PRECIPITAÇÃO E QUALIDADE DO AR EM FORTALEZA-CE: EPISÓDIOS EXTREMOS DE POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA E VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS ASSOCIADAS

Amanda Vasconcelos de Araújo [1]; Antonio Luigi Souza Carvalho [2]; Cleiton Silvia Silveira [3]

Palavras-Chave – Precipitação, Poluentes atmosféricos, Ciclo hidrológico.

INTRODUÇÃO

A qualidade do ar constitui um dos mais urgentes desafios ambientais da contemporaneidade. O acelerado processo de urbanização, a expansão industrial e o crescimento da frota de veículos automotores intensificaram a poluição atmosférica nos centros urbanos, expondo milhões de pessoas a concentrações de poluentes que superam os limites seguros para a saúde humana. Nesse contexto, a precipitação pluviométrica ocupa papel simultaneamente revelador e ambíguo: a chuva que remove partículas e gases poluentes da atmosfera é a mesma transformada por esses poluentes, tornando-se ácida, carregando metais pesados e contaminando solos e corpos d'água ao atingir a superfície (MARTIN; MARTIN, 2020).

Os poluentes atmosféricos alteram os mecanismos de formação de nuvens e precipitação, podendo suprimir chuvas em determinadas condições e intensificar eventos extremos em outras (TWOMEY, 1977; AGU ADVANCES, 2026). Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), 92% da população mundial reside em localidades onde a qualidade do ar excede os limites seguros, sendo a exposição crônica à poluição responsável por aproximadamente 8,1 milhões de mortes prematuras em 2021, 12% do total de óbitos globais (STATE OF GLOBAL AIR, 2024). No Brasil, o problema assume dimensão climática própria: metrópoles como Fortaleza-CE concentram emissões veiculares e industriais que interagem com o regime de chuvas regional, comprometendo a qualidade da água e agravando desigualdades socioambientais, com impactos desproporcionais sobre populações vulneráveis, incluindo crianças, idosos e grupos de baixa renda (OMS, 2021; IEA/USP, 2022).

Diante desse cenário, compreender a relação entre precipitação e poluição atmosférica torna-se condição indispensável para a gestão integrada da qualidade do ar e dos recursos hídricos em escala urbana. Essa relação, longe de ser unidirecional, configura um sistema de retroalimentação em que a poluição altera o ciclo hidrológico e este por sua vez, condiciona a dispersão, a acumulação e a transformação química dos poluentes, com implicações diretas para o clima, a energia e a segurança alimentar (FAO, 2023; SEINFELD; PANDIS, 2006). Nesse sentido, o presente trabalho propõe analisar as interações entre precipitação e poluição atmosférica em Fortaleza-CE, com ênfase no papel das variáveis meteorológicas nos episódios extremos de poluição do ar e nas consequências desses processos para a qualidade da água urbana.

1) Graduanda em Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, Ceará, Brasil. E-mail: amandavasconcelloos@alu.ufc.br
2) Mestrando em Engenharia Civil (Recursos Hídricos). Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, Ceará, Brasil. E-mail: luigicarvalho.eng@gmail.com
3) Doutor em Engenharia Civil (Recursos Hídricos). Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, Ceará, Brasil. E-mail: cleitonsilveira@ufc.br

METODOLOGIA

O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa quantitativa e exploratória, baseada em dados secundários de qualidade do ar e de variáveis meteorológicas do município de Fortaleza, Ceará, obtidos junto à Secretaria Municipal de Urbanismo e Meio Ambiente de Fortaleza (SEUMA) e ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), este último utilizado na caracterização socioespacial da área de estudo. Fortaleza situa-se sob influência do clima tropical semiárido, com regime pluviométrico sazonal concentrado entre fevereiro e maio e longos períodos de estiagem, característica que reforça a relevância de investigar a relação entre precipitação e poluição atmosférica na cidade. Foram analisadas séries temporais dos principais poluentes monitorados pela estação da SEUMA (PM2,5, PM10, NO_2, SO_2, CO e O_3) e de variáveis meteorológicas associadas (precipitação, temperatura, umidade relativa, velocidade e direção do vento), referentes a 2025, com resolução horária/diária.

A análise foi organizada em três eixos. O primeiro examinou a relação entre precipitação e concentração de poluentes a partir das medianas diárias de cada variável, medida escolhida pela assimetria típica dessas distribuições, o que confere maior robustez estatística (WILKS, 2011), excluindo dias sem registro de chuva e aplicando o coeficiente de correlação de Pearson. O segundo eixo tratou do ciclo diurno dos poluentes, comparando medianas horárias entre dias com e sem chuva para avaliar possíveis efeitos de lavagem atmosférica (*washout*) e de supressão dos picos associados ao tráfego. O terceiro eixo identificou episódios extremos, de poluição, com base na Resolução CONAMA nº 491/2018 e nas diretrizes da OMS (2021), e de precipitação, por critérios estatísticos, analisando as condições meteorológicas associadas à origem e à persistência desses eventos. O processamento e a análise estatística foram realizados em Python, Excel e QGIS, com resultados visualizados por meio de séries temporais, diagramas de dispersão e mapa de localização da estação de monitoramento.

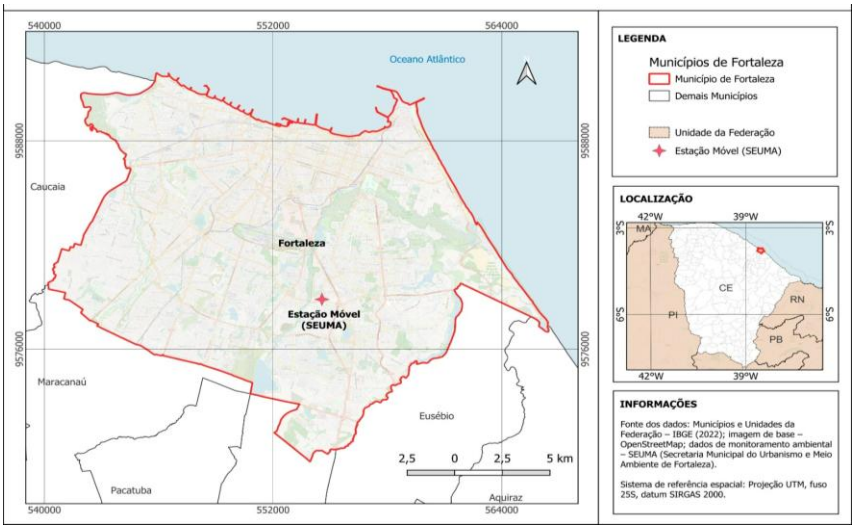


Figura 1 – Localização da estação móvel de monitoramento da qualidade do ar (SEUMA) no município de Fortaleza-CE. Fonte: elaborado pelos autores, com base em dados do IBGE (2022) e da SEUMA (2025).

RESULTADOS

A matriz de correlação entre poluentes atmosféricos e variáveis meteorológicas em Fortaleza-CE (2025) revela padrões coerentes com a dinâmica atmosférica tropical urbana (Figura 2). Destaca-se

que o ozônio (O_3) apresentou correlação positiva forte com a velocidade do vento (r = 0,79) e moderada com a radiação solar (r = 0,43), e negativa com o NO_2 (r = -0,50), padrão consistente com sua formação fotoquímica a partir da quebra de óxidos de nitrogênio pela radiação solar, com picos coincidindo com o horário de maior insolação. O NO_2, por sua vez, correlacionou-se negativamente com vento (r = -0,61), temperatura (r = -0,51) e radiação solar (r = -0,44), o que pode estar associado ao seu consumo fotoquímico e à sua dispersão pelo vento.

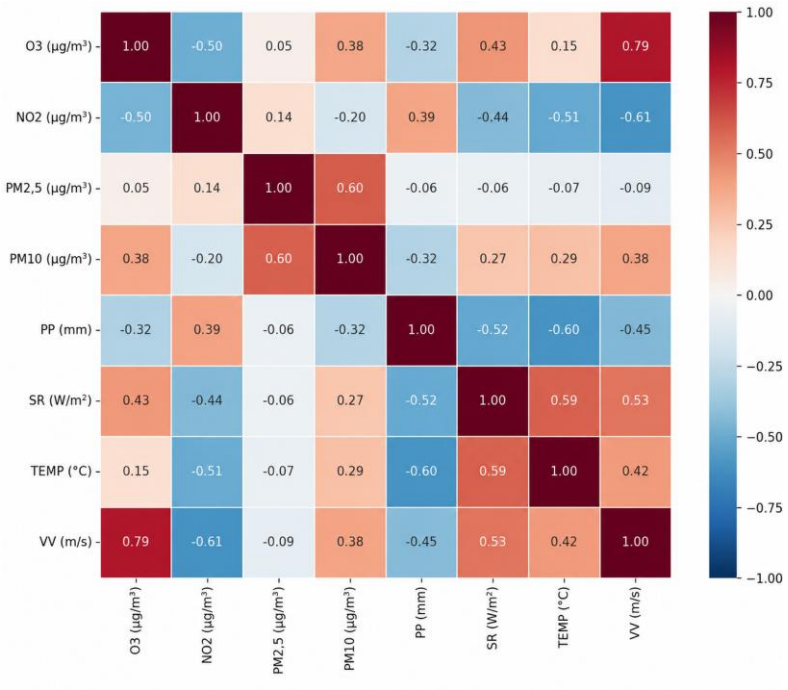


Figura 2 – Matriz de correlação entre poluentes atmosféricos e variáveis meteorológicas em Fortaleza-CE (2025). **Fonte:** elaborado pelos autores, com base em dados da SEUMA (2025).

O PM2,5 mostrou correlações próximas de zero com as variáveis meteorológicas, incluindo a precipitação (r = -0,06), sugerindo predomínio de fontes de emissão primária contínuas, como o tráfego veicular, pouco moduladas pelas condições atmosféricas analisadas. O PM10 correlacionou-se negativamente com a precipitação (r = -0,32); esse resultado é compatível com um possível efeito da chuva na remoção de material particulado, por incorporação à água e por redução da ressuspensão de partículas do solo umedecido, hipótese que os dados disponíveis não permitem confirmar de forma conclusiva. Já a correlação positiva entre PM10 e vento (r = 0,38) diverge do padrão mais reportado na literatura, em que maior vento favorece a dispersão e a calmaria favorece a estagnação e o acúmulo, podendo refletir a contribuição de aerossóis marinhos e processos de ressuspensão típicos do ambiente costeiro de Fortaleza, hipótese que requer investigação complementar.

Ressalta-se, ainda, que a precipitação correlacionou-se negativamente com temperatura (r = -0,60), radiação solar (r = -0,52) e vento (r = -0,45), padrão coerente com a dinâmica de brisas da região: a convergência da brisa terrestre com os alísios de sudeste favorece chuvas fracas entre a madrugada e o início da manhã, enquanto a brisa marítima, à tarde, tende a suprimir a formação de cumulus e reduzir a precipitação. Em síntese, O_3 e NO_2 mostraram-se associados a processos fotoquímicos e de dispersão atmosférica, o PM2,5 mostrou-se relativamente insensível às variáveis meteorológicas, indicando possível predomínio de fontes locais contínuas, e o PM10 revelou relação mais complexa, na qual a precipitação pode atuar como mecanismo de remoção, mas cuja relação com o vento aponta para particularidades locais que merecem maior aprofundamento.

CONCLUSÕES

Os resultados sugerem que a precipitação desempenha papel central e ambíguo na dinâmica da poluição atmosférica em Fortaleza-CE:

- **Efeito de limpeza do ar:** a chuva pode atuar como agente de remoção de poluentes por deposição úmida, efeito compatível com a correlação negativa observada entre precipitação e PM10 (r = -0,32).
- **Condicionamento mútuo:** a própria ocorrência de chuva parece ser moldada pelas condições atmosféricas que também regulam os episódios de poluição, como o regime local de brisas e a sazonalidade pluviométrica do semiárido.
- **Fotoquímica e dispersão:** O_3 e NO_2 mostraram-se associados a processos fotoquímicos e de dispersão pelo vento.
- **Fontes locais:** o PM2,5 mostrou-se pouco sensível às variáveis meteorológicas analisadas, o que pode indicar predomínio de fontes locais contínuas, como o tráfego veicular.
- **Remoção por lavagem atmosférica:** entre os poluentes analisados, o PM10 foi o que apresentou indícios mais consistentes de remoção associada à chuva, ainda que sua relação com o vento sugira particularidades locais que merecem investigação futura.

REFERÊNCIAS

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução CONAMA nº 491, de 19 de novembro de 2018. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar. Brasília: CONAMA, 2018.

HEALTH EFFECTS INSTITUTE. State of Global Air 2024: special report. Boston: Health Effects Institute, 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Dados socioespaciais do município de Fortaleza-CE. Rio de Janeiro: IBGE, 2022.

IQAIR. PM2.5. [S. l.]: IQAir, . Disponível em: https://www.iqair.com/newsroom/pm2-5. Acesso em: 18 jun. 2026.

SECRETARIA MUNICIPAL DE URBANISMO E MEIO AMBIENTE DE FORTALEZA (SEUMA). Dados de monitoramento da qualidade do ar e variáveis meteorológicas de Fortaleza-CE. Fortaleza: SEUMA, 2025.

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

TEIXEIRA, R. F. B. O fenômeno da brisa e sua relação com a chuva sobre Fortaleza-CE. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 23, n. 3, p. 282-291, 2008.

TWOMEY, S. The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds. Journal of the Atmospheric Sciences, v. 34, n. 7, p. 1149-1152, 1977.