



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgf>



Variabilidade na Qualidade do Ar: Uma Abordagem Comparativa entre Zonas Urbana e Periurbana em Santarém, Pará

Domingas de Oliveira Almeida¹, Ana Carla dos Santos Gomes², Sarah Suely Alves Batalha³, Glaucete Vitor da Silva⁴,
Tiago Bentes Mandú⁵, Raphael Pablo Tapajos Silva⁶, Adriane dos Santos Raiol⁷, Edson Agnaldo Imbelloni Martins⁸,
Gisele Silva Dias⁹

¹ Programa de Pós – Graduação em Recursos Naturais da Amazônia, Universidade Federal do Oeste do Pará, CEP 68038-070, Santarém, Pará, Brasil; e-mail: 99domingas@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7228-7982>; ²Doutora em Ciências Climáticas, docente do curso de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal do Oeste do Pará, CEP 68035-110, Santarém, Pará, Brasil, e-mail: ana.gomes@ufopa.edu.br, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7499-8342>; ³Escola de Ensino Técnico do Estado do Pará Francisco Coimbra Lobato - EETEPA Santarém. Av Eng. Fernando Guilhon s/n, Santarém-Pará, Brasil, CEP 68035-000, Santarém, Pará, Brasil, e-mail: sarah.batalha@docente.sectet.pa.gov.br, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5153-2379>; ⁴Programa de Pós-Graduação em Ciências da Sociedade / Instituto de Formação interdisciplinar e Intercultural, Universidade Federal do Oeste do Pará- UFOPA, CEP 68035-110, e-mail: glaucete.silva@ufopa.edu.br, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7505-2898>; ⁵Mestre em meteorologia, Doutorando em Meteorologia pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE (SP), CEP 12630-000, Cachoeira Paulista, São Paulo, Brasil, e-mail: tiagobentes1@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5049-2099>; ⁶Doutor em Sociedade, Natureza e Desenvolvimento, docente do curso de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal do Oeste do Pará, CEP 68040-255, Santarém, Pará, Brasil, e-mail: raphael.silva@ufopa.edu.br, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9621-9733>; ⁷Discente do curso de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal do Oeste do Pará, CEP 68040-255, Santarém, Pará, Brasil, e-mail: adrianeraiol99@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5973-028X>; ⁸Discente do curso de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal do Oeste do Pará, CEP 68040-255, Santarém, Pará, Brasil, e-mail: edson21imbelloni@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4165-2174>; ⁹Discente do curso de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal do Oeste do Pará, CEP 68040-255, Santarém, Pará, Brasil, CEP: 68040-040, e-mail: gihselesilvadias@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2508-0525>.

Artigo recebido em 29/02/2024 e aceito em 30/10/2024

RESUMO

Na Amazônia brasileira, o desmatamento por queimadas gera alta poluição atmosférica, similar à das indústrias, especialmente em áreas urbanas de países em desenvolvimento, excedendo limites para manter a qualidade do ar em condições agradáveis para a população. Diante do exposto, este estudo tem como objetivo analisar a qualidade do ar em uma área urbana e outra periurbana do município de Santarém/PA, no período de janeiro a junho de 2023, por meio de uma comparação detalhada entre as duas localidades, buscando identificar diferenças nos níveis de poluentes atmosféricos. Os dados utilizados são provenientes do bairro Maracanã localizado na região urbana e da comunidade São Pedro que fica localizada mais afastada da região urbana de Santarém. Os sensores de baixo custo AM2302 e SDS011 foram utilizados para captar os registros de temperatura e umidade e material particulado fino (PM_{2.5}), respectivamente, que foram processados no software Rstudio versão 4.4.1 para análise estatística. Comparando as médias horárias, a área periurbana teve maior média registrada. O coeficiente de correlação de Pearson mostra uma relação significativa ($p < 0,05$) entre temperatura, umidade e PM_{2.5} em ambas as localidades. Em junho, foi observada uma correlação moderada entre temperatura e concentrações de PM_{2.5}, tanto na área urbana ($r = 0,626$) quanto na periurbana ($r = 0,583$), indicando a influência das variáveis meteorológicas nos níveis de PM_{2.5}. A área urbana apresentou o maior risco relativo comparado à periurbana. Este estudo amplia a compreensão da qualidade do ar em regiões com diferentes características, que podem auxiliar em estratégias de gestão ambiental.

Palavras-chave: Poluição atmosférica. Material Particulado. Correlação de Pearson.

Variability in Air Quality: A Comparative Approach Between Urban and Peri-urban areas in Santarém, Pará, Brazil

ABSTRACT

In the Brazilian Amazon, deforestation through burning leads to high levels of atmospheric pollution, similar to industrial pollution, particularly in urban areas of developing countries, and often exceeding the limits necessary to maintain air quality at levels safe and comfortable for the population. In light of this, the present study aims to analyze air quality in an urban and a peri-urban area of the municipality of Santarém/PA, from January to June 2023, through a detailed comparison between these two locations, seeking to identify differences in air pollutant levels. Data were collected from the Maracanã neighborhood in the urban region and the São Pedro community, which is situated farther from the urban center of Santarém. Low-cost sensors AM2302 and SDS011 were used to record temperature, humidity, and fine

particulate matter (PM_{2.5}), respectively; these data were processed in RStudio version 4.4.1 for statistical analysis. Comparing the hourly averages, the peri-urban area recorded the highest average values. Pearson's correlation coefficient showed a significant relationship ($p < 0.05$) between temperature, humidity, and PM_{2.5} in both locations. In June, a moderate correlation was observed between temperature and PM_{2.5} concentrations, both in the urban area ($r = 0.626$) and in the peri-urban area ($r = 0.583$), indicating the influence of meteorological variables on PM_{2.5} levels. The urban area exhibited the highest relative risk compared to the peri-urban area. This study enhances the understanding of air quality in regions with different characteristics, which can support environmental management strategies.

Keywords: Atmospheric pollution. Particulate matter. Pearson correlation.

Introdução

A maior parte da população mundial ainda está exposta a níveis de poluição do ar que excedem as Diretrizes de Qualidade do Ar estabelecidas pela Organização Mundial da Saúde (OMS) (Shaddick et al., 2020). De acordo com a OMS a qualidade do ar está intrinsecamente ligada às condições climáticas e aos ecossistemas marinhos e terrestres globais (WHO, 2021). Os principais geradores de poluição atmosférica, como a queima de combustíveis fósseis, também contribuem para a emissão de gases de efeito estufa, que afetam diretamente as condições atmosféricas em escala regional e global (Adedeji et al., 2020). Segundo Maji et al. (2020), a presença de poluentes no ar é um fator de risco para a saúde humana e responsável pela ocorrência e agravamento de um amplo espectro de enfermidades agudas e crônicas, como doenças pulmonares e cardiovasculares.

A exposição à poluição do ar, refletida pelos níveis de concentração de PM_{2.5}, está fortemente relacionada ao aumento das internações hospitalares devido a problemas de saúde respiratórios, com efeitos mais pronunciados em crianças e idosos, apresentando um crescimento não linear conforme os níveis de poluição aumentam (Rocha & Santa'nna, 2022).

O PM_{2.5}, é amplamente reconhecido na literatura médica por causar efeitos prejudiciais à saúde humana (Yang et al., 2022; Krittanawong et al., 2023). Dentre os principais impactos associados é documentado na literatura a contribuição para doenças pulmonares, cardiovasculares, acidentes vasculares cerebrais, propensão ao câncer e diabetes, além de influenciar o desenvolvimento fetal, a ocorrência de demência em adultos e alterações cognitivas em crianças (Assaf et al., 2019; Castillo et al., 2021; Xiao et al., 2021).

Estudo feito por Behera et al. (2024) identificou uma mudança nos padrões de doenças ao longo do tempo, evidenciando que, em 2019, as doenças não transmissíveis, como doença cardíaca isquêmica, doença pulmonar obstrutiva crônica e derrame, tornaram-se as principais causas de mortes relacionadas à poluição do ar, superando as

doenças transmissíveis, como infecções respiratórias e tuberculose.

Desde o início do século XXI, na literatura científica, tem sido registrada a associação entre as atividades humanas e os impactos na qualidade do ar, especialmente em populações que vivem em áreas urbanas (Chiquetto et al., 2021).

No âmbito econômico, os custos relacionados ao tratamento de doenças e à perda de produtividade resultam em encargos significativos para os sistemas de saúde e para a sociedade como um todo (Pandey et al., 2021).

Na região Amazônica, nas últimas décadas foi observado um aumento na deterioração da qualidade do ar, atribuído ao crescimento industrial, aumento da atividade de transporte terrestre, ocorrência de queimadas e infrações às leis de proteção ambiental (Gomes, 2020). A poluição do ar prejudica ecossistemas, contribuindo para a degradação da biodiversidade e dos recursos naturais (Moura et al., 2024).

As partículas inaláveis com diâmetro aerodinâmico de 2,5 micrômetros, notadamente PM_{2.5}, (do inglês *Particulate Matter*), destaca-se como o principal poluente nessa região devido à grande quantidade de fumaça gerada pelos incêndios florestais de grandes proporções. A qualidade do ar se deteriora, trazendo impactos negativos tanto para a biodiversidade quanto para a saúde das populações locais contribuindo para o agravamento da poluição atmosférica (Souza et al., 2020). A Fumaça gerada por esses incêndios contém partículas microscópicas, como sulfatos, nitratos, e fuligem, que podem ser transportadas a longas distâncias, tornando o ar que as pessoas respiram tóxico (WHO, 2021). Como já mencionado anteriormente, as partículas de PM_{2.5}, representam um risco à saúde pública, especialmente para as populações que vivem nas áreas mais afetadas pela poluição atmosférica (Villar, 2021), o PM_{2.5} gerado pelos incêndios pode influenciar diferentes áreas, dependendo das trajetórias das massas de ar (Costa et al., 2022).

O crescimento acentuado nas populações urbanas resulta em um aumento das atividades antropogênicas, como a queima de combustíveis fósseis para transporte, cozimento e aquecimento

de edifícios, eleva as concentrações de poluentes atmosféricos, como dióxido de enxofre, dióxido de nitrogênio, monóxido de carbono e material particulado fino (Torres et al., 2020). Esses poluentes têm um papel expressivo na má qualidade do ar em áreas urbanas, frequentemente levando a diversas condições de saúde, como as doenças respiratórias (Rocha & Santa'nna, 2022). Altas temperaturas associadas a Ilhas de Calor em áreas urbanas aumentam a mistura turbulenta, o que, por sua vez, eleva as partículas de ar a níveis atmosféricos mais altos (Ngarambe et al., 2021).

Estudo feito por Southerland et al. (2022) constatou que entre 2000 e 2019, a maioria da população urbana global residia em áreas com níveis insalubres de PM_{2.5}, resultando em contribuições significativas para as cargas de doenças não transmissíveis.

O monitoramento da qualidade do ar é crucial, pois avalia as concentrações de poluentes atmosféricos, gera informações acerca das atuais condições de qualidade do ar, estabelecendo um histórico de dados e capacita os responsáveis pela tomada de decisões a planejar estratégias e políticas públicas voltadas para assegurar limites e diretrizes para a qualidade do ar (Vormittag et al., 2021).

O uso de sensores de baixo custo, tem sido uma alternativa oferecendo uma solução acessível para avaliar a presença de poluentes, permitindo uma vigilância eficiente e abrangente da atmosfera, principalmente onde o monitoramento da qualidade do ar é reduzido (Chojer et al., 2020). O uso desses sensores tem se tornado cada vez mais importante para a proteção da população e de seus subgrupos mais vulneráveis, como crianças e idosos, uma vez que medidas de prevenção podem ajudar a evitar exposição excessiva, especialmente em eventos de alta concentração de poluentes, como incêndios florestais periurbanos e acidentes industriais (Gupta et al., 2018).

Redes de monitores de baixo custo têm o potencial de fornecer dados espaciais e temporais de alta resolução sobre poluentes atmosféricos monitorados, o que contribui para a compreensão da variabilidade e concentração de poluentes. Essas redes ampliam a capacidade de monitoramento, permitindo que os dados sejam coletados em maior frequência e em diversos pontos geográficos, além de oferecer uma solução mais acessível para

governos e instituições, possibilitando o monitoramento em larga escala (Liu et al., 2020).

A concentração de poluentes atmosféricos é influenciada não apenas pelas fontes de emissão, mas também pelas condições meteorológicas, de forma que as mudanças climáticas impactam diretamente os níveis de poluição do ar (Ingole et al., 2022). As variações climáticas têm o potencial de impactar fatores como precipitação, circulação atmosférica, temperatura, radiação solar e ventilação, afetando especialmente poluentes como o material particulado e o ozônio, que são particularmente sensíveis a essas mudanças (Kinney, 2021).

As elevadas temperaturas e a alta umidade na região amazônica durante o ano inteiro podem influenciar a concentração de PM_{2.5} nessa região. Por um lado, a maior volatilidade em temperaturas mais elevadas pode contribuir para a emissão e dispersão de partículas. Enquanto a umidade pode afetar diretamente a deposição dessas partículas, seja promovendo a precipitação ou agindo como um agente estabilizador. Em condições de estabilidade atmosférica, o efeito sinérgico de temperaturas mais elevadas e alto teor de umidade pode contribuir para a persistência dessas partículas no ar, aumentando os riscos para a qualidade do ar e a saúde respiratória (Ignotti et al., 2010; Oliveira et al., 2012).

De acordo com Shaddick et al. (2020), o problema da poluição atmosférica e a necessidade de soluções não se limitam às áreas urbanas. Em muitas regiões do mundo, grande parte da população que reside em áreas rurais também está exposta a níveis de poluentes que excedem as diretrizes estabelecidas pela OMS. Considerando a importância do monitoramento da qualidade do ar, que fornece dados essenciais para a elaboração de políticas públicas eficazes (Vormittag et al., 2021), e a relevância de soluções acessíveis, como o uso de sensores de baixo custo (Chojer et al., 2020). Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo analisar a qualidade do ar em uma área urbana e outra periurbana do município de Santarém/PA, no período de janeiro a junho de 2023, por meio de uma comparação detalhada entre as duas localidades, buscando identificar diferenças nos níveis de poluentes atmosféricos.

Material e métodos

Área de estudo

O município de Santarém localizado a Oeste do estado do Pará, região Norte do Brasil (Figura 1), está localizado às margens do lado direito do rio Tapajós, na confluência com o Rio Amazonas, tem uma área territorial de 17.898,389 km de extensão e uma população estimada de 331.937 pessoas, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022). Com coordenadas geográficas de 2°24'52" S e 54°42'36" W.

De acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger proposta em 1936 e atualizada por Peel et al. (2007), o clima em Santarém é caracterizado como Am, o que indica um clima tropical de monção, o qual se caracteriza pela presença de duas temporadas ao longo do ano: O período chuvoso e o período seco (Alvares et., 2013). Os maiores acumulados pluviométricos ocorrem entre os meses de dezembro e maio, associados ao regime chuvoso, enquanto os

menores valores são registrados entre junho e novembro, caracterizando o regime seco na região (Ferreira et al., 2020). A temperatura média anual é superior a 26°C.

A precipitação é modulada pela Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) nos meses de outono austral (Souza et al., 2005) e pela Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) durante o verão austral (Carvalho et al., 2004). Durante a transição entre o período chuvoso e o período seco, é comum a presença de Linhas de Instabilidade (LI), formadas pela circulação de brisa na faixa litorânea (Cohen et al., 1995).

A Figura 1 destaca as duas localidades em questão, delineando as distintas características de cada uma. O bairro Maracanã é caracterizado por uma predominância de construção de alvenaria e ruas asfaltadas e a comunidade São Pedro apresenta uma área mais densamente arborizada.

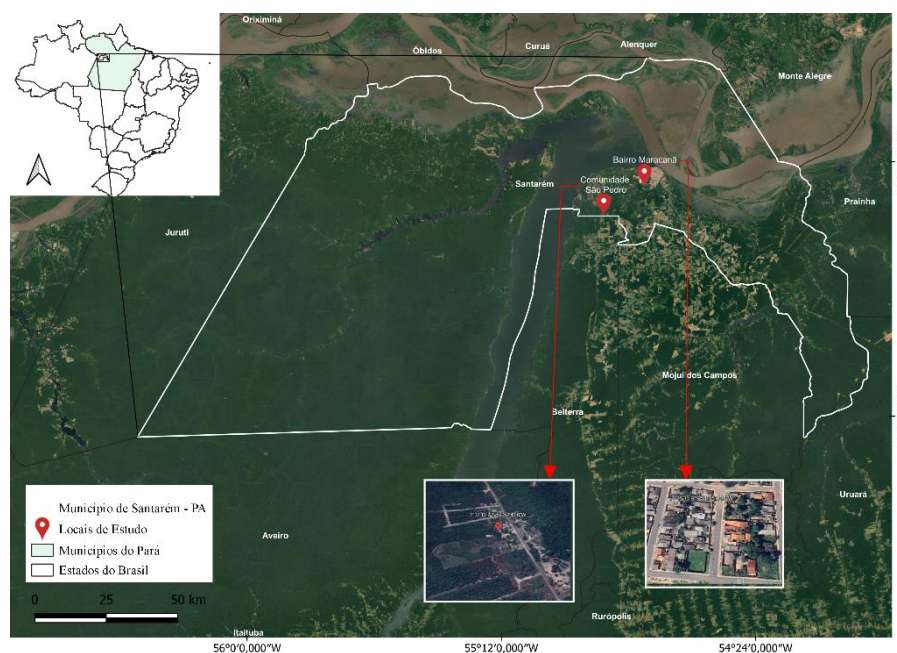


Figura 1. Localização do município de Santarém/PA e áreas de estudo.

Bairro Maracanã

O bairro Maracanã, situado às margens do rio Tapajós, apresenta coordenadas geográficas aproximadas de -2,44S de latitude e -54,74W de longitude, sendo impulsionado em seu desenvolvimento pela construção do shopping Rio

Tapajós, conforme destacado por Koch (2004), os Shopping Center têm a capacidade de desencadear uma reconfiguração na estrutura urbana, propiciando a valorização imobiliária nas localidades em que são implantados. Esse

fenômeno, por sua vez, favorece a reorganização de novas regiões dentro da cidade, resultando, de maneira subsequente, no processo de valorização dessas áreas. De acordo com o IBGE. (2010), a população residente no bairro é estimada em cerca de 3.695 mil habitantes, o que equivale a aproximadamente 1,20% do total de habitantes do município de Santarém.

Comunidade São Pedro

A comunidade São Pedro, Fundada em 20 de novembro de 1977, é composta por aproximadamente 90 famílias, cuja principal fonte de renda é a agricultura. Localizada nas imediações da vila Alter do Chão, a cerca de 25 km da região urbana de Santarém, o acesso se dá pela rodovia PA-457 (Almeida et al., 2023). As coordenadas geográficas do ponto em que o equipamento de monitoramento está instalado são aproximadamente $-2,54S$ de latitude e $-54,9W$ de longitude, situando a comunidade na área periurbana do município de Santarém.

Coleta de dados

A coleta de dados foi feita através do kit de monitoramento do Projeto Rede Piloto de Inovação no Monitoramento da Qualidade do Ar na Região Oeste do Pará - Cuidadores do Ar, através dos sensores de baixo custo AM2302 (Umidade e Temperatura) e SDS011 ($PM_{2.5}$). Como apresentado na Figura 2, em uma das laterais externas do compartimento, foram colocados o sensor AM2302, responsável pela medição de temperatura e umidade, e o sensor MQ-135, utilizado para a detecção de gases tóxicos. Um tubo de plástico foi adicionado ao equipamento, permitindo um fluxo contínuo de ar para o interior do compartimento, onde se encontra o sensor de

material particulado SDS011. Todos os sensores foram conectados à plataforma Arduino Uno, também posicionada no interior do compartimento, através de pequenos cabos condutores chamados jumpers. A rede de monitoramento do projeto compreende 25 pontos específicos destinados à coleta de dados. Iniciado em 2022, o projeto é financiado pela Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas (FAPESPA), vinculada à Universidade Federal do Oeste do Pará (UFOPA). Sua finalidade reside na contribuição para a elaboração de indicadores de qualidade do ar para o município de Santarém. Estes parâmetros foram escolhidos devido à sua relevância na avaliação da qualidade do ar e seus potenciais impactos. Como mencionado anteriormente os dados coletados para este estudo fazem referência ao período de janeiro a junho de 2023.

Conforme Silva e Vieira (2017) e Vormittag et al. (2021), a região Norte do Brasil enfrenta escassez de estações de monitoramento por agências governamentais, especialmente com equipamentos convencionais. Para efetuar o monitoramento, principalmente da concentração de material particulado, são exigidas estações de medição que empregam tecnologia avançada e complexa, acarretando em custos elevados (Silva et al., 2020). De acordo com Castell et al. (2017), esses equipamentos são grandes, pesados e caros, e a utilização de sensores de baixo custo pode ser uma alternativa para reduzir a carência de dados no monitoramento da poluição do ar, ampliando a cobertura espacial, especialmente em regiões remotas, onde o uso de equipamentos convencionais é mais desafiador. Os sensores são instalados fora da residência dos bolsistas do Projeto, em um local onde o fluxo de ar não é interrompido, e os sensores permanecem protegidos da chuva.

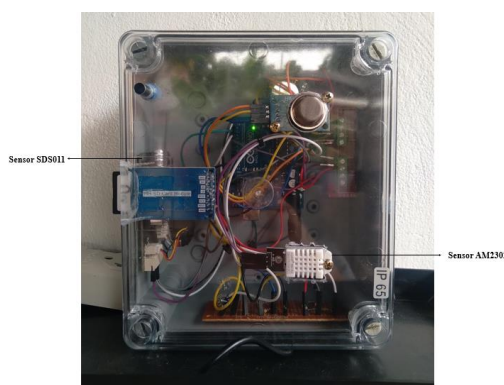


Figura 2. Kit de monitoramento da qualidade do ar do projeto Cuidadores do Ar.

Sensor SDS011 – Validação

Uma possível alternativa à abordagem convencional de monitorização da qualidade do ar envolve a aplicação frequente de sistemas de monitorização em tempo real, os quais fazem uso de sensores e plataformas de sensoriamento de baixo custo. O sensor SDS011 (Nova Fitness) tem sido amplamente utilizado em diversas partes do mundo. Conforme apontado por Božilov et al. (2022), em uma pesquisa que avaliou o desempenho do sensor SDS011, a experiência com o mesmo revelou-se positiva. A durabilidade e estabilidade excepcionais das leituras de material particulado (PM) em ambientes internos indicam o potencial do sensor para medir concentrações de PM_{2.5} com grande precisão, conforme também mencionado por Badura et al. (2018) e Liu et al. (2019).

Segundo a pesquisa realizada por Badura et al. (2018) sobre a avaliação de sensores de baixo

custo para monitoramento ambiental de PM_{2.5}, que envolveu a análise comparativa de quatro tipos de sensores (PM SDS011 da Nova Fitness, ZH03A da Winsen, PMS7003 da Plantower e OPC-N2 da Alphasense), além do analisador TEOM 1400a, os resultados indicaram que os sensores ópticos de PM geralmente seguem as variações de PM_{2.5} na atmosfera. No entanto, foram observados alguns picos temporários nos dados brutos de curto prazo. Destacou-se que o Sensor SDS011 (Nova Fitness) e o PMS7003 (Plantower) foram os mais precisos em termos de reprodutibilidade entre as unidades, o que se mostra como um recurso útil, especialmente em situações em que uma grande quantidade de sensores é utilizada.

Liu et al. (2019) ao examinar o desempenho do sensor SDS011 por 4 meses em Oslo, Noruega constatou que há potencial para estabelecer extensas redes de tais dispositivos, dada a relativa precisão, dimensão e custo dos sensores.

Sensor AM2302 ou DHT22 – Validação

O sensor de temperatura e umidade relativa do ar AM2302 (ou DHT22) é um componente eletrônico de alta precisão, projetado para conexão a microcontroladores de 8 bits de alta performance (Aosong, 2015).

Ao realizar um estudo sobre a avaliação de sensores de baixo custo, Araújo et al. (2020), constataram que o AM2302 apesar do baixo custo apresentou desempenho satisfatório. Os resultados da validação desse sensor por Ribeiro e Lameiras. (2021), indicaram que as precisões obtidas pelo sistema HIGROTERM foram bastante próximas às especificadas pelo fabricante do AM2302. As medições para temperatura variaram entre 0,4–0,6 °C, comparadas à precisão de 0,5 °C informada, enquanto para umidade relativa, os valores ficaram entre 0,3%–1,6%, em comparação com a precisão de 5% fornecida pelo fabricante. Os desvios padrão, por sua vez, estavam dentro da faixa de precisão declarada pelo fabricante, com valores entre 0–0,05 °C para temperatura e 0,06%–0,25% para umidade relativa.

De acordo com (Rasheed; Y., 2022), o módulo AM2302 utiliza comunicação serial, também conhecida como "comunicação de fio único". Em comparação com outros sensores, destaca-se pela facilidade de uso e pela excelente precisão.

Análise Estatística

A metodologia utilizada para o cálculo da correlação foi o coeficiente de correlação de Pearson, para investigar a relação linear do PM_{2.5} com a temperatura e umidade, assim como o tratamento dos dados foi utilizado o software livre Rstudio, versão 4.3.2. R é uma linguagem e ambiente de computação estatística amplamente utilizado para a criação de gráficos. Sendo de domínio público e de código aberto, o mesmo destaca-se como uma ferramenta abrangente e atual (Reisen & Silva, 2011).

O coeficiente de correlação é a verificação do grau de relação entre duas variáveis ou mais ligadas por uma relação estatística. Ele avalia tanto a intensidade quanto a direção de uma relação linear entre duas variáveis. A intensidade reflete o grau de associação entre duas variáveis, sendo que quanto mais próximo dos extremos do intervalo (-1 e +1), maior é a força da correlação. Em contrapartida, quando a pontuação se aproxima do centro do intervalo (zero), a correlação é considerada mais fraca.

Quanto à direção, ela está relacionada ao tipo de correlação. Uma correlação positiva ($r > 0$) indica que valores elevados de uma variável estão associados a valores elevados da outra variável. Por outro lado, uma correlação negativa sugere que valores elevados de uma variável coincidem com valores baixos da outra variável. A equação 1 é

utilizada para calcular o coeficiente de correlação de Pearson:

$$r = \frac{\sum (xi - \bar{X})(yi - \bar{Y})}{\sqrt{[\sum (xi - \bar{X})^2 (\sum yi - \bar{Y})^2]}} \quad (1)$$

Na expressão, $\bar{X}$ denota as variáveis independentes, enquanto $\bar{Y}$ representa as variáveis dependentes. Os termos xi e yi referem-se aos valores da i -ésima observação nas variáveis $\bar{X}$ e $\bar{Y}$, respectivamente. O quadro 1 mostra classificação do coeficiente sugerida por Dancey e Reidy (2006).

Quadro 1- Classificação de confiabilidade do coeficiente de Pearson.

Valor de +/- r	Interpretação
0	nula
0,10 a 0,30	Fraca
0,40 a 0,60	Moderado
0,70 a 0,90	Forte
1	Perfeita

Fonte: Adaptado de Dancey e Reidy (2006).

Com o objetivo de ajustar associações significativas entre os poluentes atmosféricos e as variáveis meteorológicas, como também estimar o risco relativo, utilizou-se a modelagem via equações de estimação generalizadas (*Generalized Estimating Equations – GEE*).

O método GEE foi proposto por Zeger e Liang (1986) e Liang e Zeger (1986) com a finalidade de estimar parâmetros de regressão especialmente quando os dados estão correlacionados. Os autores basearam-se nos Modelos Lineares Generalizados, incluindo uma estrutura de correlação entre as observações para a obtenção de estimativas consistentes e não viciadas.

Para o estudo em questão, verificou-se por meio da GEE o risco relativo. Para este fim considerou-se a distribuição Poisson, em que $\eta_{it} = \ln(\mu_{it}) = \beta_0 + \beta_1 X$, cuja interpretação da exponencial do parâmetro estimado representa o risco relativo. E o risco relativo se baseia na observação de que nem todos têm a mesma

probabilidade (risco) de sofrer um dano, mas que para alguns estes riscos (probabilidade) é maior do que para outros.

Segundo Agresti (1996) a definição do risco relativo é dada pela razão entre as probabilidades de sucesso de dois níveis da variável explicativa. E a fórmula do Risco Relativo é:

$$RR = \frac{\pi_1}{\pi_2}$$

Utilizou-se a estrutura para a matriz de correlação do tipo simétrica ou permutável, que assume, equação 2:

$$R(\alpha) = \begin{cases} 1_{set} = t', \\ \alpha_{set} \neq t'. \end{cases} \quad (2)$$

Esta deve ser usada quando se assume um modelo de efeitos aleatórios com intercepto aleatório para cada variável, como exemplificado em Lair e Ware (1982).

Resultados e discussão

A avaliação da média horária do $PM_{2.5}$ ao longo dos meses de janeiro a junho de 2023 no bairro Maracanã e na comunidade São Pedro mostra similaridade no comportamento horário médio. Observa-se que no intervalo compreendido entre as 10h00 e as 12h00, o bairro Maracanã manifesta um acréscimo na média que transcende a observada em São Pedro. Esse fenômeno pode ser atribuído ao aumento no fluxo de veículos automotores nesse período, caracterizado como horário de pico (Srimuruganandam & Nagendra, 2012).

Almeida, D. O., Gomes, A. C. S., Batalha, S. S. A., Silva, G. V., Mandú, T. B., Tapajos Silva, R. P. T., Raiol, A. S., Martins, E. A. I., Dias, G. S.;

Shelton et al. (2022) sugere que o aumento na gravidade e extensão do congestionamento veicular durante esses intervalos temporais resulta em uma amplificação na carga de poluentes atmosféricos, promovendo, consequentemente, a deterioração da qualidade do ar, especialmente na área urbana em proximidade a vias de grande circulação.

O aumento observado nas concentrações médias de $PM_{2.5}$ entre 17h00 e 23h00, e com um pico de aproximadamente 11 ($\mu g/m^3$) às 22h00 na comunidade de São Pedro como observado na

Figura 3, reflete o padrão descrito por Jang e Jung (2023). Esses autores observaram que as concentrações de $PM_{2.5}$ tendem a diminuir ao longo do dia, mas aumentam significativamente durante a noite e no início da manhã durante a estação chuvosa.

Vale ressaltar que as últimas diretrizes da qualidade do ar da OMS (2021) preconizam um limite de concentração média anual de 5 ($\mu g/m^3$) e média de 24 horas de 15 ($\mu g/m^3$) para o $PM_{2.5}$. Nesse contexto, as médias observadas em ambas as localidades estão dentro dos padrões estabelecidos.

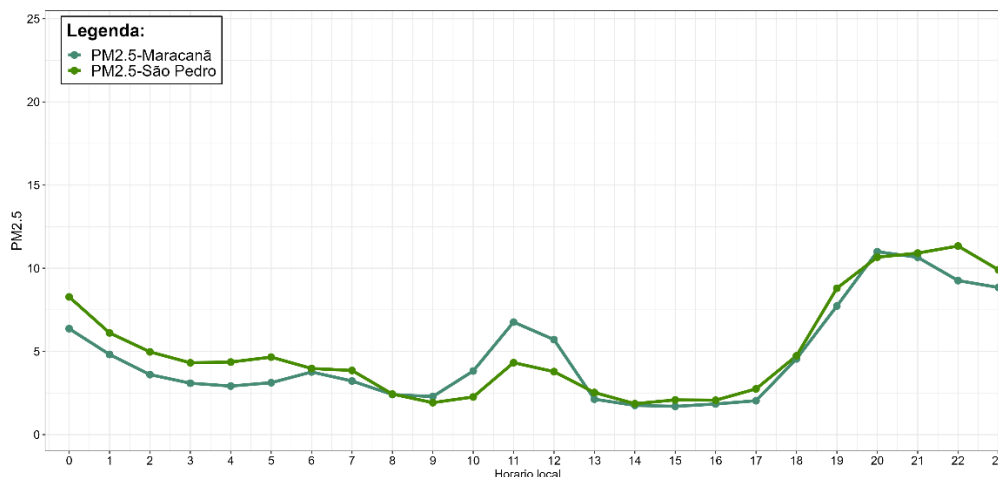


Figura 3. Média horária do $PM_{2.5}$ no bairro Maracanã e na comunidade São Pedro, Santarém/PA.

Na Figura 4, a análise do comportamento horário da temperatura e da umidade relativa do ar, revela uma relação inversamente proporcional entre essas duas variáveis. Observa-se que os horários com as maiores temperaturas e as menores umidades ocorrem entre 14h e 15h nas duas localidades. Esse padrão é consistente com as observações de Santos et al. (2021), que também realizaram um estudo na cidade de Santarém/PA, encontrando que a umidade relativa tende a ser mais baixa e a temperatura mais alta entre 12h e 15h. Durante esse período, a elevação da temperatura contribui para uma redução significativa na umidade relativa, conforme mostrado na Figura 4.

Os níveis de umidade na comunidade São Pedro superaram os do bairro Maracanã ao longo de todos os intervalos horários do dia. A umidade máxima média atingiu aproximadamente 80%

entre as 6h00 e 7h00. A influência da vegetação e arborização sobre as variáveis climáticas é corroborada por Oliveira et al. (2023), que, em um estudo realizado em Manicoré-AM, destacaram que a arborização afeta diretamente o comportamento da umidade relativa do ar. Áreas mais arborizadas apresentam maior emissão de vapor d'água para a atmosfera, resultando em níveis de umidade mais elevados em comparação com áreas urbanas que possuem menos vegetação. Além disso, a ausência de ilhas de calor urbanas significativas, fatores que contribuem para os níveis mais elevados de umidade observados nas áreas periurbanas diferente da área urbana (Chapman et al., 2017).

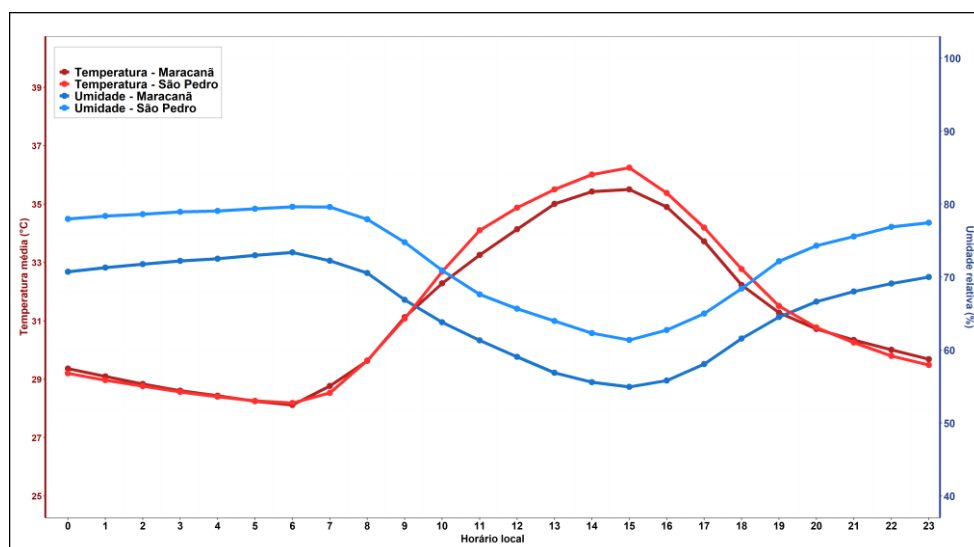


Figura 4. Média horária da temperatura e umidade no bairro Maracanã e na comunidade São Pedro, Santarém/PA.

Na Figura 5, ao comparar o comportamento do $PM_{2.5}$ no bairro Maracanã e na comunidade São Pedro, durante os meses em estudo, observa-se um padrão semelhante em ambas as localidades. O mês de fevereiro apresentou as menores variabilidades e a menor média de concentrações de $PM_{2.5}$. Por outro lado, os meses de março, maio e junho exibiram as maiores variabilidades nas duas localidades. Destaca-se também a presença de outliers, sendo o maior valor registrado no bairro Maracanã, com uma concentração de aproximadamente 27 ($\mu g/m^3$). O mês de junho apresentou a maior média de $PM_{2.5}$ na comunidade São Pedro, em torno de 8 ($\mu g/m^3$). É importante ressaltar que todas as médias observadas estão dentro dos limites estabelecidos pela OMS (2021).

Anomalias negativas de precipitação, ou seja, períodos de chuvas abaixo da média, como as observadas no norte da Amazônia entre junho e setembro de 2023 por Espinoza et al. (2024), podem estar associadas a um aumento na

concentração de poluentes atmosféricos, como o $PM_{2.5}$, principalmente no mês de junho, que é considerado um mês de transição do período chuvoso para o período seco na região Amazônica (Norman et al., 2019). A precipitação normalmente ajuda a remover partículas de poluentes do ar através de um processo de "lavagem atmosférica". Quando há menos chuvas, a remoção dos poluentes é menos eficiente, permitindo que suas concentrações aumentem (Liu et al., 2020). Além disso, a maior média registrada em junho na comunidade São Pedro, com aproximadamente 8 ($\mu g/m^3$), pode estar diretamente ligada à diminuição das chuvas na região durante esse período. Embora os valores estejam dentro dos limites estabelecidos pela OMS, o aumento das concentrações de $PM_{2.5}$ durante os meses com menor precipitação destaca a influência das condições meteorológicas, como a seca, na qualidade do ar e nas variabilidades locais de poluição.

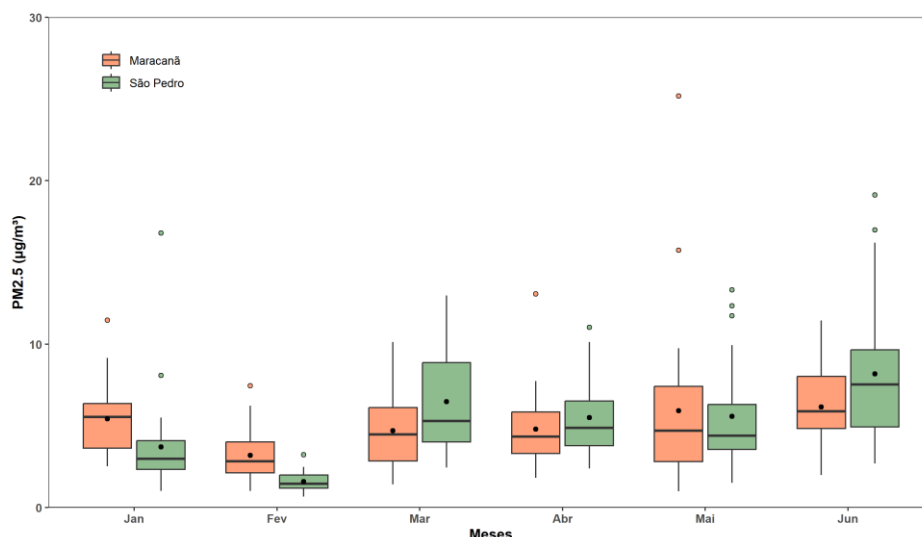


Figura 5. Concentração do PM_{2.5} no bairro Maracanã e na comunidade São Pedro nos meses de janeiro a junho de 2023, Santarém/PA.

Coefficiente de correlação de Pearson

Como mencionado anteriormente as correlações de Pearson oferecem uma métrica que quantifica a intensidade e direção da relação linear entre duas variáveis, variando de -1 a 1. Nas Figuras, os números de 1 a 6 correspondem, respectivamente, aos meses analisados: janeiro, fevereiro, março, abril, maio e junho. No bairro Maracanã (Figura 6), observa-se que, com exceção de abril, que apresentou uma correlação fraca ($r < 0,40$), os demais meses tiveram uma correlação positiva moderada ($r > 0,40$), com significância estatística ($p\text{-valor} < 0,05$). Esses resultados indicam uma associação significativa entre as variáveis analisadas, sugerindo que o aumento da temperatura está associado a uma elevação nas concentrações de poluentes atmosféricos, como PM_{2.5}. A literatura reforça essa conclusão. Xu et al. (2018); Danek et al. (2022) e Vaishali e Das, (2023) exploram como as variações das condições meteorológicas influenciam na concentração do

PM_{2.5}, sendo a temperatura um dos principais fatores que controlam a dispersão e acumulação de partículas.

Na comunidade São Pedro (Figura 7), os meses de janeiro, fevereiro e abril também apresentaram correlação fraca ($r < 0,40$), enquanto março, maio e junho exibiram correlação moderada ($r > 0,40$). Esta variação pode ser atribuída às mudanças sazonais, especialmente ao período de transição em junho, que marca o fim do período chuvoso e o início do período seco (Norman et al., 2019). O estudo de Andreão et al. (2019) aponta que, durante a transição para a estação seca, a redução da umidade relativa e o aumento da temperatura proporcionam condições atmosféricas que favorecem a acumulação de poluentes em áreas periurbana, onde a vegetação e a dispersão são mais influenciadas pelas condições meteorológicas do que em áreas densamente urbanizadas.

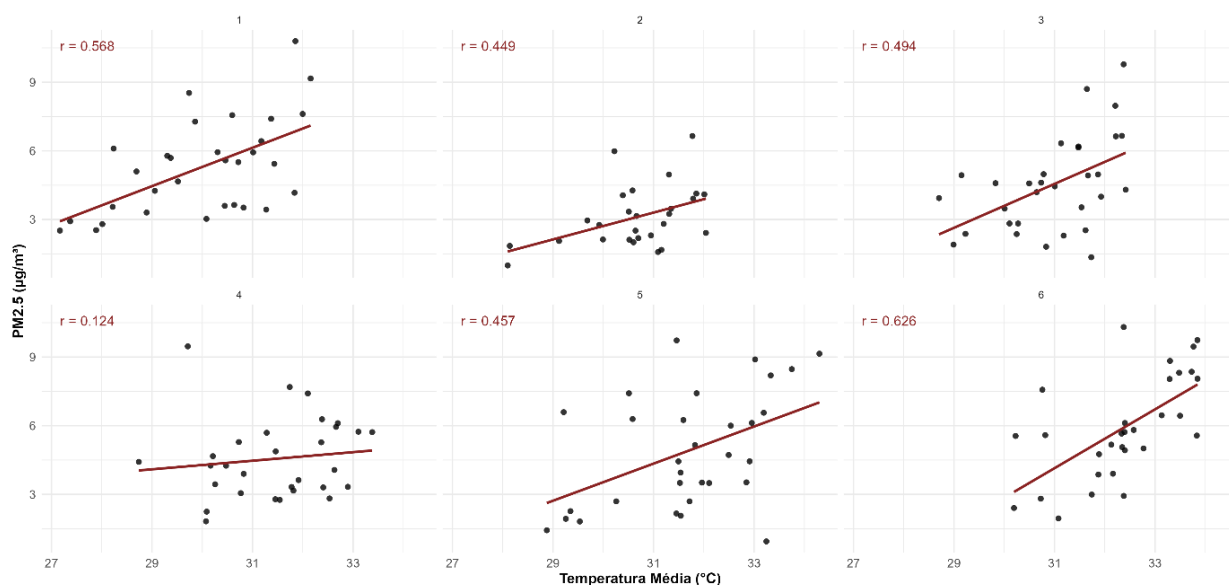


Figura 6. Correlação da temperatura média e $PM_{2.5}$ por mês no bairro Maracanã, Santarém/PA.

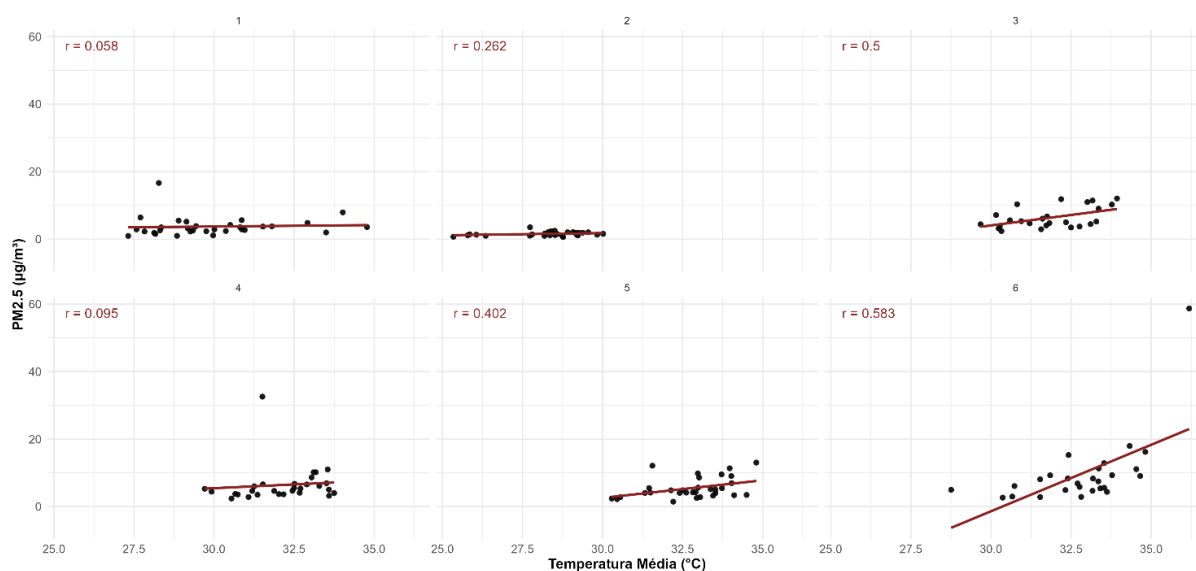


Figura 7. Relação entre temperatura e $PM_{2.5}$ por mês na comunidade São Pedro, Santarém/PA.

No bairro Maracanã (Figura 8), os meses de janeiro, março e junho mostraram uma correlação negativa moderada entre a umidade e as concentrações de $PM_{2.5}$ isso indica que, nesses meses, à medida que a umidade aumentava, os níveis de $PM_{2.5}$ diminuía de forma mais expressiva. Nos meses de fevereiro, abril e maio, a correlação foi negativa, porém fraca, sugerindo que, nestes meses, o efeito da umidade sobre a concentração de $PM_{2.5}$ foi menos pronunciado. Isso pode estar relacionado à variabilidade nas fontes de emissão de $PM_{2.5}$ ou à dinâmica atmosférica que influencia o comportamento dessas partículas Vaishali e Das, (2023).

De maneira similar, na comunidade de São Pedro (Figura 9), a correlação negativa fraca observada nos meses de janeiro, fevereiro, abril e maio também aponta para uma influência limitada da umidade sobre os níveis de $PM_{2.5}$. No entanto, em março e junho, a correlação negativa moderada indica uma interação mais forte entre a umidade e a dispersão do $PM_{2.5}$. Nota-se também na Figura 9 uma alta concentração de $PM_{2.5}$, de aproximadamente 60 ($\mu g/m^3$), o que se diferencia do bairro Maracanã.

O comportamento observado pode ser atribuído às condições meteorológicas específicas desses períodos, como a intensificação das chuvas ou maior circulação de ventos, que favorecem a

dispersão e remoção de poluentes atmosféricos. Observa-se que os maiores volumes de precipitação ocorrem entre os meses de dezembro e maio, caracterizando o regime chuvoso da região, enquanto os menores valores são registrados de junho a novembro, refletindo o regime seco predominante. Além disso, mesmo durante os meses tipicamente chuvosos (fevereiro, março a maio), eventos de seca podem ocorrer,

evidenciando a variabilidade climática da região Amazônica (Ferreira et al., 2020).

A precipitação remove de forma eficiente partículas do ar ao incorpora-las na água da chuva. A direção e a velocidade dos ventos contribuem com o transporte e a dispersão dos poluentes atmosféricos (Plaude et al., 2012; Machado et al., 2018).

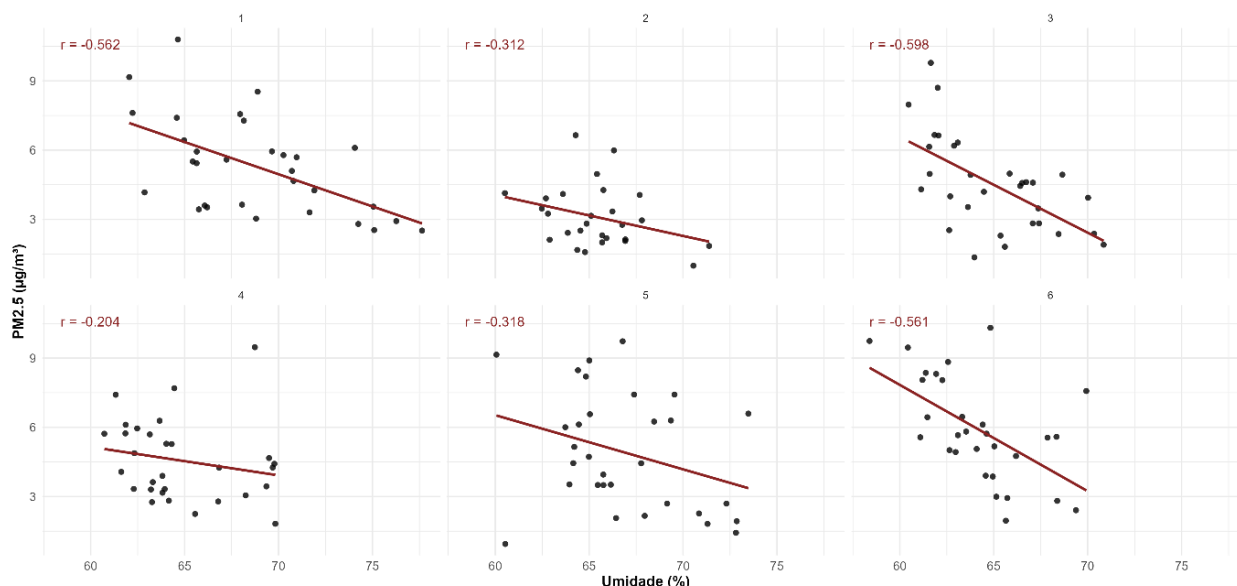


Figura 8. Correlação entre Umidade e PM_{2.5} por mês no bairro Maracanã, Santarém/PA.

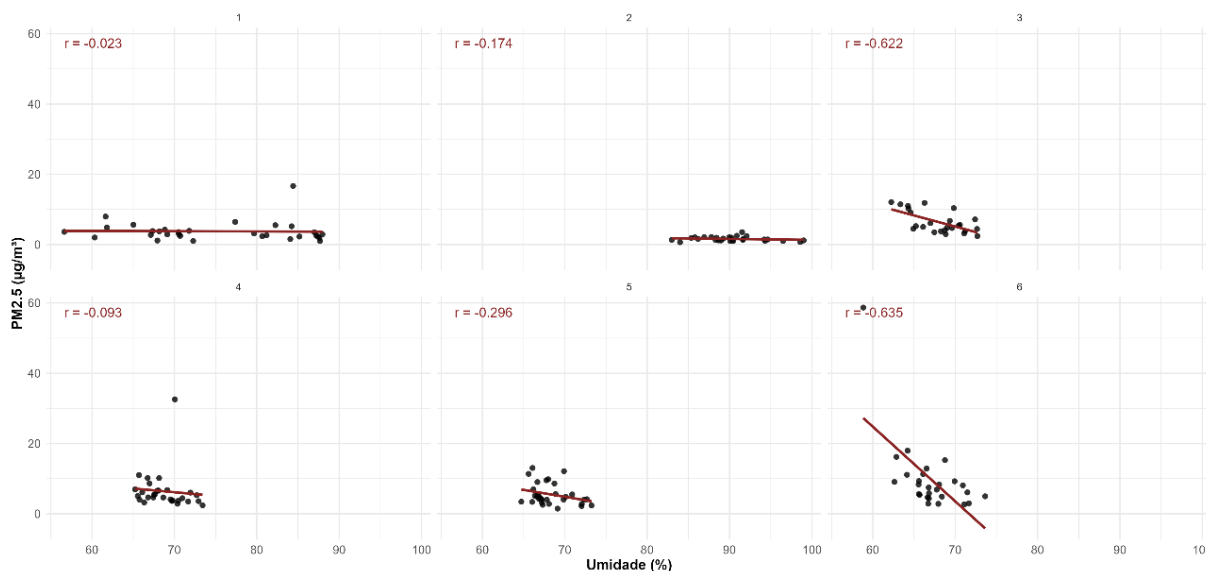


Figura 9. Correlação entre Umidade e PM_{2.5} por mês na comunidade São Pedro, Santarém/PA.

Modelagem via equações de estimação generalizadas (Generalized Estimating Equations – GEE).

A modelagem via GEE evidencia a associação significativa e a ocorrência do risco

entre as variáveis analisadas. Ao comparar a ação da temperatura e da umidade, nas duas localidades, para a ocorrência da poluição atmosférica, é possível observar que o risco é maior na área urbana (Maracanã). Ademais destaca-se o risco

mais elevado (RR=1,24) ocasionado por influência da temperatura na poluição por PM_{2,5} (Tabela 1).

O risco significativo indica que a temperatura influência na poluição atmosférica por

PM_{2,5}. A diferença observada entre áreas urbanas e áreas periurbanas indica que a urbanização intensifica os efeitos das variáveis ambientais na poluição do ar (Silva et al., 2020).

Tabela 1- Modelagem via GEE dos poluentes a partir das variáveis meteorológicas.

COEFICIENTES	Modelo Via GEE - Maracanã (PM _{2,5})			
	Estimativa	Erro	P-valor	Risco Relativo (RR)
Intercepto	-10,5526	3,1306	0,00075 ***	--
Temperatura	0,2148	0,0586	0,00025 ***	1,24
Umidade Relativa	0,0829	0,0202	4,1e-05 ***	1,09
	Modelo via GEE – São Pedro (PM _{2,5})			
	Estimativa	Erro	P-valor	Risco Relativo (RR)
Intercepto	10,75014	1,37466	0,0005 ***	--
Temperatura	-0,15043	0,02772	0,0005 ***	0,86
Umidade Relativa	-0,06098	0,00773	0,0003***	0,941
SIGNIF.: 0 ‘***’ 0,001 ‘**’ 0,01 ‘*’ 0,05 ‘,’ 0,1 ‘ ’ 1				

Conclusões

Os resultados deste estudo evidenciam que o padrão das concentrações de PM_{2,5} na área urbanas e periurbana de Santarém/PA seguem um comportamento semelhante, indicando influência das condições meteorológicas sobre os níveis desse poluente. As variações na temperatura e umidade relativa demonstraram um papel importante na dispersão e acumulação das partículas finas, corroboradas pelo coeficiente de correlação de Pearson, com um p-valor < 0,05. Observou-se uma maior concentração de valores discrepantes na área urbana, o que sugere que fatores específicos dessa região podem estar contribuindo para variações mais acentuadas nos níveis de poluentes atmosféricos.

Os elevados custos de instalação e manutenção de estações de monitoramento convencionais representam uma barreira para a obtenção de dados de qualidade do ar em regiões subdesenvolvidas. Assim, a adoção de sistemas de monitoramento com sensores de baixo custo se mostra fundamental, pois permite uma avaliação atualizada da qualidade do ar nas localidades estudadas. Esses dispositivos acessíveis para a detecção de poluentes atmosféricos têm o potencial de aprimorar a coleta de dados, facilitando uma resposta eficaz a questionamentos científicos e promovendo a aplicação prática das informações coletadas.

Ademais, os resultados obtidos representam uma contribuição significativa para a compreensão da qualidade do ar em ambientes urbanos e periurbanos na região amazônica. A escassez de estudos sobre a qualidade do ar em

cidades pequenas e médias resulta em um conhecimento limitado sobre os níveis de poluentes, seus padrões sazonais e os impactos na saúde da população. Embora os níveis de poluição observados neste estudo tenham permanecido abaixo dos limites estabelecidos pela OMS, episódios isolados contribuíram para a deterioração da qualidade do ar.

Os resultados obtidos neste estudo representam uma contribuição para o aprimoramento da compreensão da qualidade do ar em ambientes urbanos e periurbanos na região amazônica. Estas descobertas inéditas estabelecem um sólido fundamento para estudos subsequentes.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas (FAPESPA) pelo apoio e incentivo a pesquisa.

Referências

- Adedeji, A. R., Zaini, F., Mathew, S., Dagar, L., Petra, M. I., & De Silva, L. C. (2020). Sustainable energy towards air pollution and climate change mitigation. *Journal of environmental management*, 260, 109978. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109978>
- Agresti A. (1996). *An introduction to categorical data analysis*. (2 ed). Wiley.
- Almeida, D. de O., Gomes, A. C. dos S., Batalha, S. S. A., Silva, G. V. da, Cordeiro Junior, L. G., Martins, E. A. I., Raiol, A. dos S. (2023). Monitoring atmospheric pollution in Central Amazon: Case study carried out in Santarém City–PA. *Journal of Hyperspectral Remote*

- Sensing, 13(2), 187-201. <https://doi.org/10.29150/jhrs.v13.2.p187-201>.
- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. L. M., & Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Researchgate*, 22(6), 711–728. <http://dx.doi.org/10.1127/09412948/2013/050>
- Andraão, W. L., Trindade, B. T., Nascimento, A. P., Reis Júnior, N. C., Andrade, M. F., & Albuquerque, T. T. A. (2020). Influence of meteorology on fine particles concentration in Vitória metropolitan region during wintertime. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 34(4), 459-470. <https://doi.org/10.1590/0102-778634405>.
- Aosong (Guangzhou). (2015).Electronics Co. AM2302: Temperature and humidity sensor datasheet. Retrieved from https://www.lcsc.com/datasheet/lcsc_datasheet_1810051021_Aosong--Guangzhou-Elec-AM2302_C83988.pdf.
- Araújo, T.; Silva, L.; Moreira, A. (2020). Evaluation of Low-Cost Sensors for Weather and Carbon Dioxide Monitoring in Internet of Things Context. *IoT.*, 1 (2), 286-308. <https://doi.org/10.3390/iot1020017>.
- Assaf et al. Academy of Science of South Africa. (2019) Air Pollution and Health – A Science- - Policy Initiative. *Annals of Global Health*, v.85, n.1, p.140, 1–9. DOI: <https://doi.org/10.5334/aogh.2656>.
- Badura, M., Batog, P., Drzeniecka-Osiadacz, A., Modzel P. (2018). Evaluation of low-cost sensors for ambient PM2.5monitoring. *Journal of Sensors*, Article. 5096540.<https://doi.org/10.1155/2018/5096540>
- Behera, D. K., Viswanathan, P. K., & Mishra, S. (2024). Effects of air pollution on global health: Evidence from the global burden of disease study in the BRICS countries. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 97, 813–832. <https://doi.org/10.1007/s00420-024-02087-7>.
- Božilov, A., Tasić, V., Živković, N., Lazović, I., Blagojević, M., Mišić, N., & Topalović, D. (2022). Performance assessment of NOVA SDS011 low-cost PM sensor in various microenvironments. *Environ Monit Assess*. 194, 595. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10290-7>
- Carvalho, L. M. V.; Jones, C.; Liebmann, B. (2004). The South Atlantic Convergence Zone: intensity, form, persistence, and relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. *Journal of Climate*, v. 17, p. 88-108. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017%3C0088:TSACZI%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017%3C0088:TSACZI%3E2.0.CO;2).
- Castell, N; Dauge, F. R; Schneider, P; Vogt, M; Lerner, U; Fishbain, B; Broday, D; Bartonova, A (2017). Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates?. *Environment International*, v. 99, p. 293-302. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.12.007>.
- Castillo, M. D., Kinney, P. L., Southerland, V., Arno, C. A., Crawford, K., van Donkelaar, A., ... & Anenberg, S. C. (2021). Estimating intra-urban inequities in PM2. 5-Attributable health impacts: a case study for washington, DC. *GeoHealth*, 5(11). 10.1029/2021GH00043.
- Chapman, S., Watson, J.E.M., Salazar, A. et al. The impact of urbanization and climate change on urban temperatures: a systematic review. *Landscape Ecol* 32, 1921–1935 (2017). <https://doi.org/10.1007/s10980-017-0561-4>.
- Chiquetto, J. B., Alvim, D. S., Rozante, J. R., Faria, M., Rozante, V., & Gobo, J. P. A. (2021). Impact of a truck Driver's strike on air pollution levels in São Paulo. *Atmospheric Environment*, v. 246, p. 118072. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.118072>.
- Chojer, H., Branco, P. T. B. S., Martins, F. G., Alvim-Ferraz, M. C. M., & Sousa, S. I. V. (2020). Development of low-cost indoor air quality monitoring devices: Recent advancements. *Science of The Total Environment*, 727, 138385. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138385>
- Cohen, J. C. P.; Silva Dias, M. A. F.; Nobre, C. A. (1995). Environmental conditions associated with amazonian squall lines: a case study. *Monthly Weather Review*, v. 123, p. 3163-3174. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1995\)123%3C3163:ECAWAS%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1995)123%3C3163:ECAWAS%3E2.0.CO;2).
- Costa, M. A. M., Amaral, S. S., Soares Neto, T. G., Cardoso, A. A., Santos, J. C., Souza, M. L., & Carvalho, J. A. (2022). Incêndios florestais na Amazônia brasileira e seus efeitos na concentração de material particulado, distribuição de tamanho e composição química. *Combustion Science and Technology*, 195(13), 3045–3071. <https://doi.org/10.1080/00102202.2021.2019229>.
- Dancey, C., & Reidy, J. (2006). Estatística sem matemática para psicologia: Usando SPSS para Windows. Porto Alegre: Artmed.
- Almeida, D. O., Gomes, A. C. S., Batalha, S. S. A., Silva, G. V., Mandú, T. B., Tapajos Silva, R. P. T., Raiol, A. S., Martins, E. A. I., Dias, G. S;

- Danek, T., Weglińska, E., & Zareba, M. (2022). The influence of meteorological factors and terrain on air pollution concentration and migration: A geostatistical case study from Krakow, Poland. *Scientific Reports*, 12, 11050. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-15160-3>.
- Espinoza, J.C., Jimenez, J.C., Marengo, J.A. et al. (2024). The new record of drought and warmth in the Amazon in 2023 related to regional and global climatic features. *Sci Rep* 14, 8107. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58782-5>.
- Ferreira, D. B. da S., Souza, E. B., & Oliveira, J. V. de. (2020). Identificação de extremos de precipitação em municípios do estado do Pará e sua relação com os modos climáticos atuantes nos oceanos Pacífico e Atlântico. 27, 197–222. *Revista Brasileira de Climatologia*. <https://doi.org/10.5380/abclima.v27i0.64630>.
- Gomes, D. A. (2020). Impactos da poluição na Amazônia: uma análise ambiental. *Revista Terra Verde*, v. 6, n. 1, p. 8-15.
- Gupta, P., Doraiswamy, P., Levy, R., Pikelnaya, O., Maibach, J., Feenstra, B., Polidori, A., Kiros, F., & Mills, K. C. (2018). Impact of California fires on local and regional air quality: The role of a low-cost sensor network and satellite observations. *GeoHealth*, 2(5), 172-181. <https://doi.org/10.1029/2018GH000136>.
- Ignotti, E., Hacon, S. D. S., Junger, W. L., Mourão, D., Longo, K., Freitas, S., ... & Leon, A. C. M. P. D. (2010). Air pollution and hospital admissions for respiratory diseases in the subequatorial Amazon: a time series approach. *Cadernos de Saúde Pública*, 26, 747-761. <https://doi.org/10.1590/S0102-311X2010000400017>.
- Ignotti, E., Hacon, S. S., Silva, A. M. C., Junger, W. L., & Castro, H. (2007). Effects of biomass burning in Amazon: method to select municipalities using health indicators. *Revista Brasileira de Epidemiologia*, v. 10, p. 453-464. <https://doi.org/10.1590/S1415-790X2007000400003>.
- Ingole, V., Dimitrova, A., Sampedro, J., Sacoar, C., Acacio, S., Juvekar, S., & Tonne, C. (2022). Local mortality impacts due to future air pollution under climate change scenarios. *Science of the Total Environment*, 823, 153832. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153832>.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). (2022). *Cidades e Estados*. Santarém, Pará.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2010). *Censo Demográfico 2010: Resultados do universo por setor censitário – Santarém, PA*. IBGE. <https://www.ibge.gov.br>.
- Jang, Y.-W., & Jung, G.-W. (2023). Temporal characteristics and sources of PM_{2.5} in Porto Velho of Amazon region in Brazil from 2020 to 2022. *Sustainability*, 15(18), 14012. <https://doi.org/10.3390/su151814012>.
- Kinney, P. L. (2021). How can we solve our air quality problem in the face of climate change? *JAMA Network Open*, 4(1), e2035010–e2035010. <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2020.35010>.
- Koch, M.R. (2004). Grandes empreendimentos comerciais e alterações na estrutura urbana: o caso do shopping center Iguatemi em Porto Alegre. In: *Revista Indicadores Econômicos*. v.32, nº1, p.7-32, maio.
- Koppen .Das. (1936). *Geographische system der klimat*. *Handbuch der klimatologie*, p. 46.
- Krittanawong, C., Qadeer, Y. K., Hayes, R. B., Wang, Z., Virani, S., Thurston, G. D., & Lavie, C. J. (2023). PM_{2.5} and cardiovascular health risks. *Current Problems in Cardiology*, 48(6), 101670. <https://doi.org/10.1016/j.cpcardiol.2022.101670>.
- Laird NM, Ware JH. (1982). Random-effects models for longitudinal data. *Biometrics*, v.38:963-974.
- Liang KY, Zeger SL. (1986). Longitudinal data analysis using generalized linear models. *Biometrika*. 73:13-22. <https://doi.org/10.1093/biomet/73.1.13>.
- Liu, H.-Y.; Schneider, P.; Haugen, R.; Vogt, M. (2019). Performance Assessment of a Low-Cost PM_{2.5}Sensor for a near Four-Month Period in Oslo, Norway. *Atmosphere*, 10, 41. <https://doi.org/10.3390/atmos1002004>
- Liu, Y., Zhou, Y. & Lu, J.(2020). Exploring the relationship between air pollution and meteorological conditions in China under environmental governance. *Sci Rep* 10, 14518. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-71338-7>
- Machado, G. P., Alves, R. I. S., Senhuk, A. P. M. S., Fregonesi, B. M., Zagui, G. S., Nadal, M., Sierra, J., Domingo, J. L., & Segura-Muñoz, S. I. (2018). Avaliação espacial e sazonal das concentrações de partículas totais em suspensão e elementos metálicos associados no ar de uma cidade do sudeste brasileiro. *Química Nova*, 42(2), 168-174. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170297>.
- Maji, K. J., Li, V. O., & Lam, J. C. (2020). Effects of China's current Air Pollution Prevention and Control Action Plan on air pollution patterns,
- Almeida, D. O., Gomes, A. C. S., Batalha, S. S. A., Silva, G. V., Mandú, T. B., Tapajos Silva, R. P. T., Raiol, A. S., Martins, E. A. I., Dias, G. S;

- health risks and mortalities in Beijing 2014–2018. *Chemosphere*, 260, 127572. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127572>.
- Moura, F. R. de, Machado, P. D. W., Ramires, P. F., Tavella, R. A., Carvalho, H., & Silva Júnior, F. M. R. da. (2024). In the line of fire: Analyzing burning impacts on air pollution and air quality in an Amazonian city, Brazil. *Atmospheric Pollution Research*, 15(4), 102033. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2023.102033>.
- Ngarambe, J., Joen, S. J., Han, C.-H., & Yun, G. Y. (2021). Exploring the relationship between particulate matter, CO, SO₂, NO₂, O₃, and urban heat island in Seoul, Korea. *Journal of Hazardous Materials*, 403, 123615. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123615>.
- Morgan, W. T., Darbyshire, E., Spracklen, D. V., Artaxo, P., & Coauthors. (2019). Non-deforestation drivers of fires are increasingly important sources of aerosol and carbon dioxide emissions across Amazonia. *Scientific Reports*, 9(1), 16975. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-53112-6>
- Oliveira, B. F. A. de, Ignotti, E., Artaxo, P., do Nascimento Saldiva, P. H., Junger, W. L., & Hacon, S. (2012). Risk assessment of PM_{2.5} to child residents in Brazilian Amazon region with biofuel production. *Environmental Health*, 11(1), 1-11. <http://www.ehjournal.net/content/11/1/64>.
- Oliveira, H. M. et al. (2023). Avaliação dos efeitos da arborização nas variáveis de temperatura e umidade relativa do ar na cidade de Manicoré, Amazonas, Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 32, p. 223-236. <https://doi.org/10.55761/abclima.v32i19.16453>
- Organização Mundial da Saúde. (2021). Qualidade do ar: Padrões e diretrizes. OMS. https://iris.paho.org/bitstream/handle/10665.2/54963/9789275724613_por.pdf.
- Pandey, A., Brauer, M., Cropper, M. L., Balakrishnan, K., Mathur, P., Dey, S., & Dandona, L. (2021). Health and economic impact of air pollution in the states of India: the Global Burden of Disease Study 2019. *The Lancet Planetary Health*, 5(1), e25-e38. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(20\)30298-9](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(20)30298-9).
- Peel, MC, Finlayson, BL e McMahon, TA. (2007). Mapa mundial atualizado da classificação climática de Köppen-Geiger, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11, 1633–1644, <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>.
- Plaude, N. O., Stulov, E. A., Parshutkina, I. P., & Monakhova, N. A. (2012). *Russian Meteorology and Hydrology*, 37, 324.
- Freitas, A. M.; Solci, M. C.; *Quim. Nova* 2009, 32, 1750.
- Rasheed, Louay A.; Y., Alexey V.(2022). Arduino-Based Temperature and Relative Humidity Sensors - An Estimation of Their Suitability for Indoor Air Quality of Solar Dryer. Toms Polytechnic University, Toms State University.
- Reisen, V. A., & Silva, A. N. (2011). O uso da linguagem R para cálculos de estatística básica. EDUFES. <https://edufes.ufes.br/items/show/219>
- Ribeiro, V. L., & Lameiras, F. S. (2021). HIGROTERM: An open-source and low-cost temperature and humidity monitoring system for laboratory applications. *Inventions*, 6(4), 84. <https://doi.org/10.3390/inventions6040084>.
- Rocha, R., & Sant’Anna, A. A. (2022). Winds of fire and smoke: Air pollution and health in the Brazilian Amazon. *World Development*, 151, 105722. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2021.105722>.
- Santos, F. S., Pinto, J. A., Maciel, F. M., Horta, F. S., Albuquerque, T. T. A., Andrade, M. F. (2021). Avaliação da influência das condições meteorológicas na concentração de material particulado fino (MP_{2,5}) em Belo Horizonte, MG. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 36(1), 45-59. DOI: 10.1590/S1413-41522019174045.
- Santos, G. P. dos, Almeida, R. M., Moura, E. R. da S., & Oliveira, L. L. (2021). Sensação térmica urbana em área residencial planejada no município de Santarém – Pará, Amazônia, Brasil. *Revista Brasileira De Geografia Física*, 14(3), 1333–1351. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.3.p1333-1351>
- Santos, T. C. dos, Reboita, M. S., & Carvalho, V. S. B. (2018). Investigação da relação entre variáveis atmosféricas e a concentração de MP₁₀ e O₃ no Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 33(4), 1–10. <https://doi.org/10.1590/0102-7786334006>.
- Shelton, Sherly; Liyanage, Gayathri; Jayasekara, Sanduni; Pushpawela, Buddhi; Rathnayake, Upaka; Jayasundara, Akila; Jayasooriya, Lesty Dias. (2022). Seasonal Variability of Air Pollutants and Their Relationships to Meteorological Parameters in an Urban Environment. *Advances in Meteorology*, v. 2022, Article ID 5628911, pag. 18. <https://doi.org/10.1155/2022/5628911>.

- Silva Júnior, R. S., Martilli, A., & Silva, E. H. de L. (2020). Efeito da urbanização sobre a dispersão de poluentes e formação de ilha de calor. *Revista Brasileira de Climatologia*, 27, 34. <https://doi.org/10.5380/abclima.v27i0.6939>
- 8.
- Silva, A. F., & Vieira, C. A. (2017). Aspectos da poluição atmosférica: uma reflexão sobre a qualidade do ar nas cidades brasileiras. *Ciência e Sustentabilidade*. v.3. p. 166-189. <https://doi.org/10.33809/24474606.312017166-189>.
- Silva, S., Flores de Melo, A. W., Silvestre, O., Brown, F., & outros. (2021). Importância do monitoramento da qualidade do ar na Amazônia para a saúde pública e o meio ambiente: o caso do Estado do Acre, Brasil (Nota Técnica). Laboratório de Geoprocessamento Aplicado ao Meio Ambiente - LabGAMA. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.31288.21768>
- Shaddick, G., Thomas, M. L., Mudu, P., et al. (2020). Half the world's population are exposed to increasing air pollution. *npj Climate and Atmospheric Science*, 3, 23. <https://doi.org/10.1038/s41612-020-0124-2>.
- Southerland, V. A., Brauer, M., Moheggh, A., Hammer, M. S., van Donkelaar, A., Martin, R. V., Apte, J. S., & Anenberg, S. C. (2022). Global urban temporal trends in fine particulate matter (PM_{2.5}) and attributable health burdens: Estimates from global datasets. *The Lancet Planetary Health*, 6(2), e139–e146. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(21\)00350-8](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(21)00350-8)
- Souza, A. A., Oviedo, A., & Santos, T. M. (2020). Impactos na qualidade do ar e saúde humana relacionados ao desmatamento e queimadas na Amazônia Legal brasileira. Instituto Socioambiental.
- Souza, E. B.; Kayano, M. T.; Ambrizzi, T. (2005). Intraseasonal and submonthly variability over the Eastern Amazon and Northeast Brazil during the autumn rainy season. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 81, p. 177-191. <http://dx.doi.org/10.1007/s00704-004-0081-4>.
- Srimuruganandam, B., & Nagendra, S. M. S. (2012). Source characterization of PM₁₀ and PM_{2.5} mass using a chemical mass balance model at urban roadside. *Science of the Total Environment*, 433, 8-19. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.05.082>
- Torres, L. M., Pinheiro, C. D. P. S., Azevedo, S. D., Rodrigues, P. R. S., & Sandim, D. P. R. (2020). Poluição atmosférica em cidades brasileiras: uma breve revisão dos impactos na saúde pública e meio ambiente. *Naturae*, 2(1), 23-33. <https://doi.org/10.6008/CBPC2674-6441.2020.001.000>.
- Vaishali, Verma, G., & Das, R. M. (2023). Influence of temperature and relative humidity on PM_{2.5} concentration over Delhi. *MAPAN*, 38, 759–769. <https://doi.org/10.1007/s12647-023-00656-8>.
- Villar, R. (2021). The health impacts of the smoke from the fires in the Amazon. Greenpeace. <https://www.greenpeace.org/international/story/50047/smoke-fires-deforestation-amazon-brazil-health-impact/>.
- Vormittag, E. P. A. de A., Cirqueira, S. S. R., Wicher Neto, H., & Saldiva, P. H. N. (2021). Análise do monitoramento da qualidade do ar no Brasil. *Estudos Avançados*. v. 35, n, p. 7-30. <https://doi.org/10.1590/s0103-4014.2021.35102.002>.
- Wei, J., Li, Z., Pinker, R. T., Wang, J., Sun, L., Xue, W., Li, R., & Cribb, M. (2021). Variações diurnas derivadas de Himawari-8 na poluição de PM_{2.5} ao nível do solo em toda a China usando a Máquina de Aumento de Gradiente de Luz de Espaço-Tempo Rápido (LightGBM). *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 7863–7880. <https://doi.org/10.5194/acp-21-7863-2021>.
- World Health Organization. (2021). WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>
- Xiao, Q., Geng, G., Xue, T., Liu, S., Cai, C., He, K., & Zhang, Q. (2021). Tracking PM_{2.5} and O₃ pollution and the related health burden in China 2013–2020. *Environmental science & technology*, 56(11), 6922-6932. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c04548>.
- Xu, Y., Xue, W., Lei, Y., Zhao, Y., Cheng, S., Ren, Z., & Huang, Q. (2018). Impact of meteorological conditions on PM_{2.5} pollution in China during winter. *Atmosphere*, 9(11), 429. <https://doi.org/10.3390/atmos9110429>.
- Yang, Z., Mahendran, R., Yu, P., Xu, R., Yu, W., Godellawattage, S., ... & Guo, Y. (2022). Health effects of long-term exposure to ambient PM_{2.5} in Asia-Pacific: a systematic review of cohort studies. *Current Environmental Health Reports*, 9(2), 130-151. <https://doi.org/10.1007/s40572-022-00344-w>.
- Zeger, S. L., & Liang, K. Y. (1986). Longitudinal data analysis for discrete and continuous outcomes. *Biometrics*, 42(1), 121–130.