TEORIA DAS SEQUÊNCIAS APLICADA EM EPISÓDIOS DE ALTA CONCENTRAÇÃO DE MATERIAL PARTICULADO ATMOSFÉRICO

Palavras-Chave: Material Particulado, Poluição do Ar, Teoria dos Runs, Qualidade do Ar.

Autores(as):

Felipe Daniel de Souza, FT - UNICAMP

Profª Drª Simone Andréa Pozza (Orientadora), FT - UNICAMP

Dr. Danilo Covaes Nogarotto (Coorientador), FT - UNICAMP

INTRODUÇÃO:

A poluição do ar é uma ameaça grave à saúde das pessoas e à realização do desenvolvimento sustentável (VORMITTAG *et al.*, 2021), estima-se que a poluição atmosférica contribua para pelo menos 7 milhões de mortes prematuras por ano em todo o mundo (WHO, 2024). O Material Particulado (MP), abrange uma variedade de partículas sólidas e líquidas suspensas no ar e é considerado um dos poluentes mais nocivos. Classificado com base no diâmetro das partículas, sendo as MP_{10} aquelas com tamanho igual ou inferior a 10 micrômetros (µm) e as $MP_{2,5}$, menores que 2,5 µm (CETESB, 2025a).

São encontrados diversos estudos na literatura sobre o tema de episódios de altas concentrações de MP: Çapraz e Deniz (2020) em Istambul, Boari *et al.* (2023) no sudeste brasileiro, Othman (2022) no sudoeste da Ásia e Nogarotto *et al.* (2021) no interior do Brasil. Este fato confirma a grande relevância mundial do estudo sobre MP e seus episódios de altas concentrações.

Yevjevich (1967) introduziu a Teoria das Sequências (*Theory of Runs*) como uma ferramenta para caracterizar secas. Um "*run"* define-se como uma sequência de valores que atendem a determinados parâmetros e o comprimento do "*run*" como a quantidade consecutiva desses valores. A Teoria permite identificar episódios de seca a partir de valores de vazão abaixo do limite escolhido, bem como caracterizar o episódio em termos de severidade e duração. Posteriormente, diversos estudos aplicaram a Teoria das Sequências: Almeida e Barbosa (2020) no estudo do Rio Camanducaia (MG), Wang *et al.* (2020) na China e Ismael e Awichi (2024) no Iraque.

Visto a eficácia comprovada da Teoria da Sequências, o objetivo principal do estudo foi a adaptação da Teoria para analisar o inverso, valores acima de um limite determinado, identificando dias com concentração de MP acima dos parâmetros estabelecidos. Assim, identificando episódios de alta concentração, caracterizando-os em termos de duração e intensidade.

METODOLOGIA:

Os dados utilizados nesta pesquisa foram obtidos por meio do acesso ao Sistema de Qualidade do Ar (Qualar), mantido pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2025b). A área de estudo foi a cidade de São Paulo e foram escolhidas 17 estações de monitoramento de material particulado (**Figura 1**). Foram obtidos valores de concentrações horárias de MP_{10} e $MP_{2,5}$ abrangendo os anos de 2015 a 2022, então foram organizados em planilhas de médias diárias utilizando o Microsoft Excel.

Figura 1: Localização das estações da CETESB que monitoram MP na cidade de São Paulo.
Fonte: GONÇALVES *et al.*, 2025.

Analisou-se a quantidade de dados faltantes e adotaram-se os seguintes critérios: caso mais de 25% dos dados estivessem ausentes em determinado ano, ele foi excluído da análise devido ao funcionamento inadequado da estação. Além disso, estações que, em vários anos, ultrapassaram o critério anterior, foram removidas totalmente do estudo. A aplicação da Teoria das Sequências foi realizada no programa R (R Core Team, 2024), foram adaptadas as equações baseadas no estudo de Almeida e Barbosa (2020).

Seja Q_0 o nível limite de uma alta concentração, ou seja, concentrações $Q(t)$ acima de Q_0 são consideradas episódios de alta concentração $(Q(t) > Q_0)$. Quando o nível limite (Q_0) é aplicado numa série temporal, uma amostra contendo múltiplos eventos de altas concentrações é gerado, onde cada evento é caracterizado pela severidade (S_k) e duração (D_k). Para $Q(t) > Q_0$, a duração do episódio de alta concentração é calculada pela Eq. 1.

$$D_k = \sum_{t=t_{inicial,k}}^{t_{final,k}} \Delta t \qquad (1)$$

onde, D_k é a duração do k-*ésimo* episódio de alta concentração, $t_{inicial,k}$ e $t_{final,k}$ são os tempos iniciais e finais do k-*ésimo* episódio e Δt é o período (quantidade de dias).

Para $Q(t) > Q_0$, a severidade (S_k) do episódio de alta concentração é calculada pela Eq. 2.

$$S_k = \sum_{t_{inicial,k}}^{t_{final,k}} [Q(t) - Q_0] \cdot \Delta t \qquad (2)$$

onde, (S_k) é a severidade do k-*ésimo* episódio de alta concentração, $t_{inicial,k}$ e $t_{final,k}$ são os tempos iniciais e finais do k-*ésimo* episódio, $Q(t)$ é a concentração no tempo t, Q_0 é nível limite para os eventos de altas concentrações e Δt é o período (quantidade de dias).

Contudo, as séries foram então submetidas a uma interpolação de dados, com o objetivo de preencher as lacunas dos valores ausentes. Para isso foi utilizada a função *na_interpolation ()* do pacote *imputeTS* (MORITZ e BARTZ-BEIELSTEIN, 2017). Foram obtidos três tipos de resultados, sendo eles: valor total de concentração acima do nível limite do episódio (severidade do episódio), quantidade de dias que o episódio durou (duração do episódio) e data inicial do episódio.

Os Padrões Finais (PF) definidos pela Resolução CONAMA nº 506/2024 (BRASIL, 2024) estabelecem os limites mais rigorosos para a qualidade do ar, com média diária de 45 µg/m³ para MP_{10}

e 15 µg/m³ para $MP_{2,5}$, alinhados às diretrizes da Organização Mundial da Saúde (OPAS, 2021). Apesar disso, a CETESB ainda utiliza os limites de 50 µg/m³ para MP_{10} e 25 µg/m³ para $MP_{2,5}$ definidos pela antiga Resolução CONAMA nº 491/2018 (BRASIL, 2018) e ainda vigentes em São Paulo, conforme o Decreto Estadual nº 59.113/2013 (SÃO PAULO, 2013). Neste estudo, para definição dos episódios de alta concentração, foram utilizados os PFs adotados pela Resolução CONAMA mais recente (45 e 15 µg/m³). A União Europeia (2008) adota os mesmos limites da CETESB para MP_{10} e $MP_{2,5}$ (50 e 25 µg/m³ respectivamente), enquanto Coreia do Sul (100 e 50 µg/m³) e EUA (150 e 35 µg/m³) têm padrões ainda mais permissivos para MP_{10} e $MP_{2,5}$, respectivamente (KECO, 2023; US EPA, 2024). Esses valores acima dos limites da OMS reforçam a importância de políticas mais rígidas para proteger a saúde pública.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

A partir das médias de ultrapassagem diária registradas em cada episódio de alta concentração, calculou-se a média aritmética geral para cada estação. Com esses valores, elaboraram-se as Tabelas 1 e 2 ordenadas de forma decrescente em relação à ultrapassagem média diária.

Tabela 1: *Ranking* das estações de MP_{10}. **Fonte:** Autoral, 2025.

Estações MP_{10} (zona SP)	Contagem de Episódios	Período de Funcionamento (anos)	Episódios por Ano	Médias por episódio	
				Duração (dias)	Ultrapassagem Diária (µg/m³)
Grajaú-Parelheiros (ZS)	244	2015-2022 (8)	30,50	2,83	16,49
Itaim Paulista (ZL)	160	2015-2022 (8)	20,00	2,54	12,38
Marginal Tietê (ZO)	194	2015-2022 (8)	24,25	2,80	12,07
Perus (ZN)	61	2020-2022 (3)	20,33	2,82	10,89
Parque D. Pedro II (C)	144	2015-2022 (8)	18,00	2,63	10,87
Santo Amaro (ZS)	105	2015-2018, 2020-2022 (7)	13,13	2,49	10,14
Capão Redondo (ZS)	127	2015-2022 (8)	15,88	2,28	10,13
Congonhas (ZS)	135	2015-2022 (8)	16,88	2,51	8,85
N. Senhora do Ó (ZN)	109	2015-2022 (8)	13,63	2,52	8,52
Interlagos (ZS)	90	2015-2018, 2020-2022 (7)	11,25	2,03	7,91
Mooca (ZL)	41	2015-2017 (3)	13,67	3,12	7,91
Cerqueira César (ZO)	102	2015-2022 (8)	12,75	2,23	7,34
Média Final	**126**		**17,52**	**2,57**	**10,29**

Legenda: ZN (Zona Norte), ZS (Zona Sul), ZO (Zona Oeste), ZL (Zona Leste) e C (Centro).
Nota: Em vermelho estão os valores acima da média final correspondente.

Tabela 2: *Ranking* das estações de $MP_{2,5}$. **Fonte:** Autoral, 2025.

Estações $MP_{2,5}$ (zona SP)	Contagem de Episódios	Período de Funcionamento (anos)	Episódios por Ano	Médias por episódio	
				Duração (dias)	Ultrapassagem Diária (µg/m³)
Marginal Tietê (ZO)	387	2015-2022 (8)	48,38	4,31	7,35
Grajaú-Parelheiros (ZS)	381	2015-2022 (8)	47,63	3,54	7,21
Itaim Paulista (ZL)	216	2017-2022 (6)	36,00	4,57	7,14
Parque D. Pedro II (C)	262	2017-2022 (6)	43,67	3,77	6,10
Mooca (ZL)	197	2018-2022 (5)	39,40	4,11	5,75
Santana (ZN)	223	2018-2022 (5)	44,60	3,67	5,58
Congonhas (ZS)	375	2015-2022 (8)	46,88	4,30	5,52
Perus (ZN)	121	2020-2022 (3)	40,33	3,40	5,51
Cid. Univ. USP-Ipen (ZO)	320	2015-2022 (8)	40,00	3,31	5,49
Ibirapuera (ZS)	291	2015-2020, 2022 (7)	41,57	3,66	4,62
Pico do Jaraguá (ZN)	231	2017-2022 (6)	38,50	3,05	4,23
Média Final	**273**		**42,45**	**3,79**	**5,86**

Legenda: ZN (Zona Norte), ZS (Zona Sul), ZO (Zona Oeste), ZL (Zona Leste) e C (Centro).
Nota: Em vermelho estão os valores acima da média final correspondente.

Nota-se que, em média, ocorreram 126 episódios durante os anos de 2015 a 2022 nas estações de monitoramento de MP_{10} analisadas, ou seja, foram em média 15 episódios por ano. Além disso, cada episódio durou, em média, 2,57 dias, e ultrapassou 10,29 µg/m³, 22,9% acima do limite para MP_{10}.

Já em relação aos resultados do $MP_{2,5}$, ocorreram em média 273 episódios, quase 34 episódios por ano. Ainda, cada episódio durou 3,79 dias e ultrapassou cerca de 5,86 µg/m³, aproximadamente 39% acima do limite para $MP_{2,5}$. A análise relativa entre os limites do $MP_{2,5}$ e as ultrapassagens da Tabela 2, bem como as demais médias, são valores notavelmente mais altos quando comparados aos da Tabela 1. A Tabela 3 apresenta os piores episódios (maior severidade) das estações que tiveram os valores de ultrapassagem acima da média final nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 3: Episódios com piores severidades referentes às estações com maiores ultrapassagens médias diárias.

Estações		Data Inicial	Intensidade (µg/m³)	Duração (dias)	Média Diária de Ultrapassagem (µg/m³)	Porcentagem de Ultrapassagem
Tipo	Nome					
MP_{10}	Grajaú Parelheiros	20/06/2018	643,50	14	45,96	102,13%
	Itaim Paulista	13/07/2018	433,25	9	48,14	106,98%
	Marginal Tietê	17/08/2021	503,03	10	50,3	111,78%
	Perus	18/08/2021	433,67	9	48,19	107,09%
	Parque D. Pedro II	22/07/2022	211,58	7	30,23	67,18%
$MP_{2,5}$	Marginal Tietê	02/09/2017	666,08	35	19,03	126,87%
	Grajaú Parelheiros	27/07/2015	436,43	24	18,18	121,20%
	Itaim Paulista	02/09/2017	479,97	27	17,78	118,53%
	Parque D. Pedro II	19/06/2018	459,74	21	21,89	145,93%

Fonte: Autoral, 2025.

Observa-se como todos os casos são de longa duração e alta severidade, a estação Marginal Tietê-Ponte Remédios possui o episódio mais intenso da Tabela 3, com 666,08 µg/m³ de severidade, durando 35 dias, e ultrapassando em média 19,03 µg/m³. Localizada na zona oeste de São Paulo, a estação fica distante cerca de 15 m da Marginal Tietê, que possui tráfego intenso, fator que impacta diretamente nos valores monitorados na estação (CETESB, 2025c).

CONCLUSÕES:

A aplicação da Teoria dos Runs mostrou-se uma abordagem inovadora para identificar e caracterizar episódios de alta concentração de MP em São Paulo. A metodologia revelou ultrapassagens significativas dos limites, especialmente na estação Marginal Tietê-Ponte Remédios. Os resultados destacam a necessidade de políticas ambientais mais rígidas e mostram o potencial da Teoria dos Runs em estudos sobre poluição e saúde ambiental.

BIBLIOGRAFIA

ALMEIDA, Rogério de; BARBOSA, Paulo Sérgio Franco. Simulation of the occurrence of drought events via copulas. **RBRH**, v. 25, p. e11, 2020. DOI: https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020180182

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, edição 223, seção 1, página 155, 21 nov. 2018. Disponível em: https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-n-491-de-19-de-novembro-de-2018-51058603 Acesso em 12 jul. 2025.

BRASIL, CONAMA. **Resolução nº 506, de 5 de julho de 2024**. Estabelece padrões nacionais de qualidade do ar e fornece diretrizes para sua aplicação. Diário Oficial da União, Brasília, edição: 130, seção: 1, página: 133, 09 de jul. 2024. Disponível em: https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-n-506-de-5-de-julho-de-2024-570885907 Acesso em: 4 jul. 2025.
BOARI, Arthur; PEDRUZZI, Rizzieri; VIEIRA-FILHO, Marcelo. Air pollution trends and exceedances: ozone and particulate matter outlook in Brazilian highly urbanized zones. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 195, n. 9, p. 1058, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/s10661-023-11654-3
ÇAPRAZ, Özkan; DENIZ, Ali. Particulate matter (PM 10 and PM 2.5) concentrations during a Saharan dust episode in Istanbul. **Air Quality, Atmosphere & Health**, v. 14, p. 109-116, 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/s11869-020-00917-4
CETESB, qualidade do ar, poluentes, 2025a. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/ar/poluentes/. Acesso em: 3 jul. 2025.
CETESB - Qualar, publicações e relatórios, 2025b. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/ar/publicacoes-relatorios/ Acesso em 11 jul. de 2025.
CETESB, qualidade do ar, indicadores, configuração da rede automática 2025c. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/ar/configuracao-da-rede-automatica/. Acesso em: 14 jul. 2025.
GONÇALVES, Priscila Boleta; NOGAROTO, Danilo Covaes; POZZA, Simone Andrea. **Análise espaço-temporal da concentração de MP10 no município de São Paulo (SP) – cenário 2015 a 2022**. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 33., 2025. Brasília: ABES, 2025. Disponível em: https://abes-dn.org.br/anaiseletronicos/33cbesa/161_tema_x.pdf
ISMAEL, Yaseen M.; AWCHI, Taymoor A. Meteorological Drought Analysis in Iraq using SPI and Theory of Runs for the Period 1980-2022. In: **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. IOP Publishing, 2024. p. 012063. DOI: 10.1088/1755-1315/1374/1/012063
KECO. **Air Quality Standards in Korea**. Korea Environment Corporation, 2023. Disponível em: https://www.keco.or.kr/en/index.do. Acesso em: 12 jul. 2025.
MORITZ, Steffen; BARTZ-BEIELSTEIN, Thomas. imputeTS: Time Series Missing Value Imputation in R. **The R Journal**, v. 9, n. 1, p. 207-218, 2017. doi:10.32614/RJ-2017-009. ISSN: 2073-4859.
NOGAROTTO, Danilo Covaes, SOUZA, Felipe Lima Campos de, RIBEIRO, Flávia Noronha Dutra, POZZA, Simone Andrea. Use of trajectory regression analysis to understand high-PM10 episodes: a case study in Limeira, Brazil. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 232, n. 10, p. 431, 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/s11270-021-05392-w
ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DA SAÚDE (OPAS). **Diretrizes globais de qualidade do ar da OMS**. Resumo executivo. Washington, D.C.: OPAS, 2021. DOI: https://doi.org/10.37774/9789275724613. ISBN: 978-92-75-72461-3 (PDF).
OTHMAN, Murnira et al. Spatial–temporal variability and health impact of particulate matter during a 2019–2020 biomass burning event in Southeast Asia. **Scientific reports**, v. 12, n. 1, p. 7630, 2022. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-022-11409-z
R Core Team (2024). A Language and Environment for Statistical Computing_. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponível em: https://www.R-project.org/
SÃO PAULO (Estado). **Decreto nº 59.113, de 23 de abril de 2013**. Estabelece novos padrões de qualidade do ar e dá providências correlatas. Diário Oficial do Estado de São Paulo, SP, 24 abr. 2013. Disponível em: https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/decreto/2013/decreto-59113-23.04.2013.html. Acesso em: 12 jul. 2025.
VORMITTAG, Evangelina da Motta PA de Araújo, CIRQUEIRA, Samirys Sara Rodrigues, NETO, Hélio Wicher, SALDIVA, Paulo Hilário N. Análise do monitoramento da qualidade do ar no Brasil. **Estudos Avançados**, v. 35, n. 102, p. 7-30, 2021. DOI: https://doi.org/10.1590/s0103-4014.2021.35102.002
WANG, Liping, ZHANG, Xingnan, WANG, Shufang, SALAHOU, Mohamed Khaled, FANG, Yuanhao. Analysis and application of drought characteristics based on theory of runs and copulas in Yunnan, Southwest China. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 17, n. 13, p. 4654, 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/ijerph17134654
WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Air Pollution - Health and Threats**. Geneva: WHO, 2024: Disponível em: https://www.who.int/health-topics/air-pollution**.** Acesso em: 2 jul. 2025.
YEVJEVICH, Vujica M. **An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts**. Fort Collins, CO, USA: Colorado State University, 1967.