

We advise you to read the [Sex and Gender Equity in Research \(SAGER\) guidelines](#) and the [SAGER checklist \(PDF\)](#) on the EASE website, which offer systematic approaches to the use of sex and gender information in study design, data analysis, outcome reporting and research interpretation.

For further information we suggest reading the rationale behind and recommended [use of the SAGER guidelines](#).

Definitions of sex and/or gender

We ask authors to define how sex and gender have been used in their research and publication. Some guidance:

Atmospheric Environment

differences of sex development (DSD).

- Gender generally refers to socially constructed roles, behaviors and identities of women, men and gender-diverse people that occur in a historical and cultural context and may vary across societies and over time. Gender influences how people view themselves and each other, how they behave and interact and how power is distributed in society.

Depending on the focus of a paper, sex and/or gender may or may not be relevant to the content of the paper. We recognize that beliefs, attitudes, and laws relating to sex and gender may vary. These articles do not attempt to dictate author beliefs but rather require that, where relevant to an author's research or paper, the author must provide clear explanations of how the paper and research define and use sex and gender.

Jurisdictional claims

Elsevier respects the decisions taken by its authors as to how they choose to designate territories and identify their affiliations in their published content. Elsevier's policy is to take a neutral position with respect to territorial disputes or jurisdictional claims, including, but not limited to, maps and institutional affiliations. For journals that Elsevier publishes on behalf of a third party owner, the owner may set its own policy on these issues.

- Maps: Readers should be able to locate any study areas shown within maps using common mapping platforms. Maps should only show the area actually studied and authors should not include a location map which displays a larger area than the bounding box of the study area. Authors should add a note clearly stating that "*map lines delineate study areas and do not necessarily depict accepted national boundaries*". During the review process, Elsevier's editors may request authors to change maps if these guidelines are not followed.
- Institutional affiliations: Authors should use either the full, standard title of their institution or the standard abbreviation of the institutional name so that the institutional name can be independently verified for research integrity purposes.

Writing and formatting

File format

We ask you to provide editable source files for your entire submission (including figures, tables and text graphics). Some guidelines:

- Save files in an editable format, using the extension .doc/.docx for Word files and .tex for LaTeX files. A PDF is not an acceptable source file.
- Format Word files in a single-column layout. Double-column formatting is only permitted for LaTeX submissions.
- Remove any strikethrough and underlined text from your manuscript, unless it has scientific significance related to your article.
- Use spell-check and grammar-check functions to avoid errors.

We advise you to read our [Step-by-step guide to publishing with Elsevier](#).

Title page

You are required to include the following details in the title page information:

- Article title. Article titles should be concise and informative. Please avoid abbreviations and formulae, where possible, unless they are established and widely understood, e.g. DNA.
- Author names. Provide the given name(s) and family name(s) of each author. The order of authors should match the order in the submission system. Carefully check that all names are accurately spelled. If needed, you can add your name between parentheses in your own script after the English transliteration.
- Affiliations. Add affiliation addresses, referring to where the work was carried out, below the author names. Indicate affiliations using a lower-case superscript letter immediately after the author's name and in front of the corresponding address. Ensure that you provide the full postal address of each affiliation, including the country name and, if available, the email address of each author.
- Corresponding author. Clearly indicate who will handle correspondence for your article at all stages of the refereeing and publication process and also post-publication. This responsibility includes answering any future queries about your results, data, methodology and materials. It is important that the email address and contact details of your corresponding author are kept up to date during the submission and publication process.
- Present/permanent address. If an author has moved since the work described in your article was carried out, or the author was visiting during that time, a "present address" (or "permanent address") can be indicated by a footnote to the author's name. The address where the author carried out the work must be retained as their main affiliation address. Use superscript Arabic numerals for such footnotes.

Abstract

Atmospheric Environment

• Abstracts must be able to stand alone as abstracts are often presented separately from the article.

- Avoid references. If any are essential to include, ensure that you cite the author(s) and year(s).
- Avoid non-standard or uncommon abbreviations. If any are essential to include, ensure they are defined within your abstract at first mention.

Keywords

You are required to provide 1 to 7 keywords for indexing purposes. Keywords should be written in English. Please try to avoid keywords consisting of multiple words (using "and" or "of").

We recommend that you only use abbreviations in keywords if they are firmly established in the field.

Highlights

You are required to provide article highlights at submission.

Highlights are a short collection of bullet points that should capture the novel results of your research as well as any new methods used during your study. Highlights will help increase the discoverability of your article via search engines. Some guidelines:

- Submit highlights as a separate editable file in the online submission system with the word "highlights" included in the file name.
- Highlights should consist of 3 to 5 bullet points, each a maximum of 85 characters, including spaces.

We encourage you to view example [article highlights](#) and read about the benefits of their inclusion.

Graphical abstract

You are encouraged to provide a graphical abstract at submission.

The graphical abstract should summarize the contents of your article in a concise, pictorial, professional form which is designed to appeal to an interdisciplinary audience. A graphical abstract will help draw more attention to your online article and support readers in digesting your research. Some guidelines:

- You need to ensure that you have obtained the necessary permission to include any third party owned material in a graphical abstract.
- The use of generative AI or AI-assisted tools in the production of graphical abstracts must align with [our generative AI policies for journals](#).
- Submit your graphical abstract as a separate file in the online submission system.
- Ensure the image is a minimum of 531 x 1328 pixels (h x w) or proportionally more and is readable at a size of 5 x 13 cm using a regular screen resolution of 96 dpi.
- Our preferred file types for graphical abstracts are TIFF, EPS, PDF or MS Office files.

We encourage you to view example [graphical abstracts](#) and read about the benefits of including them.

Units, classifications codes and nomenclature

This journal requires you to use the international system of units (SI) which follows internationally accepted rules and conventions. If other units are mentioned within your article, you should provide the equivalent unit in SI.

Math formulae

- Submit math equations as editable text, not as images.
- Present simple formulae in line with normal text, where possible.
- Use the solidus (/) instead of a horizontal line for small fractional terms such as X/Y.
- Present variables in italics.
- Denote powers of e by exp.
- Display equations separately from your text, numbering them consecutively in the order they are referred to within your text.

Atmospheric Environment

-
- Place tables next to the relevant text or on a separate page(s) at the end of your article.

- Cite all tables in the manuscript text.
- Number tables consecutively according to their appearance in the text.
- Please provide captions along with the tables.
- Place any table notes below the table body.
- Avoid vertical rules and shading within table cells.

We recommend that you use tables sparingly, ensuring that any data presented in tables is not duplicating results described elsewhere in the article.

Figures, images and artwork

Figures, images, artwork, diagrams and other graphical media must be supplied as separate files along with the manuscript. We recommend that you read our detailed [artwork and media instructions](#). Some excerpts:

When submitting artwork:

- Cite all images in the manuscript text.
- Number images according to the sequence they appear within your article.
- Submit each image as a separate file using a logical naming convention for your files (for example, Figure_1, Figure_2 etc).
- Please provide captions for all figures, images, and artwork.
- Text graphics may be embedded in the text at the appropriate position. If you are working with LaTeX, text graphics may also be embedded in the file.

Artwork formats

When your artwork is finalized, "save as" or convert your electronic artwork to the formats listed below taking into account the given resolution requirements for line drawings, halftones, and line/halftone combinations:

- Vector drawings: Save as EPS or PDF files embedding the font or saving the text as "graphics."
- Color or grayscale photographs (halftones): Save as TIFF, JPG or PNG files using a minimum of 300 dpi (for single column: min. 1063 pixels, full page width: 2244 pixels).
- Bitmapped line drawings: Save as TIFF, JPG or PNG files using a minimum of 1000 dpi (for single column: min. 3543 pixels, full page width: 7480 pixels).
- Combinations bitmapped line/halftones (color or grayscale): Save as TIFF, JPG or PNG files using a minimum of 500 dpi (for single column: min. 1772 pixels, full page width: 3740 pixels).

Please do not submit:

- files that are too low in resolution (for example, files optimized for screen use such as GIF, BMP, PICT or WPG files).
- disproportionately large images compared to font size, as text may become unreadable.

Figure captions

All images must have a caption. A caption should consist of a brief title (not displayed on the figure itself) and a description of the image. We advise you to keep the amount of text in any image to a minimum, though any symbols and abbreviations used should be explained.

Provide captions in a separate file.

Color artwork

If you submit usable color figures with your accepted article, we will ensure that they appear in color online.

Please ensure that color images are accessible to all, including those with impaired color vision. Learn more about [color and web accessibility](#).

Atmospheric Environment

- We do not permit the use of Generative AI or AI-assisted tools to create or alter images in submitted manuscripts.
- The only exception is if the use of AI or AI-assisted tools is part of the research design or methods (for example, in the field of biomedical imaging). If this is the case, such use must be described in a reproducible manner in the methods section, including the name of the model or tool, version and extension numbers, and manufacturer.
- The use of generative AI or AI-assisted tools in the production of artwork such as for graphical abstracts is not permitted. The use of generative AI in the production of cover art may in some cases be allowed, if the author obtains prior permission from the journal editor and publisher, can demonstrate that all necessary rights have been cleared for the use of the relevant material, and ensures that there is correct content attribution.

Supplementary material

We encourage the use of supplementary materials such as applications, images and sound clips to enhance research. Some guidelines:

- Supplementary material should be accurate and relevant to the research.
- Cite all supplementary files in the manuscript text.
- Submit supplementary materials at the same time as your article. Be aware that all supplementary materials provided will appear online in the exact same file type as received. These files will not be formatted or typeset by the production team.
- Include a concise, descriptive caption for each supplementary file describing its content.
- Provide updated files if at any stage of the publication process you wish to make changes to submitted supplementary materials.
- Do not make annotations or corrections to a previous version of a supplementary file.
- Switch off the option to track changes in Microsoft Office files. If tracked changes are left on, they will appear in your published version.

Video

This journal accepts video material and animation sequences to support and enhance your scientific research. We encourage you to include links to video or animation files within articles. Some guidelines:

- When including video or animation file links within your article, refer to the video or animation content by adding a note in your text where the file should be placed.
- Clearly label files ensuring the given file name is directly related to the file content.
- Provide files in one of our [recommended file formats](#). Files should be within our preferred maximum file size of 150 MB per file, 1 GB in total.
- Provide "stills" for each of your files. These will be used as standard icons to personalize the link to your video data. You can choose any frame from your video or animation or make a separate image.
- Provide descriptive text in your manuscript to refer to the video content. This text helps ensure accessibility for visually impaired readers who rely on descriptive information. For journals publishing in print this is also essential, as video and animation files cannot be embedded in the print version.

We publish all video and animation files supplied in the electronic version of your article.

For more detailed instructions, we recommend that you read our guidelines on [submitting video content to be included in the body of an article](#).

Research data

We are committed to supporting the storage of, access to and discovery of research data, and our [research data policy](#) sets out the principles guiding how we work with the research community to support a more efficient and transparent research process.

Research data refers to the results of observations or experimentation that validate research findings, which may also include software, code, models, algorithms, protocols, methods and other useful materials related to the project.

Please read our guidelines on [sharing research data](#) for more information on depositing, sharing and using research data and other relevant research materials.

Research data deposit, citation and linking

Atmospheric Environment

- Cite and link to this dataset in your article.
- If this is not possible, make a statement explaining why research data cannot be shared.

Data statement

To foster transparency, you are required to state the availability of any data at submission.

Ensuring data is available may be a requirement of your funding body or institution. If your data is unavailable to access or unsuitable to post, you can state the reason why (e.g., your research data includes sensitive or confidential information such as patient data) during the submission process. This statement will appear with your published article on ScienceDirect.

Read more about the importance and benefits of providing a [data statement](#).

Data linking

Linking to the data underlying your work increases your exposure and may lead to new collaborations. It also provides readers with a better understanding of the described research.

If your research data has been made available in a data repository there are a number of ways your article can be linked directly to the dataset:

- Provide a link to your dataset when prompted during the online submission process.
- For some data repositories, a repository banner will automatically appear next to your published article on ScienceDirect.
- You can also link relevant data or entities within the text of your article through the use of identifiers. Use the following format: Database: 12345 (e.g. TAIR: AT1G01020; CCDC: 734053; PDB: 1XFN).

Learn more about [linking research data and research articles in ScienceDirect](#).

Research Elements

This journal enables the publication of research objects (e.g. data, methods, protocols, software and hardware) related to original research in [Elsevier's Research Elements journals](#).

Research Elements are peer-reviewed, open access journals which make research objects findable, accessible and reusable. By providing detailed descriptions of objects and their application with links to the original research article, your research objects can be placed into context within your article.

You will be alerted during submission to the opportunity to submit a manuscript to one of the Research Elements journals. Your Research Elements article can be prepared by you, or by one of your collaborators.

Co-submission of related data, methods or protocols

You are encouraged to publish a description of your research data, methods, or protocols related to your regular article as a co-submission article in [Data in Brief](#) or [MethodsX](#).

This co-submission can be submitted at the same time as your regular manuscript submission to this journal. If both your regular and co-submitted manuscripts are accepted for publication, they will be linked together on ScienceDirect, thereby promoting research reproducibility, interoperability, and open science.

- Prepare a separate manuscript describing your research data, methods, or protocols using the **mandatory templates** from [Data in Brief](#) or in [MethodsX](#).
- Submit this co-submission alongside your regular manuscript as a separate submission item; on the '**Attach files**' page in Editorial Manager, after which it will be automatically forwarded to the *Data in Brief* or *MethodsX* and assigned an editor.
- For associated Article Processing Charge (APC) details, please visit:
 - [MethodsX](#)
 - [Data in Brief](#)

Please note: Due to the automated process of submitting to *Data in Brief* or *MethodsX*, only after acceptance will you be presented with a personalized OA Article Publishing Charge based on your individual context (your country, institutional affiliation, and any society membership for example).

Atmospheric Environment

- Divide your article into clearly defined and numbered sections. Number subsections 1.1 (then 1.1.1, 1.1.2, ...), then 1.2, etc.
- Use the numbering format when cross-referencing within your article. Do not just refer to "the text."
- You may give subsections a brief heading. Headings should appear on a separate line.
- Do not include the article abstract within section numbering.

Theory and calculation

The theory section should lay the foundation for further work by extending the background you provided in the introduction to your article. The calculation section should represent a practical development from a theoretical basis.

Glossary

Please provide definitions of field-specific terms used in your article, in a separate list.

Acknowledgements

Include any individuals who provided you with help during your research, such as help with language, writing or proof reading, in the acknowledgements section.

Acknowledgements should be placed in a separate section which appears directly before the reference list. Do not include acknowledgements on your title page, as a footnote to your title, or anywhere else in your article other than in the separate acknowledgements section.

Author contributions: CRediT

Corresponding authors are required to acknowledge co-author contributions using [CRediT \(Contributor Roles Taxonomy\)](#) roles:

- Conceptualization
- Data curation
- Formal analysis
- Funding acquisition
- Investigation
- Methodology
- Project administration
- Resources
- Software
- Supervision
- Validation
- Visualization
- Writing – original draft
- Writing – review and editing

Not all CRediT roles will apply to every manuscript and some authors may contribute through multiple roles.

We advise you to read [more about CRediT](#) and view an [example of a CRediT author statement](#).

Funding sources

Authors must disclose any funding sources who provided financial support for the conduct of the research and/or preparation of the article. The role of sponsors, if any, should be declared in relation to the study design, collection, analysis and interpretation of data, writing of the report and decision to submit the article for publication. If funding sources had no such involvement this should be stated in your submission.

Atmospheric Environment

number zzzz]; and the United States Institutes of Peace [grant number aaaa].

It is not necessary to include detailed descriptions on the program or type of grants, scholarships and awards. When funding is from a block grant or other resources available to a university, college, or other research institution, submit the name of the institute or organization that provided the funding.

If no funding has been provided for the research, it is recommended to include the following sentence:

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Appendices

We ask you to use the following format for appendices:

- Identify individual appendices within your article using the format: A, B, etc.
- Give separate numbering to formulae and equations within appendices using formats such as Eq. (A.1), Eq. (A.2), etc. and in subsequent appendices, Eq. (B.1), Eq. (B. 2) etc. In a similar way, give separate numbering to tables and figures using formats such as Table A.1; Fig. A.1, etc.

References

References within text

Any references cited within your article should also be present in your reference list and vice versa. Some guidelines:

- References cited in your abstract must be given in full.
- We recommend that you do not include unpublished results and personal communications in your reference list, though you may mention them in the text of your article.
- Any unpublished results and personal communications included in your reference list must follow the standard reference style of the journal. In substitution of the publication date add "unpublished results" or "personal communication."
- References cited as "in press" imply that the item has been accepted for publication.

Linking to cited sources will increase the discoverability of your research.

Before submission, check that all data provided in your reference list are correct, including any references which have been copied. Providing correct reference data allows us to link to abstracting and indexing services such as Scopus, Crossref and PubMed. Any incorrect surnames, journal or book titles, publication years or pagination within your references may prevent link creation.

We encourage the use of Digital Object Identifiers (DOIs) as reference links as they provide a permanent link to the electronic article referenced.

Reference format

This journal does not set strict requirements on reference formatting at submission. Some guidelines:

- References can be in any style or format as long as the style is consistent.
- Author names, journal or book titles, chapter or article titles, year of publication, volume numbers, article numbers or pagination must be included, where applicable.
- Use of DOIs is recommended.

Our journal reference style will be applied to your article after acceptance, at proof stage. If required, at this stage we will ask you to correct or supply any missing reference data.

Reference style

Indicate references by adding a number within square brackets in the text. You can refer to author names within your text, but you must always give the reference number, e.g., "as demonstrated [3,6]. Barnaby and Jones [8] obtained a different result".

Number references in the order they appear in your article.

Abbreviate journal names according to the [List of Title Word Abbreviations \(LTWA\)](#).

Examples:

Atmospheric Environment

<https://doi.org/10.1016/j.sc.2020.00972>

Reference to a journal publication with an article number:

[2] J. van der Geer, T. Handgraaf, R.A. Lupton, 2022. The art of writing a scientific article. *Heliyon*. 19, e00205. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e00205>.

Reference to a book:

[3] W. Strunk Jr., E.B. White, *The Elements of Style*, fourth ed., Longman, New York, 2000.

Reference to a chapter in a book:

[4] G.R. Mettam, L.B. Adams, How to prepare an electronic version of your article, in: B.S. Jones, R.Z. Smith (Eds.), *Introduction to the Electronic Age*, E-Publishing Inc., New York, 2020, pp. 281 - 304.

Reference to a website:

[5] Cancer Research UK, Cancer statistics reports for the UK. <http://www.cancerresearchuk.org/aboutcancer/statistics/cancerstatsreport/>, 2023 (accessed 13 March 2023).

Reference to a dataset:

[6] M. Oguro, S. Imahiro, S. Saito, T. Nakashizuka, Mortality data for Japanese oak wilt disease and surrounding forest compositions [dataset], Mendeley Data, v1, 2015. <https://doi.org/10.1234/abc12nb39r1>.

Reference to software:

[7] E. Coon, M. Berndt, A. Jan, D. Svyatsky, A. Atchley, E. Kikinzon, D. Harp, G. Manzini, E. Shelef, K. Lipnikov, R. Garimella, C. Xu, D. Moulton, S. Karra, S. Painter, E. Jafarov, S. Molins, *Advanced Terrestrial Simulator (ATS) v0.88* [software], Zenodo, March 25, 2020. <https://doi.org/10.1234/zenodo.3727209>.

Reference style

Web references

When listing web references, as a minimum you should provide the full URL and the date when the reference was last accessed. Additional information (e.g. DOI, author names, dates or reference to a source publication) should also be provided, if known.

You can list web references separately under a new heading directly after your reference list or include them in your reference list.

Data references

We encourage you to cite underlying or relevant datasets within article text and to list data references in the reference list.

When citing data references, you should include:

- author name(s)
- dataset title
- data repository
- version (where available)
- year
- global persistent identifier

Add [dataset] immediately before your reference. This will help us to properly identify the dataset. The [dataset] identifier will not appear in your published article.

Preprint references

We ask you to mark preprints clearly. You should include the word "preprint" or the name of the preprint server as part of your reference and provide the preprint DOI.

Where a preprint has subsequently become available as a peer-reviewed publication, use the formal publication as your reference.

Atmospheric Environment

Most Elsevier journals have their reference template available in popular reference management software products. These include products that support Citation Style Language (CSL) such as [Mendeley Reference Manager](#).

If you use a citation plug-in from these products, select the relevant journal template and all your citations and bibliographies will automatically be formatted in the journal style. We advise you to [remove all field codes](#) before submitting your manuscript to any reference management software product.

If a template is not available for this journal, follow the format given in examples in the reference style section of this Guide for Authors.

Submitting your manuscript

Submission checklist

Before completing the submission of your manuscript, we advise you to read our submission checklist:

- One author has been designated as the corresponding author and their full contact details (email address, full postal address and phone numbers) have been provided.
- All files have been uploaded, including keywords, figure captions and tables (including a title, description and footnotes) included. This includes any supplementary materials and videos.
- Spelling and grammar checks have been carried out.
- All references in the article text are cited in the reference list and vice versa.
- Permission has been obtained for the use of any copyrighted material from other sources, including the Web.
- For open access articles, all authors understand that they are responsible for payment of the article publishing charge (APC) if the manuscript is accepted. Payment of the APC may be covered by the corresponding author's institution, or the research funder.

Submit online

Our online submission system guides you through the process steps of entering your manuscript details and uploading your files. The system converts your article files to a single PDF file used in the peer-review process.

Editable files (e.g., Word, LaTeX) are required to typeset your article for final publication. All correspondence, including notification of the editor's decision and requests for revision, is sent by email.

Please follow this link to [submit your paper](#).

After receiving a final decision

Article Transfer Service

If your manuscript is more suitable for an alternative Elsevier journal, you may receive an email asking you to consider transferring your manuscript via the [Elsevier Article Transfer Service](#).

The recommendation could come from the journal editor, a dedicated [in-house scientific managing editor](#), a tool-assisted recommendation or a combination.

If you agree with the recommendation, your manuscript will be transferred and independently reviewed by the editors of the new journal. You will have the opportunity to make revisions, if necessary, before the submission is complete at the destination journal.

Publishing agreement

Authors will be asked to complete a publishing agreement after acceptance. The corresponding author will receive a link to the online agreement by email. We advise you to read [Elsevier's policies related to copyright](#) to learn more about our copyright policies and your, and your employer's/institution's, additional rights for subscription and open access articles.

License options

Authors will be offered [open access user license options](#) which will determine how you, and third parties, can reuse your open access article. We advise that you review these options and any funding body license requirements before selecting a license option.

Open access

We refer you to our [open access information page](#) to learn about open access options for this journal.

Atmospheric Environment

Proof correction

To ensure a fast publication process we will ask you to provide proof corrections within two days.

Corresponding authors will be sent an email which includes a link to our online proofing system, allowing annotation and correction of proofs online. The environment is similar to Word. You can edit text, comment on figures and tables and answer questions raised by our copy editor. Our web-based proofing service ensures a faster and less error-prone process.

You can choose to annotate and upload your edits on the PDF version of your article, if preferred. We will provide you with proofing instructions and available alternative proofing methods in our email.

The purpose of the proof is to check the typesetting, editing, completeness and correctness of your article text, tables and figures. Significant changes to your article at the proofing stage will only be considered with approval of the journal editor.

Share Link

A customized [Share Link](#), providing 50 days free access to the final published version of your article on [ScienceDirect](#), will be sent by email to the corresponding author. The Share Link can be used to share your article on any communication channel, such as by email or on social media.

A Share Link will not be provided if your article is published open access. The final published version of your open access article will be openly available on ScienceDirect and can be shared through the article DOI link.

Responsible sharing

We encourage you to share and promote your article to give additional visibility to your work, enabling your paper to contribute to scientific progress and foster the exchange of scientific developments within your field. Read more about how to [responsibly share and promote your article](#).

Resources for authors

Elsevier Researcher Academy

If you would like help to improve your submission or navigate the publication process, support is available via [Elsevier Researcher Academy](#).

Elsevier Researcher Academy offers free e-learning modules, webinars, downloadable guides and research writing and peer review process resources.

Language and editing services

We recommend that you write in American or British English but not a combination of both.

If you feel the English language in your manuscript requires editing to eliminate possible grammatical or spelling errors and to conform to correct scientific English, you may wish to use the [English Language Editing service](#) provided by Elsevier's Author Services.

Getting help and support

Author support

We recommend that you visit our [Journal Article Publishing Support Center](#) if you have questions about the editorial process or require technical support for your submission. Some popular FAQs:

- [How can I track the status of my submitted article?](#)
- [When will my article be published?](#)



All content on this site: Copyright © 2026 Elsevier B.V., its licensors, and contributors. All rights are reserved, including those for text and data mining, AI training, and similar technologies. For all open access content, the relevant licensing terms apply.