



FATORES CLIMÁTICOS E POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA URBANA EM SÃO PAULO: UMA ABORDAGEM MULTIVARIADA

¹Sophia Molina Fernandes, ²Danilo Covaes Nogarotto, ³Simone Andrea Pozza

¹Faculdade de Tecnologia (FT), Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP),
s254121@dac.unicamp.br; ²Faculdade de Tecnologia (FT), Universidade Estadual de Campinas
(UNICAMP), danilocn@unicamp.br; ³Faculdade de Tecnologia (FT), Universidade Estadual de
Campinas (UNICAMP), spozza@unicamp.br.

Grupo temático: Ambiente e Clima
Eixo: Gestão de riscos climáticos

Resumo

A qualidade do ar é uma crescente preocupação global, com a poluição atmosférica associada a doenças cardiorrespiratórias. Este estudo analisou São Paulo, cidade mais populosa do Brasil, responsável por 30% da frota veicular. Foram analisados material particulado (MP₁₀ e MP_{2,5}), ozônio (O₃) e óxidos de nitrogênio (NO, NO₂ e NO_x). Fatores meteorológicos como temperatura, umidade, vento, radiação solar e pressão foram considerados. O objetivo foi avaliar a influência de variáveis meteorológicas nas concentrações de poluentes por meio da Análise de Correlação Canônica (ACC), utilizando dados de 2016 a 2025 do QUALAR/CETESB da estação Parque Dom Pedro II. Os resultados revelaram duas Variáveis Canônicas significativas. A 1ª VC evidenciou forte correlação entre MP₁₀, MP_{2,5}, NO, NO₂ e NO_x com a umidade, caracterizando deposição úmida, onde o aumento da umidade reduz as concentrações desses poluentes. A 2ª VC destacou correlações entre O₃ e NO com temperatura, radiação solar e vento, confirmando a dinâmica fotoquímica urbana, onde o NO veicular consome O₃. A ACC mostrou-se robusta para identificar relações entre variáveis meteorológicas e poluentes.

Palavras-chave: Análise multivariada; Análise de Correlação Canônica; Fatores meteorológicos; Poluição atmosférica.

Introdução

A poluição do ar é descrita como a alta concentração, em relação aos padrões estabelecidos na legislação, de substâncias nocivas à saúde e prejudiciais ao meio ambiente. (CETESB, 2026). Ao falarmos de poluição atmosférica, os principais poluentes são provenientes de emissões veiculares e industriais.

A cidade de São Paulo, a mais populosa do país, com cerca de 11 milhões de habitantes (IBGE, 2025) e apresenta 30% de toda a frota veicular do Estado de São Paulo, resultando em elevadas emissões de poluentes atmosféricos (CETESB, 2023).

Os principais poluentes atmosféricos são os Materiais Particulados (MPs), o Ozônio



(O₃) e os Óxidos de Nitrogênio (NO, NO₂ e NO_x). Estes poluentes são utilizados como indicadores de qualidade do ar, com dados disponíveis pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB).

Os fatores meteorológicos também são levados em consideração para a qualidade do ar. Variáveis como velocidade do vento, temperatura do ar, umidade do ar entre outras podem ditar o comportamento dos poluentes no meio ambiente. Os fatores meteorológicos influenciam fortemente na variação de concentração dos poluentes atmosféricos. Por exemplo, a temperatura influencia nas reações químicas sofridas pelos poluentes, assim como na permanência dos poluentes no meio (SHIHAB, 2022).

O uso de ferramentas estatísticas multivariadas como a Análise de Correlação Canônica (ACC) já é amplamente utilizado na área dos atmosféricos, por sua facilidade de interpretação dos dados (WILKS, 2020; HARTMAN, 2024).

Em SHIHAB (2022), a ACC em Mosul (Irake) relacionou parâmetros meteorológicos e poluentes, concluindo que a temperatura impacta fortemente o O₃ e a direção do vento influencia o transporte de SO₂ e CO veiculares. SOUZA, AMORIM e PINTO (2025), utilizando a ACC para correlacionar variáveis físico-químicas e biológicas da água com a incidência de doenças em Piracicaba (SP), identificaram dois pares canônicos significativos e concluíram que parâmetros como fósforo, pH, concentração de cianobactérias e fatores climáticos influenciam a ocorrência de doenças respiratórias, digestivas e neurológicas na região.

Desta forma, o presente trabalho tem como propósito identificar a relação entre os fatores meteorológicos e os poluentes atmosféricos na cidade de São Paulo por meio da análise de correlação canônica.

Metodologia

O foco do trabalho foi o município de São Paulo, capital do Estado de São Paulo. Com uma área territorial de 1.521,202 km² e uma densidade demográfica de 7.528,26 hab/km², é uma das maiores cidades do mundo (IBGE, 2025), que apresenta altas emissões de poluentes atmosféricos, principalmente devido aos veículos e atividades industriais (CETESB, 2026).

Os dados utilizados são provenientes do QUALAR, sistema da CETESB que disponibiliza informações de poluentes atmosféricos e meteorológicos (QUALAR, 2025). Foram empregadas as médias diárias dos parâmetros MP₁₀, MP_{2,5}, O₃, NO, NO₂, NO_x, temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento, pressão atmosférica e radiação solar



global, referentes ao período de 01/01/2016 a 31/12/2025, da estação de monitoramento do Parque Dom Pedro II, localizada no centro de São Paulo.

Para o tratamento dos dados, foi utilizado a Análise de Correlação Canônica (ACC), onde os dados coletados são relacionados e interpretados por meio de suas correlações entre as variáveis (DARÇIN, 2014). O método consiste em encontrar combinações lineares entre dois grupos de variáveis que maximizam a correlação entre eles (WILKS, 2020). Sejam $X = (X_1, X_2, \dots, X_p)$ o conjunto de variáveis meteorológicas e $Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_q)$ o conjunto de variáveis poluentes. A ACC busca os vetores $a = (a_1, a_2, \dots, a_p)'$ e $b = (b_1, b_2, \dots, b_q)'$ que maximizam a correlação entre as combinações lineares:

$$\text{Eq. 1: } U = a'X = a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_pX_p$$

$$\text{Eq. 2: } V = b'Y = b_1Y_1 + b_2Y_2 + \dots + b_qY_q$$

A correlação canônica ρ entre U e V é dada por:

$$\text{Eq. 3: } \rho = \frac{\text{Cov}(U,V)}{\sqrt{\text{Var}(U) \cdot \text{Var}(V)}}$$

O software R (R CORE TEAM, 2026) foi utilizado como ferramenta para as análises estatísticas devido sua facilidade de visualização e interpretação de grandes conjuntos de dados.

Resultados e Discussão

A partir do uso do software R, a ACC foi aplicada ao conjunto de dados da estação Parque Dom Pedro II. A Tabela 1 apresenta as Variáveis Canônicas (VCs) e os respectivos Coeficientes Canônicos (CCs) para os dois primeiros pares canônicos extraídos, que se mostraram estatisticamente significativos.

Tabela 1 - Variáveis Canônicas e Coeficientes Canônicos da estação do Parque Dom Pedro II

	1ª VC	2ª VC
MP ₁₀	-0,0528 (-0,9491)	0,0199 (0,2952)
MP _{2,5}	0,0247 (-0,8794)	0,0271 (0,2879)
O ₃	-0,0236 (-0,3135)	-0,0654 (-0,9188)
NO	0,1079 (-0,6354)	-0,1026 (0,528)
NO ₂	0,0572 (-0,7753)	-0,091 (0,3884)
NO _x	-0,1363 (-0,7213)	0,1297 (0,2443)
Temperatura	-0,05 (-0,4309)	-0,1316 (-0,7045)



Umidade	0,0825 (0,9216)	-0,0355 (0,1932)
Pressão Atmosférica	0,9683 (0,4319)	-1,0255 (-0,4807)
Radiação Solar Global	-0,0141 (0,0208)	-0,0044 (0,5045)
Velocidade do Vento	0,0015 (-0,443)	-0,009 (-0,7992)
% Variância Explicada	55,10	32,46

Nota: Os valores fora dos parênteses representam as Variáveis Canônicas (VCs) e os valores entre parênteses representam os Coeficientes Canônicos (CCs). Em **negrito**, os CCs com valor $\geq 0,500$.

A análise da ACC permitiu sintetizar as interrelações entre os dois conjuntos de dados em poucas dimensões, atuando como uma ferramenta de redução de dimensionalidade. As correlações canônicas extraídas indicam que a 1ª Variável Canônica é responsável por 55,10% da variabilidade total da relação entre os grupos, enquanto a 2ª Variável Canônica explica 32,46%. Coletivamente, essas duas primeiras VCs acumulam 87,56% da covariância entre os fenômenos meteorológicos e as concentrações de poluentes, sendo, portanto, mais que suficientes para representar a dinâmica estudada. As demais VCs contribuem com parcelas marginais (3ª VC: 9,40%; 4ª VC: 2,17%; 5ª VC: 0,87%), reforçando a eficiência da ACC em reduzir a dimensionalidade dos dados sem perda significativa de informação.

A 1ª VC apresenta correlação forte entre os poluentes MP_{10} , $MP_{2,5}$, NO, NO_2 e NO_x com a umidade, permitindo a identificação de um cenário de deposição úmida. Os óxidos de nitrogênio são poluentes emitidos principalmente por queima de combustíveis fósseis, tornando-se precursores dos materiais particulados, que são poluentes secundários. Os CCs com sinais opostos entre determinados poluentes e variáveis meteorológicas indicam relações inversas. O coeficiente positivo da umidade contrasta com os coeficientes negativos dos MPs e NO_x , confirmando que aumentos da umidade estão associados à redução desses poluentes por deposição úmida, onde o aumento da umidade do ar resulta na diminuição da concentração dos poluentes na atmosfera.

CASTELHANO et al. (2022), analisaram o impacto das mudanças meteorológicas de longo prazo na qualidade do ar no Brasil e identificaram que a precipitação e a umidade relativa desempenham um papel fundamental na remoção de material particulado da atmosfera, especialmente na região Sudeste. A deposição úmida, favorecida por altos índices de umidade e precipitação, é um dos principais mecanismos de remoção de aerossóis atmosféricos (SEINFELD; PANDIS, 2012).

A 2ª VC tem destaque nos poluentes O_3 e NO com a temperatura, radiação solar global e velocidade do vento. Isso afirma a presença da dinâmica fotoquímica em uma cidade urbana, onde o NO, que é proveniente de emissões de combustíveis fósseis utilizados por



veículos automotores, consome o O_3 presente na atmosfera, explicando seus coeficientes com sinais trocados. As variáveis meteorológicas de temperatura e radiação são agentes catalisadores dessas reações

SEINFELD e PANDIS (2012) descrevem que a formação de ozônio troposférico é dependente da disponibilidade de luz solar, temperatura e concentrações de precursores (NO_x e COVs). Em condições de alta temperatura e radiação solar, as reações fotoquímicas são aceleradas, favorecendo a produção de O_3 a partir de NO_2 . Por outro lado, em áreas com alta concentração de NO (como próximo a fontes veiculares), o O_3 é rapidamente consumido.

ALADAG (2023), em estudo realizado na Turquia, identificou que a temperatura mínima diária e a velocidade do vento são os parâmetros meteorológicos com maior correlação com a qualidade do ar. Foi observado que temperaturas mais baixas estão associadas ao aumento do consumo de combustíveis para aquecimento, elevando as concentrações de poluentes. Já SONG et al. (2020) demonstraram que a temperatura apresenta correlação negativa com o IQAr, ou seja, dias mais quentes tendem a ter melhor qualidade do ar devido ao aumento da convecção atmosférica e à maior dispersão vertical dos poluentes.

CASTELHANO et al. (2022) destacaram que o vento é um fator determinante na dispersão de poluentes, especialmente em regiões com topografia favorável. Em São Paulo, a velocidade do vento influencia tanto a dispersão dos poluentes primários quanto a formação fotoquímica de ozônio, uma vez que ventos mais fortes podem transportar precursores para regiões mais distantes, onde ocorre a formação secundária de poluentes (YNOUE et al., 2017).

Conclusão

Este estudo avaliou a influência de variáveis meteorológicas nas concentrações de poluentes em São Paulo por meio da Análise de Correlação Canônica (ACC). Os resultados revelaram dois processos principais que regem a qualidade do ar na cidade: a deposição úmida, responsável por 55,10% da variabilidade explicada (1ª VC), onde o aumento da umidade reduz as concentrações de MP_{10} , $MP_{2,5}$, NO, NO_2 e NO_x ; e a química fotoquímica, que responde por 32,46% da variabilidade (2ª VC), na qual O_3 e NO apresentam correlações opostas mediadas por temperatura, radiação solar e vento, comportamento típico de centros urbanos com intensa frota veicular.

A ACC mostrou-se uma ferramenta estatística robusta para identificar relações entre variáveis meteorológicas e poluentes, reduzindo a dimensionalidade dos dados sem perda



significativa de informação. Como implicação prática, políticas de controle de emissões devem considerar as condições meteorológicas, especialmente em períodos de baixa umidade e alta radiação solar, quando a formação fotoquímica de O_3 é mais intensa.

Para estudos futuros, recomenda-se a aplicação da ACC em diferentes estações de monitoramento da região metropolitana de São Paulo, a inclusão de variáveis como direção do vento e sazonalidade, e a combinação com modelos de previsão de qualidade do ar.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao LAMOAM, ao MonitoAr, ao PIBIC/CNPq e à FT/UNICAMP pelo suporte técnico, financeiro e institucional que viabilizaram a execução deste estudo.

Referências

- ALADAG, E. The influence of meteorological factors on air quality in the province of Van, Turkey. *Water, Air, & Soil Pollution*, v. 234, n. 259, 2023. DOI: 10.1007/s11270-023-06265-0.
- CASTELHANO, F. J. et al. The impact of long-term weather changes on air quality in Brazil. *Atmospheric Environment*, v. 283, p. 119182, 2022. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2022.119182.
- CETESB. Emissão Veicular. 2023. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/veicular/relatorios-e-publicacoes/>> Acesso em: 9 de maio de 2026.
- CETESB. Qualidade de ar no Estado de São Paulo. 2026. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/ar/>> Acesso em: 9 de maio de 2026.
- DARÇIN, M. Association between air quality and quality of life. *Environ. Sci. Pollut. Res.* v. 21, p. 1954-1959, 2014
- HARTMAN, Sarah. Grey relational analysis and canonical correlation analysis of air pollution in three Kentucky counties. 2024. Dissertação (Mestrado) – Western Kentucky University, Kentucky, 2024. Disponível em: <<https://digitalcommons.wku.edu/theses/3715>>. Acesso em: 14 de maio de 2025.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sp/sao-paulo.html>> Acesso em: 9 de maio de 2026.
- QUALAR (Base de dados CETESB). Publicações e relatórios, São Paulo. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/ar/qualar/>> Acesso em: 3 de maio de 2025.
- R Core Team (2026). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>.
- SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. ***Atmospheric Chemistry and Physics***: from air pollution to climate change. 3. ed. New York: Wiley, 2012.
- SHIHAB, A. S. Investigating the Relationship between Air Pollutants and Meteorology: A Canonical Correlation Analysis. *Pol. J. Environ. Stud.*, v. 31 (6), p. 5841-5849, 2022. DOI: 10.15244/pjoes/151908
- SONG, Z.; DENG, Q.; REN, Z. Correlation and principal component regression analysis for studying air quality and meteorological elements in Wuhan, China. ***Environmental Progress & Sustainable Energy***, v. 39, n. 4, p. e13278, 2020.
- SOUZA, A. O. de; AMORIM, D. J.; PINTO, E. Correlation Analysis Between Physical-Chemical and Biological Conditions in the River and the Incidence of Diseases in the City of Piracicaba, Brazil. *Toxics*, v. 13, n. 5, p. 359, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxics13050359>.
- WILKS D.S. Statistical methods in the atmospheric sciences. 4th ed., Academic Press, New York, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2017-0-03921-6>
- YNOUE, R. Y., REBOITA, M. S., AMBRIZZI, T., & SILVA, G. A. M. Meteorologia: noções básicas. Oficina de Textos, 2017.