POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA E GESTÃO DE RISCOS AMBIENTAIS URBANOS: EVIDÊNCIAS PARA UMA ABORDAGEM INTEGRADA EM FORTALEZA (CE)

Antonio Luigi de Souza Carvalho [1] ; Antonia Elissandra Furtado Silva [2] Cleiton da Silva Silveira [3]

Palavras-Chave – Riscos ambientais urbanos; poluição atmosférica; condições meteorológicas; monitoramento ambiental; adaptação urbana.

INTRODUÇÃO

Ao longo das últimas décadas, o mundo tem vivenciado intensas transformações socioeconômicas e ambientais, marcadas pelo intenso crescimento populacional, forte desenvolvimento industrial e pela rápida urbanização, fatores que têm contribuído para a intensificação de diversos problemas ambientais, entre eles a poluição atmosférica (Santos, 2022).

A poluição atmosférica constitui um dos principais desafios ambientais presentes nas cidades, sendo responsável por impactos relevantes na saúde humana, ecossistemas e na qualidade ambiental. Nos centros urbanos, as concentrações de poluentes resultam da interação entre fontes emissoras e condições atmosféricas que influenciam os processos de transporte, dispersão e remoção dos contaminantes presentes na atmosfera (Seinfeld & Pandis, 2016; Santos, 2022).

Entre os fatores que condicionam a qualidade do ar, destacam-se as variáveis meteorológicas, como precipitação, velocidade do vento, temperatura e umidade relativa do ar. Essas variáveis podem modificar significativamente as concentrações atmosféricas ao favorecer ou restringir processos de ventilação, dispersão e deposição dos poluentes (Moraes et al., 2019; Tai et al., 2012).

A poluição atmosférica pode ser entendida como um importante componente dos riscos ambientais urbanos, uma vez que sua ocorrência e intensidade resultam da interação entre fatores ambientais, climáticos e antrópicos. A compreensão dessas relações é essencial para apoiar o desenvolvimento de estratégias de planejamento, adaptação e prevenção em ambientes urbanos cada vez mais complexos (Mendonça, 2004; Valencio et al., 2009).

Apesar da crescente disponibilidade de dados de monitoramento ambiental, ainda são limitados os estudos que investigam de forma integrada a relação entre poluentes atmosféricos e variáveis meteorológicas em Fortaleza (CE), dificultando a incorporação dessas informações aos processos de gestão de riscos ambientais urbanos. Nesse sentido, o presente estudo teve como objetivo analisar a importância de uma abordagem integrada para a gestão de riscos ambientais urbanos, analisando a interação entre poluição atmosférica e condições meteorológicas no município de Fortaleza (CE) a partir de dados de monitoramento da qualidade do ar entre os anos de 2020 e 2025.

METODOLOGIA

O estudo foi realizado no município de Fortaleza, capital do estado do Ceará, situado na região Nordeste do Brasil. O município apresenta um clima tropical quente subúmido, com estação chuvosa

1) Mestrando em Engenharia Civil (Recursos Hídricos). Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, Ceará, Brasil. E-mail: luigicarvalho.eng@gmail.com
2) Graduada em Arquitetura. Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, Ceará, Brasil. E-mail: elissandrafurtado.arq@gmail.com
3) Doutor em Engenharia Civil (Recursos Hídricos). Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, Ceará, Brasil. E-mail: cleitonsilveira@ufc.br

concentrada principalmente entre os meses de fevereiro e maio, fator relevante para o desenvolvimento da análise integrada entre qualidade do ar, condições meteorológicas e riscos ambientais urbanos.

Os dados utilizados foram obtidos por meio da Estação Móvel de Qualidade do Ar (EMQAR), vinculada à Secretaria Municipal do Urbanismo e Meio Ambiente (SEUMA), responsável pelo monitoramento contínuo de poluentes atmosféricos e variáveis meteorológicas em diferentes regiões da cidade. Foram analisadas séries temporais horárias referentes ao período de 2020 a 2025, contemplando as concentrações de dióxido de nitrogênio (NO_2) e material particulado inalável (MP_{10}), além de variáveis meteorológicas como precipitação, velocidade e direção do vento.

Embora a série histórica disponível comtempla o período de 2020 a 2025, as análises de correlação foram realizadas para os anos de 2024 e 2025 por apresentarem maior continuidade temporal e disponibilidade simultânea das variáveis ambientais consideradas neste estudo.

Para a análise, os dados passaram por procedimentos de controle de qualidade, incluindo a remoção de registros inconsistentes, valores negativos e observações ausentes. Posteriormente, foram calculadas estatísticas descritivas e analisados os padrões temporais dos poluentes atmosféricos e das variáveis meteorológicas. A relação entre as variáveis foi avaliada por meio do coeficiente de correlação de Spearman (ρ), método não paramétrico utilizado para identificar associações monotônicas entre variáveis contínuas ou ordinais, sendo especialmente adequado para conjuntos de dados que não atendem ao pressuposto de normalidade (Schober; Boer; Schwarte, 2018).

A análise foi conduzida a partir de uma perspectiva integrada, buscando compreender a relação entre a dinâmica meteorológica, processos de dispersão e remoção dos poluentes como fatores que contribuem para a poluição atmosférica em áreas urbanas, para além das fontes emissoras. Dessa forma, os resultados foram interpretados como subsídios para a discussão sobre planejamento, adaptação e prevenção de riscos ambientais urbanos.

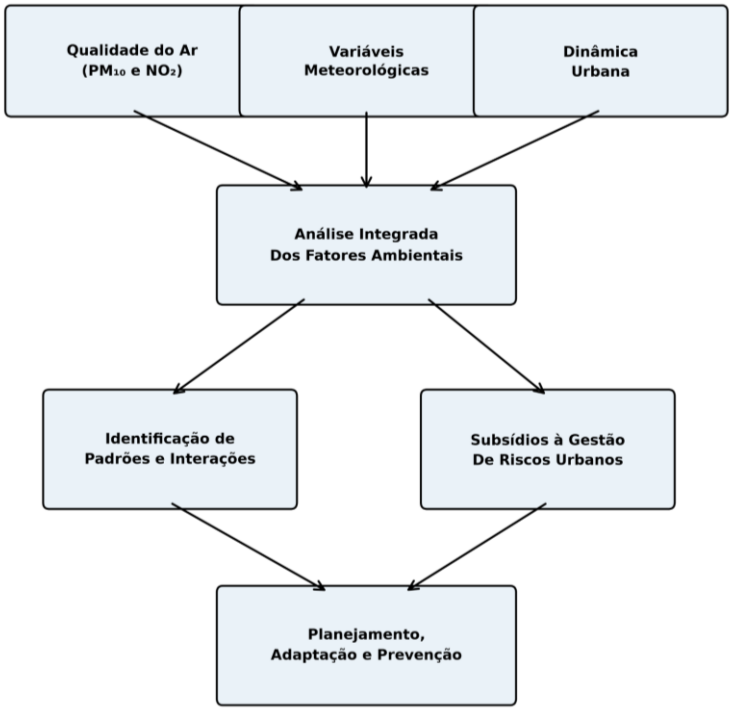


Figura 1 – Fluxograma da abordagem integrada adotada no estudo, relacionando dados de qualidade do ar, variáveis meteorológicas e dinâmica urbana como subsídios para a análise e gestão de riscos ambientais urbanos.
Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

RESULTADOS

A análise integrada dos dados de qualidade do ar e das variáveis meteorológicas sugere que a dinâmica dos poluentes atmosféricos em Fortaleza está associada à interação entre múltiplos fatores ambientais. Para investigar essas relações, foram calculados os coeficientes de correlação de Spearman entre PM_{10}, NO_2, precipitação e velocidade do vento para os anos de 2024 e 2025.

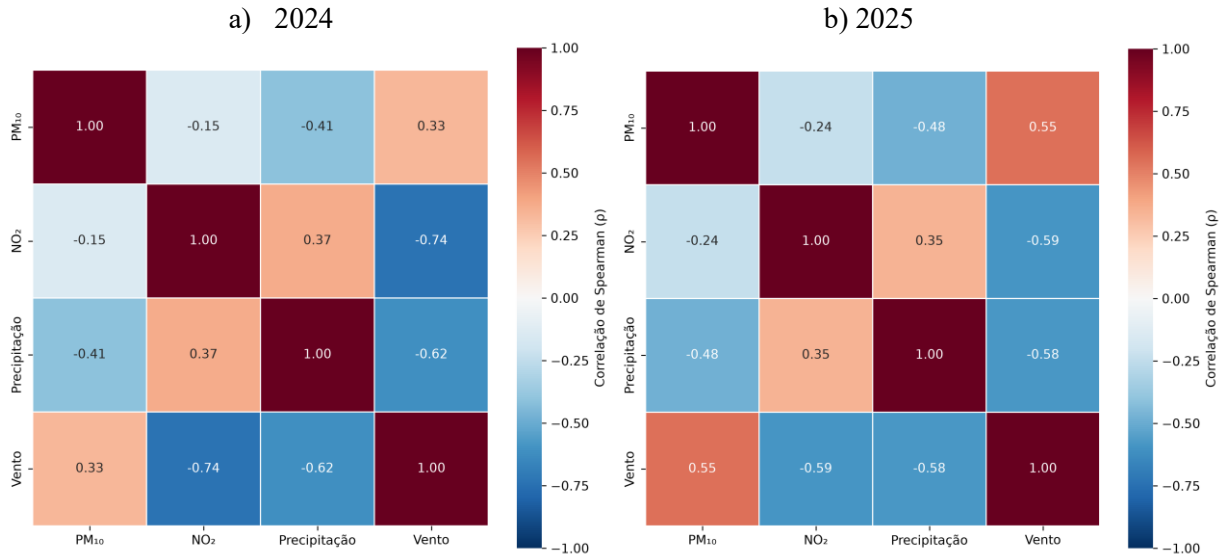


Figura 2 – Matrizes de correlação de Spearman entre PM_{10}, NO_2, precipitação e velocidade do vento para os anos de 2024 (a) e 2025 (b).
Fonte: Elaborado pelos autores a partir dos dados da SEUMA (2024–2025).

Para o PM_{10}, observou-se correlação negativa com a precipitação em ambos os anos (ρ = -0,41 em 2024 e ρ = -0,48 em 2025). A correlação negativa observada entre precipitação e material particulado indica que eventos pluviométricos podem favorecer a remoção de aerossóis da atmosfera por meio dos processos de deposição úmida, reduzindo as concentrações de PM na camada próxima à superfície (Tai et al., 2012).

Também foi observada correlação positiva entre PM_{10} e velocidade do vento (ρ = 0,33 em 2024 e ρ = 0,55 em 2025). A correlação positiva observada entre velocidade do vento e PM_{10} sugere que, além de favorecer a dispersão atmosférica, o vento pode contribuir para a ressuspensão e o transporte de partículas previamente depositadas na superfície, fenômeno frequentemente observado em ambientes urbanos (Seinfeld & Pandis, 2016).

Para o NO_2, verificou-se correlação negativa moderada a forte com a velocidade do vento nos dois anos analisados (ρ = -0,74 em 2024 e ρ = -0,59 em 2025), evidenciando que condições de maior ventilação podem favorecer os processos de dispersão atmosférica, reduzindo o acúmulo desse poluente próximo à superfície.

As correlações positivas observadas entre NO_2 e precipitação (ρ = 0,37 em 2024 e ρ = 0,35 em 2025) apresentaram menor intensidade e indicam que a variabilidade desse poluente pode estar associada a fatores adicionais não contemplados nesta análise, como características do tráfego urbano, padrões de emissão e processos atmosféricos locais.

Portanto, a consistência dos padrões observados de correlação entre os anos de 2024 e 2025 sugere que a qualidade do ar em Fortaleza está associada à interação entre fatores meteorológicos e fontes emissoras urbanas. Esses resultados reforçam a importância de abordagens integradas para a compreensão dos riscos ambientais urbanos, considerando simultaneamente condições atmosféricas e indicadores ambientais como subsídio ao planejamento, adaptação e prevenção.

CONCLUSÕES

- Os resultados sugerem que a qualidade do ar em Fortaleza está associada à interação entre condições meteorológicas, processos atmosféricos locais e fontes emissoras urbanas, evidenciando a complexidade dos riscos ambientais em áreas urbanas.
- As correlações observadas indicam que a precipitação pode atuar na remoção de partículas atmosféricas, enquanto a velocidade do vento influencia tanto a dispersão do NO_2 quanto a ressuspensão e o transporte do PM_{10}.
- A manutenção de padrões semelhantes entre 2024 e 2025 reforça a consistência das relações identificadas e evidencia a importância de integrar dados de qualidade do ar e variáveis meteorológicas na análise dos riscos ambientais urbanos.
- A abordagem integrada adotada neste estudo pode contribuir para o planejamento urbano, a adaptação climática e a formulação de estratégias de prevenção, especialmente em cidades costeiras marcadas por intensa urbanização e elevada vulnerabilidade ambiental.

REFERÊNCIAS

MENDONÇA, Francisco. Riscos, vulnerabilidade e abordagem socioambiental urbana: uma reflexão a partir da RMC e de Curitiba. Desenvolvimento e Meio Ambiente, Curitiba, n. 10, p. 139-148, jul./dez. 2004.

MORAES, Sara Lopes de; ALMENDRA, Ricardo; SANTANA, Paula; GALVANI, Emerson. Variáveis meteorológicas e poluição do ar e sua associação com internações respiratórias em crianças: estudo de caso em São Paulo, Brasil. Cadernos de Saúde Pública, Rio de Janeiro, v. 35, n. 7, e00101418, 2019.

SANTOS, Rafael Pereira dos. Qualidade do ar e risco à saúde durante o ano atípico de 2020 (Fortaleza, CE). 2022. 99 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

SCHOBER, Patrick; BOER, Christa; SCHWARTE, Lothar A. Correlation coefficients: appropriate use and interpretation. *Anesthesia & Analgesia*, Philadelphia, v. 126, n. 5, p. 1763–1768, 2018. DOI: 10.1213/ANE.0000000000002864.

SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change. 3. ed. Hoboken: Wiley, 2016.

TAI, A. P. K.; MICKLEY, L. J.; JACOB, D. J.; et al. Meteorological modes of variability for fine particulate matter ($PM_{2.5}$) air quality in the United States: implications for $PM_{2.5}$ sensitivity to climate change. Atmospheric Chemistry and Physics, v. 12, p. 3131–3145, 2012. DOI: 10.5194/acp-12-3131-2012.

VALENCIO, Norma; SIENA, Mariana; MARCHEZINI, Victor; GONÇALVES, Juliano Costa (org.). Sociologia dos desastres: construção, interfaces e perspectivas no Brasil. São Carlos: RiMa Editora, 2009.