

Sensores de Baixo Custo para monitoramento da qualidade do ar: Uma Revisão Sistemática para América Latina

Low-Cost Sensors for Air Quality Monitoring: A Systematic Review for Latin America

¹Carlos Eduardo Menezes da Silva, ²Luana Pessoa Genuino, ³Elyenay Mikaelle Nascimento Bandeira, ⁴Michele De Lima e Silva ⁵Max Antônio Da Silva Pessoa ⁶Anselmo César Vasconcelos Bezerra

¹Professor Associado do Departamento de Ambiente, Saúde e Segurança – Instituto Federal de Pernambuco (carlosmenezes@recife.ifpe.edu.br)

²Mestranda em Gestão e Políticas Ambientais– Instituto Federal de Pernambuco (luh_pessoa@hotmail.com)

³Graduanda em Tecnologia em Gestão Ambiental – Instituto Federal de Pernambuco (naaybandeira@gmail.com)

⁴Graduanda em Tecnologia em Gestão Ambiental – Instituto Federal de Pernambuco (mls@discente.ifpe.edu.br)

⁵Graduando em Tecnologia em Gestão Ambiental – Instituto Federal de Pernambuco (maxpessoa03@gmail.com)

⁶Professor Titular do Departamento de Ambiente, Saúde e Segurança – Instituto Federal de Pernambuco (anselmo@recife.ifpe.edu.br)

RESUMO: A poluição atmosférica é considerada o principal fator de risco ambiental para a saúde no mundo. Porém, apesar dessa importância, a medição de poluentes atmosféricos ainda é um desafio em muitas partes do mundo. Considerando este cenário, buscamos com esta revisão sistemática investigar o uso de sensores de baixo custo (SBC) para monitoramento do ar na América Latina, onde a má distribuição de estações oficiais limita a gestão ambiental. Utilizando o protocolo PRISMA, foram analisados 87 artigos publicados nos últimos dez anos nas bases Scopus e Web of Science. Os resultados indicam que o material particulado (PM_{2,5} e PM₁₀) são os parâmetros mais monitorados, com destaque para as marcas Alphasense, Sensirion e Nova Fitness. O custo dos sensores pesquisados variou entre um mínimo de US\$ 71 e o máximo US\$ 1.573. Redes de monitoramento foram identificadas em 11 cidades, evidenciando o potencial de espacialização de dados. Contudo, a precisão dos SBC é afetada por fatores como umidade e temperatura, tornando a calibração rigorosa indispensável para a confiabilidade dos dados. Conclui-se que os SBC são ferramentas promissoras para complementar redes tradicionais, embora persistam desafios técnicos de manutenção, padronização e a necessidade de pessoal capacitado para garantir a qualidade das informações coletadas.

Palavras Chave: Poluição Atmosférica. Monitoramento Ambiental. Internet das Coisas. Cidades Inteligentes.

ABSTRACT:

Air pollution is considered the primary environmental health risk factor worldwide. However, despite its importance, measuring air pollutants remains a challenge in many parts of the world. Considering this scenario, this systematic review aims to investigate the use of low-cost sensors (LCS) for air quality monitoring in Latin America, where official monitoring coverage is often insufficient. Following the PRISMA protocol, 87 articles from Scopus and Web of Science were selected for analysis. The results show that PM_{2.5} and PM₁₀ are the primary pollutants monitored, with Alphasense, Sensirion, and Nova Fitness identified as the main manufacturers. The average cost for these devices is US\$ 672.55, ranging from US\$ 71 to US\$ 1,573. Monitoring networks were implemented in at least 11 cities, demonstrating the potential for localised data. However, environmental variables such as humidity and temperature significantly impact accuracy, requiring robust calibration through linear regression or machine learning. The study concludes that LCS are vital for expanding monitoring capabilities in the Global South, but technical challenges regarding maintenance, data validation, and the lack of standardisation remain. Effective use depends on specialised technical support to ensure data reliability for environmental management and citizen science initiatives.

Keywords: Air Pollution. Environmental Monitoring. Internet of Things. Smart Cities.

Recebido em:
17/02/2026
Revisado em:
13/04/2026
Publicado em:
27/04/2026

1. INTRODUÇÃO

A poluição do ar é o principal fator de risco ambiental para a saúde no mundo. Sendo responsável por cerca de 6,4 milhões de mortes com custo global referentes a mortalidade e morbidade de cerca US\$ 8,1 trilhões, equivalente a 6,1% do produto interno bruto (PIB) global (WORLDBANK, 2022). Atualmente 99% da população global está exposta a condições de ar insalubre, tornando essa uma das principais preocupações ambientais para a saúde e o bem-estar da humanidade, ao lado das mudanças climáticas (IQAIR, 2023).

Dentre os elementos que constituem essas ameaças, existem diferentes tipos de poluentes atmosféricos, ex: materiais particulados (MP), metano, óxido de nitrogênio, dióxido de enxofre e ozônio, entre outros. Entre esses poluentes, estudos recentes têm consistentemente identificado os MP como os mais perigosos para a saúde humana (Yaduma et al., 2013).

Dada à importância do tema, diversas metodologias têm sido postas a prova para contribuir com a geração de dados que subsidiem a produção de indicadores e análises de situação (Martins et al., 2021; Graça et al., 2023).

Porém, apesar dessa importância, a medição de poluentes atmosféricos ainda é um desafio em muitas partes do mundo. Algumas das dificuldades na análise de poluentes atmosféricos são a baixa concentração, a composição química complexa e a presença de misturas de compostos no ar. Na tentativa de captar os diferentes tipos de poluente, dispositivos de monitoramento usam uma variedade de métodos de medição, dependendo da classe de poluentes que está sendo medida (Hernández-Gordillo et al., 2021).

Tradicionalmente são utilizadas estações de monitoramento fixas de alta qualidade para avaliar o impacto da poluição do ar. Essas estações fixas, porém, apresentam alto custo de compra e manutenção, limitando sua ampla utilização. Com isso, a baixa densidade de estações, distribuídas no território impede a obtenção de dados sobre a variabilidade espacial da poluição do ar (Gramsch et al., 2021).

No Brasil, por exemplo, até o mês de janeiro de 2026 havia apenas 247 estações de monitoramento cadastradas no MonitorAr – Sistema de Monitoramento oficial do Ministério do Meio Ambiente. Destas 187 estão localizadas em apenas 4 dos 27 estados do país. Isso demonstra como há uma má distribuição de estações de monitoramento da qualidade do ar no país. Ainda assim, estão ocorrendo avanços como a recente implementação da Política Nacional de Qualidade do Ar (PNQAr) do Brasil (Tavella et al., 2024), que atualizou os parâmetros de qualidade do ar e estabeleceu metas para os próximos 5, 10 e 15 anos.

No entanto, para continuar com esses avanços no monitoramento da qualidade do ar é necessária a produção de dados de alta resolução espacial e temporal que possam fomentar o desenvolvimento de modelos de poluição e exposição mais adequados às diferentes realidades e contextos espaciais, socioeconômicos e ambientais (Ahumada et al., 2022). Por outro lado, as mesmas técnicas poderiam ser aplicadas por meio da miniaturização do sensor, resultando em um dispositivo prático com baixo consumo de energia

Em função dessa realidade é que os sensores de baixo custo (LCS – Low Cost Sensors) surgem como uma alternativa promissora para complementar os dados obtidos pelas estações convencionais. Estes sensores são caracterizados por seu tamanho e peso reduzidos, requisitos de energia relativamente baixos, tempo de resposta curto e adaptabilidade de rede em tempo real. Os LCS geram benefícios como o fornecimento de dados em tempo real, facilidade de uso, e amostragem rápida (Kortoçi et al., 2022); além disso, devido ao seu baixo custo, existe a facilidade de implantação de uma quantidade significativa de sensores o que pode trazer benefícios para um melhor mapeamento da poluição (Li et al., 2020). Essas informações com uma metodologia de correlação adequada podem ser calibradas com estações de referência tornando os dados mais precisos e confiáveis (Romero et al., 2020).

Por isso, o uso de sensores de qualidade do ar de baixo custo em países de baixa renda tem sido uma maneira possível de ajudar a reforçar a capacidade de monitoramento da qualidade do ar e, assim, ajudar a melhorar as estimativas de exposição (Coker et al., 2022). O desenvolvimento desses sensores de baixo custo resultou em uma mudança no paradigma de monitoramento, com uma mudança do modelo centrado em iniciativas governamentais dominante para o estabelecimento de um modelo de redes de monitoramento baseadas na comunidade. A facilidade com que os cidadãos podem adquirir monitores de qualidade do ar levou ao desenvolvimento de vários projetos de crowdsourcing que visam aumentar a densidade das redes de monitoramento em regiões que atualmente não dispõem de equipamentos de monitoramento da qualidade do ar (Tagle et al., 2020).

Embora o uso desses sensores de baixo custo tragam uma série de benefícios, ainda há desafios em relação ao seu uso, sobretudo em relação à qualidade e calibração dos dados dos sensores (Hernández-Gordillo et al., 2021). Por isso se faz necessário conhecer melhor as opções de sensores disponíveis atualmente e seus pontos fortes e fracos.

Com base nisso, elaboramos essa revisão sistemática de literatura com o objetivo de avaliar o estado da arte relativo à utilização de sensores de baixo custo para monitoramento ambiental na América Latina. A partir do qual buscamos responder às seguintes perguntas: 1) Quais os principais sensores utilizados? 2) Quais as principais grandezas físicas analisadas? 3) Qual o custo médio dos sensores de baixo custo? 4) Quantos sensores foram utilizados por cada estudo? 5) Qual a abrangência dos sensores? 5) Qual a abrangência da medição dos sensores? 6) Quantas redes de monitoramento com base em sensores de baixo custo existem no Brasil e na América Latina? 7) Quais são os parâmetros utilizados para avaliar o desempenho dos sensores de baixo custo? 8) E quais Sensores de Referência e duração das Comparações de Dados?

2. MATERIAIS E MÉTODO

A revisão sistemática partiu de um protocolo de pesquisa com auxílio do checklist PRISMA (Page et al., 2021). Com base nesse protocolo foram definidas as características da busca seguindo o roteiro PICOC: a) População: Os artigos que abordam sensores de baixo custo para monitoramento ambiental; b) Intervenção: Análise textual dos artigos sobre o monitoramento de variáveis ambientais relacionadas a poluição atmosférica e serviços ecossistêmicos com sensores de baixo custo; c) Comparação: Sensores de referência para o monitoramento da qualidade do ar; d) Desfecho (Outcome): O custo e a qualidade dos dados e utilização dos sensores de baixo custo utilizados em países da América Latina; e) Contexto: Utilização de sensores de baixo custo desenvolvidos no Brasil e na América Latina.

A partir desse protocolo foram realizadas 7 etapas: 1 – Delimitação da questão a ser pesquisada; 2 – Escolha das fontes de dados; 3 – Eleição das palavras-chave para a busca; 4 – busca e armazenamento dos resultados; 5 – seleção de artigos pelos títulos e resumos de acordo com os critérios de inclusão e exclusão; 6 – Avaliação dos artigos selecionados; 7 – Síntese e interpretação dos resultados. Para a organização dessas etapas utilizamos o software Parsifal, que contém o protocolo da revisão disponível no endereço: <https://parsif.al/luanapessoa/sensores-de-baixo-custo-para-monitoramento-ambiental-na-america-latina-uma-revisao-sistemica-de-literatura/>.

Para a primeira etapa as questões definidas foram: A) Quais os principais sensores utilizados? B) Quais as principais grandezas físicas analisadas? C) Qual o custo médio dos sensores de baixo custo? D) Qual a abrangência dos sensores? E) Quantas cidades no Brasil e na América Latina estão utilizando? F) Quantas redes de monitoramento com base em sensores de baixo custo existem?

Para a segunda etapa foram escolhidas as bases de dados de textos: Scopus e Web of Science. A escolha por essas bases se deu em função da temática multidisciplinar do tema e da abrangência dessas bases de dados. Para as etapas três e quatro foram escolhidas as palavras-chave: “Low-cost Sensor”, “Air Quality”. A escolha destas se deu pela adequação às perguntas elaboradas e após a execução da busca com outras palavras-chave que retornaram resultados específicos demais ou amplos demais. As palavras-chave foram utilizadas com o caractere booleano “AND”, de forma a restringir a pesquisa para materiais bibliográficos que contivessem as duas expressões. Os resultados foram filtrados para selecionar apenas países de afiliação dos autores na América Latina. O material bibliográfico foi exportado das bases, utilizando o formato “.ris” - Research Information Systems.

A quinta etapa, de seleção de artigos pelos títulos e resumos foi realizada com a utilização do software Parsifal. Para tanto, foram utilizados como critérios de inclusão: a) Artigos publicados em revistas ou anais de eventos nos últimos 10 anos; b) nos idiomas Inglês, Português e Espanhol; c) Tratasse do uso de sensores de baixo custo em localidades da América Latina. Como critério de exclusão foram utilizados: a) Materiais que não fossem de origem segura ex.: periódicos predatórios, ou apenas resumos de congressos; b) artigos que não tivessem como foco o uso ou análise de sensores de baixo custo.

Para a sexta etapa de análise dos textos completos, seguindo o protocolo do PARSIFAL foram analisados se os artigos abordavam as seguintes perguntas: 1) Artigo que aborda, como foco, sensores de baixo custo para monitoramento ambiental? 2) Artigo publicado em inglês, português ou espanhol? 3) O artigo é referente a trabalho realizado em países da América Latina? 4) Artigo possui rigor científico, de acordo com critérios metodológicos de clareza e objetividade? Caso a resposta fosse sim a cada uma das perguntas seria atribuído 1 ponto ao artigo, caso a resposta fosse parcialmente a cada uma das perguntas seria atribuída a nota 0,5, e se a resposta fosse não, então era atribuída nota zero. Dessa forma estabelecemos uma nota de corte de 2,5. Artigos com notas inferiores a 2,5 foram eliminados da revisão.

Para a sétima e última etapa da revisão, foi realizada a leitura e análise de todos os estudos selecionados, e para evitar vieses e ajudar na sistematização das informações utilizamos o *NotebookLm* de forma complementar para extração das informações de acordo com as perguntas realizadas.

3. RESULTADOS/ DISCUSSÕES

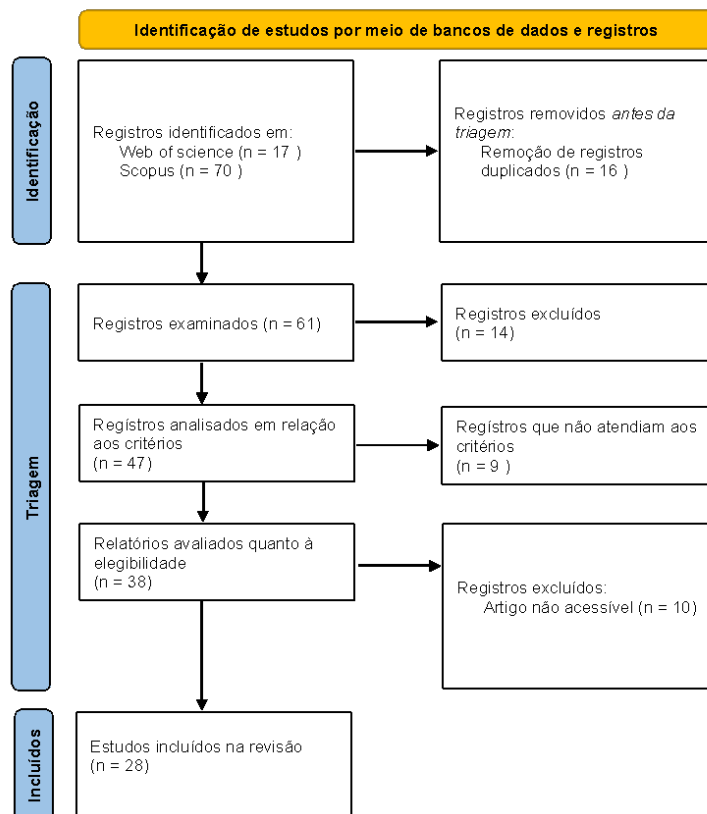
Ao fim da etapa quatro foram encontrados 87 estudos (70 scopus; 17 web of Science). 16 estudos estavam em duplicata. Após a etapa mais 14 foram retirados, dos 61 estudos restantes, 47 foram aceitos após a análise de títulos e resumos. Na etapa seis, a análise de qualidade, a partir das perguntas estabelecidas, mais 9 estudos foram eliminados, e ainda 10 estudos não tiveram o acesso ao material completo disponível. Dessa forma, o conjunto final de estudos que passaram a etapa sete foi constituído de 28 estudos (Figura 1).

Pergunta 1 - Quais os principais sensores utilizados? Incluindo as marcas, fabricantes e modelos
Pergunta 2 - Quais as principais grandezas físicas e parâmetros analisados?

A análise dos 28 artigos selecionados permitiu responder às perguntas elaboradas previamente. Dos 28 artigos analisados, 25 apresentaram dados específicos sobre os modelos e fabricantes dos sensores. Nestes 25 artigos, os parâmetros relacionados a qualidade do ar mais analisados foram: Material Particulado de 2,5 (PM 2,5) em 17 artigos, Material Particulado de 10 (PM 10) em 12 artigos, SO₂ e CO₂ foram monitorados em 6 artigos, NO₂ e CO foram monitorados em 5 artigos, Ozônio (O₃) e Material Particulado de 1 (PM 1,0) foram monitorados em 4 trabalhos, Metano (CH₄) e Compostos Orgânicos Voláteis Totais (TVOC) foram

monitorados em 2 trabalhos. Ainda foram registrados o monitoramento de outras variáveis ambientais em especial Temperatura (T) e Umidade Relativa (UR) em 16 trabalhos e ainda direção e velocidade do vento, iluminação (IL), radiação ultravioleta (UV) e intensidade sonora (DB) (Tabela 1).

Figura 1 - Diagrama de Fluxo PRISMA das etapas de identificação e seleção de estudos para revisão sistemática de literatura



Os principais fabricantes registrados nos trabalhos foram: Alphasense utilizada em 5 trabalhos; Sensirion e Nova Fitness utilizadas em 4 trabalhos; Bosch utilizados em 3 trabalhos; Plantower, Winsen, Henan Hanwei, Shinyei e Sharp utilizados em 2 trabalhos; Scentroid, Spec Sensor, Clarity, Mocon, PurpleAir, OSRAM, Iqair, Airbeam, SAINS-MART, Dylos utilizados em ao menos 1 trabalho cada.

A análise desses artigos revela a diversidade de sensores e tecnologias utilizadas para monitorar a qualidade do ar, através do uso de sensores de baixo custo. De acordo com os artigos analisados, foram utilizados sensores de ao menos 20 fabricantes e modelos distintos. Importante destacar que destes os fabricantes: Aeroqual, AQMesh, Purple Air, Iqair e Airbeam produzem soluções de monitoramento completas, sejam estações fixas ou portáteis enquanto os demais vendem sensores que podem ser utilizados na montagem de diferentes soluções de monitoramento.

Tabela 1 – Principais sensores de baixo custo utilizados para medição de qualidade do ar e parâmetros ambientais identificados nos registros analisados.

Autores	Fabricantes	Modelo	Parâmetros
(Ahumada et al., 2022)	Alphasense	B4 e B43F	SO ₂ ;NO ₂ ;T;UR

(Gamboa et al., 2023)	Scentroid	DR1000L	CO;O3
(Martinez-Soto et al., 2021)	Sensirion	SPS 30	PM 2,5;PM10
(Vazquez-Vera et al., 2020)	Plantower	PMS7003 e PMS5003	PM1,0;PM2,5;PM10; T; UR
(Hernández Rodríguez et al., 2023)	Alphasense	B4 e B43F	SO2;NO2;T;UR
(Astudillo et al., 2020)	Spec Sensors/BOSCH/Plastic Cap	SPECCO/BMP280/MQ131/MG811/MQ4	CO;O3;CO2;CH4;T;UR
(Laura & Nestor, 2019)	Clarity		PM2,5
(Araújo et al., 2023)	Winsen/Henan Hanwei	MH Z16 e MG 811	CO2, T, UR
(Ortiz et al., 2018)	SAINS-MART /Sharp	MQ135/GP2Y10	PM2,5;CO2, T, UR
(Araújo et al., 2020)	Winsen/Henan Hanwei	MH Z16 e MG 811	CO2, T, UR
(Candia et al., 2018)	Nova Fitness/Shinyei	SDS011/SDS021/PPD42	PM2,5;PM10
(Reece et al., 2018)	Alphasense/MOCON	OPC-N2/Mocon piD-TECH	NO2;PM2,5;T;UR
(Subramanian et al., 2018)	Alphasense/Sensing	B4/CO2S-A	SO2;CO;CO2;T;UR
(Romero et al., 2020)	PurpleAir	PA-II-SD	PM2,5;PM10;T;UR
(Albarracín et al., 2023)	Davis AirLink/Tisch	TE-6070V	PM1,0;PM2,5;PM10; T; UR;TVOC
(Gramsch et al., 2020)	Dylos	DC1100 Pro	PM2,5;PM10;T;UR
(Coker et al., 2022)	PurpleAir	PA-II-SD	PM2,5;T;UR
(Tagle et al., 2020)	Nova Fitness	SDS011	PM2,5;PM10;T;UR
(Muñoz et al., 2023)	Sensirion	SPS 30	PM2,5
(Gramsch et al., 2021)	Plantower/Nova Fitness/Sensirion	PMS 7003/SDS011/SHT30	PM2,5;PM10;T;UR
(Cardoso & Blawid, 2022)	Sensirion/Bosch/OSRAM	SGP30/SHT31/BME680/TSL2561	TVOC;IL;T;UR
(Villanueva et al., 2023)	Iqaiir/AIRBeam	Airvisual/PMS7003	PM1,0;PM2,5;PM10; T; UR
(Montalvo et al., 2022)	Alphasense		SO2;NO2;CO;O3;PM2,5;PM10;T;UR
(Guanochang a et al., 2018)	SAINS-MART/Sharp/Bosch/Hanwei	MQ7/MG811/MQ4/MQ136/MICS2714/HKA5	SO2;NO2;CO;PM2,5;PM10;CO2;CH4;TVOC
(Lopez-Restrepo et al., 2021)	Shinyei/Nova Fitness/Bjhike	PPD42NS/SDS011/HK-A5	SO2;O3;PM1,0;PM2,5;PM10;T;UR

Os resultados desta pesquisa reforçam o fato do PM2,5 ser o poluente mais estudado globalmente. O PM2,5 tornou-se o poluente atmosférico mais amplamente estudado devido a uma conjunção de fatores relacionados à saúde, ao meio ambiente e à ciência (Jia *et al*, 2023). Estes fatores vão desde o seu potencial impacto na saúde de organismos vivos devido a seu tamanho, até o custo dos sensores para realizar sua medição. E estes estudos ganharam ainda maior impulso durante e após a Pandemia de Covid-19 (Ishmatov, 2022), quando fatores que influenciavam a saúde respiratória tiveram sua importância ainda mais evidenciada.

Pergunta 3 - Qual o custo médio dos sensores de baixo custo para Monitoramento da Qualidade do Ar?

Outra informação importante que se buscou responder com essa revisão, foi sobre o custo médio deste tipo de sensor utilizado para o monitoramento da qualidade do ar. A imensa maioria dos artigos não apresenta dados sobre o custo dos sensores utilizados. Ainda assim foi possível identificar o preço para ao menos 8 sensores de diferentes fabricantes, com o preço médio de US\$ 672,55. O preço dos sensores variou de um mínimo de US\$ 71 da Sensirion, com dois sensores um para Material Particulado (1,0;2,5; 4,0;10,0) e outro para CO₂, temperatura e humidade, até o preço máximo de US\$ 1573 da fabricante alphasense que contém mais de 15 itens entre sensores e materiais auxiliares para montagem e capacidade de monitoramento dos parâmetros Material Particulado (1,0;2,5; 4,0;10,0), CO₂, NO₂, SO₃, O₃, CO, TVOC, H₂S (Tabela 2).

Tabela 2 - Preço de aquisição dos sensores de baixo custo para monitoramento de diferentes parâmetros de qualidade do ar.

Sensores	Preço US\$	Preço BRL
IqAir Outdoor	\$ 608,00	R\$ 3.399,94
GAIA (Iqcn)	\$ 200,00	R\$ 1.118,40
Purple Air	\$ 299,00	R\$ 1.672,01
Clarity	\$ 1.400,00	R\$ 7.828,80
Winsen	\$ 1.120,00	R\$ 6.263,04
Airbeam	\$ 119,00	R\$ 665,45
Alphasense	\$ 1.563,00	R\$ 8.740,30
Sensirion SPS30 + SCD30	\$ 71,40	R\$ 399,27

Nota: *Para conversão de dólar para real, foi utilizado o valor de R\$5,5920, como preço médio do dólar no ano de 2025. É importante destacar que muitos desses sensores são comprados em transações internacionais que são sujeitas a tributação extra, o que pode aumentar os valores finais para aquisição.

Os custos de medição de poluentes atmosféricos ainda se mostram como um impedimento para o melhor entendimento de seus efeitos em determinadas partes do mundo (Gramsch et al., 2021). Os dados apresentados aqui demonstram que os chamados sensores de baixo custo, apresentam uma variação grande de valores. Considerando apenas o custo destes, pode se pensar neles como uma alternativa que atenda sobretudo as partes do mundo em desenvolvimento. Uma vez que essas regiões apresentam menos capacidade financeira para adquirir sensores de referência e ao mesmo tempo maior necessidade de geração de dados sobre poluição.

Pergunta 4 - Quantos sensores foram utilizados por cada estudo?

O estudo que utilizou a maior quantidade de sensores listados individualmente foi Araújo et al. (2023), que utilizou um total de 22 Sensores, incluindo 18 sensores climáticos (três unidades de seis modelos diferentes: DS18B20, AM2302, HTU21D, BMP180, BME280 e MPL3115A2) e 4 sensores de CO₂ (duas unidades de MG-811 e duas de MH-Z16). Em geral se observa que estudos focados em Material Particulado frequentemente utilizaram múltiplas unidades para validação ou monitoramento distribuído: Reece et al. (2018) utilizaram nove sensores de PM_{2.5} (OPC-N2), além de quatro sensores de NO₂ (caireclip) e quatro estações meteorológicas (Vantage Vue). Tagle et al. (2020) implementaram sete sensores de baixo custo do modelo SDS011 para avaliar a variabilidade entre as unidades, além de um sensor BME280 para T/U. Martinez-Soto et al. (2021) utilizaram um total de seis sensores, combinando 3 monitores de referência Met One BAM-1020 com 3 sensores de baixo custo Sensirion SPS30. Vazquez-Vera et al. (2020) usaram cinco sensores Plantower, sendo quatro PMS7003 e um PMS5003 como referência. Já Ahumada et al. (2022) utilizando dois módulos com quatro sensores eletroquímicos no total, da fabricante Alphasense para gases (SO₂ com B4 e NO₂ com

B43F), Gamboa et al. (2023) utilizaram um monitor Scentroid DR1000L que continha os três sensores para CO, O3 e SO2. O estudo de Ortiz et al. (2018) destacou a utilização de sensores analógicos de baixo custo como SAINS-MART MQ135 (CO2), Sharp GP2Y10 (PM2.5) e LM35 (Temperatura). A quantidade de sensores utilizados em cada estudo variou de acordo com os objetivos da pesquisa e os recursos disponíveis. Alguns estudos utilizaram apenas um ou dois sensores, enquanto outros utilizaram dezenas de sensores em redes de monitoramento (Tabela 3).

Tabela 3 – Quantidade de Sensores Utilizados em cada estudo analisado.

Autores (Ano)	Variáveis Medidas	Quantidade Total de Sensores Mencionados	Marca/Modelo dos Sensores utilizados
Ahumada et al. (2022)	SO2, NO2, T/U	4 eletroquímicos + 2 T/U (Total: 6)	Alphasense B4 (SO2), Alphasense B43F (NO2)
Gamboa et al. (2023)	CO, O3, SO2	3 sensores	Monitor Scentroid DR1000L
Martinez-Soto et al. (2021)	PM2,5, PM10	6 sensores (3 referência + 3 baixo custo)	Met One BAM-1020 (referência), Sensirion SPS30 (baixo custo)
Vazquez-Vera et al. (2020)	Material Particulado (MP)	5 sensores (4 + 1 referência)	Plantower PMS7003 (4 unidades), Plantower PMS5003 (1 unidade, referência)
Araújo et al. (2023) RSL 16.pdf	CO2, T/U (referência)	4 sensores de CO2	MG-811 (2 unidades), MH-Z16 (2 unidades) 6 modelos climáticos
Araújo et al. (2023) RSL 21.pdf	T, U, P, CO2	22 sensores (18 climáticos + 4 CO2)	(DS18B20, AM2302, HTU21D, BMP180, BME280, MPL3115A2) ; 2 modelos CO2
Ortiz et al. (2018)	CO2, PM2.5, T	Mínimo de 3 (no nó analógico); quantidade total não especificada	Nó analógico: SAINS-MART MQ135 (CO2), Sharp GP2Y10 (PM2.5), LM35 (T)
Candia et al. (2018)	Material Particulado (MP)	Número de unidades não informado	Nova SDS011, Nova SDS021, SHINYEI PPD42
Reece et al. (2018)	PM2.5, NO2, Meteorológicos	17 unidades (9 PM2.5, 4 NO2, 4 estações)	OPC-N2 (PM2.5), cairclip (NO2), Vantage Vue (estações meteorológicas)
Gramsch et al. (2020)	PM10, PM2.5	10 sensores (um por estação implementada)	Dylos C1100
Tagle et al. (2020)	PM10, PM2.5, T/U	7 sensores SDS011 (+ BME280 e ESP8266/NodeMCU no protótipo)	SDS011 (PM), BME280 (T/U)
Gramsch et al. (2021)	PM10, PM2.5, T, U	Número de unidades não especificado	Plantower, Nova Fitness (além do monitor de baixo custo – LCM)
Villanueva et al. (2023)	PM, T, U	Utilizou dois conjuntos de sensores ; quantidade exata não especificada	Sensores de diferentes fabricantes
Guanochanga et al. (2018)	CO, CO2, CH4, SO2, H2S, NO2, PM	7 sensores	Modelos não especificados

Os resultados deste ponto, mostrando que o número de sensores utilizados em cada estudo parece reforçar o fato de que os sensores de baixo custo está sendo utilizado

majoritariamente por iniciativas de pesquisa e ciência cidadã (Tagle et al., 2020). Essa realidade pode estar ligada primeiramente as limitações desta pesquisa, mas também ao fato de que esses sensores e suas possibilidades de uso, ainda estão em testes por acadêmicos e muitas vezes são desconhecidos por técnicos que trabalham na administração direta, como municípios e órgão de meio ambiente. Por outro lado, é possível que muitas iniciativas de uso de sensores de baixo custo por parte de órgãos públicos não gerem pesquisas acadêmicas, não sendo possível de serem encontradas em uma revisão com um escopo acadêmico. Ainda há, como no Brasil, questões de natureza regulatória, uma vez que as normativas federais ainda desconsideram o uso dos sensores de baixo custo por parte de órgãos ambientais.

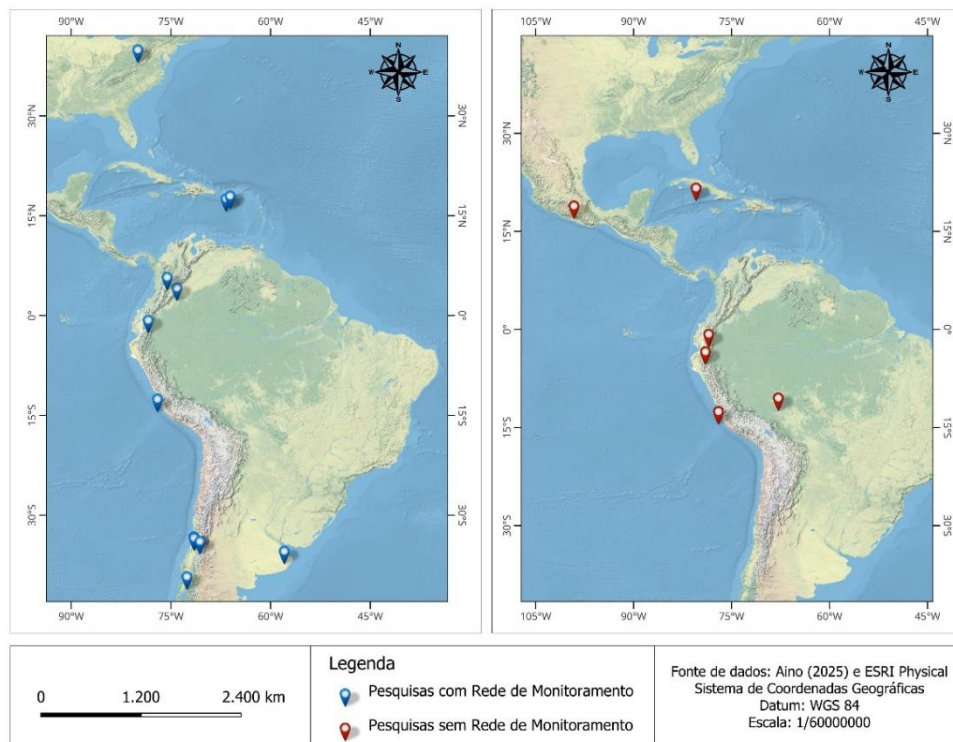
Perguntas 5 - Qual a abrangência da medição dos sensores? Ou até qual distância esses sensores são capazes de medir a poluição?

Os dados fornecidos nos artigos analisados não especificam diretamente a abrangência ou a distância máxima de medição da maioria dos sensores de poluição mencionados. A informação crucial sobre a área ou volume de ar que os sensores analisam para detectar poluentes também não é apresentada. (Gramsch et al., 2020) informa que as estações instaladas por eles tinham uma distância máxima de 5km entre elas. outros se referem ao fato que os sensores instalados captam a qualidade do ar no ambiente ao seu redor ou que as medidas se limitam ao seu ponto de instalação. Essa informação, assim como o número de sensores, tem implicação direta na possibilidade de implementação de uma rede de monitoramento. Uma vez que uma das vantagens dos sensores de baixo custo é poder gerar uma variedade de dados espacializados.

Pergunta 6 - Em quais trabalhos foram montadas redes de monitoramento?

Considerando que a possibilidade de maior espacialização na análise de dados, é um dos principais argumentos em prol dos se LCS, procuramos analisar quais dentre os artigos revisados, relatam casos de montagens de redes de monitoramento. Nesta revisão foram encontrados estudos que montaram experimentos de monitoramento em 17 cidades em diferentes países da América Latina. Dos quais 11 estudos montaram redes de monitoramento com mais de 3 localidades sendo monitoradas simultaneamente enquanto estudos em 6 localidades utilizaram experimentos de campo para comparação ou validação dos sensores utilizados (Figura 2). Essas redes variam em tamanho, tipos de sensores e objetivos de pesquisa.

Figura 2 - Mapa de Localização dos estudos com sensores de baixo custo que montaram redes de monitoramento.



Dentre as redes identificadas destacam-se o trabalho de Ahumada et al., (2022) que utilizou uma rede de quatro estações de monitoramento de referência na área industrial da Baía de Quintero, Chile, para treinar e testar módulos de sensores de baixo custo para SO₂ e NO₂. As estações de monitoramento de referência já existentes foram utilizadas para avaliar a performance dos sensores de baixo custo.

Já no trabalho de Martinez-Soto et al., (2021) foram utilizados seis sensores, três monitores de referência (BAM-1020) e três sensores de baixo custo (Sensirion SPS30) em Temuco, Chile, para investigar a relação entre temperatura e poluição do ar. Esse trabalho é parte de uma rede de 30 sensores em Temuco, desenvolvida pelo Centro de Estudos de Engenharia de Software da Universidad de La Frontera (UFRO) com apoio da prefeitura.

Já o trabalho de (Laura & Nestor, 2019) avaliou o desempenho de três sensores Clarity de baixo custo para PM_{2.5} em Bogotá, Colômbia. Os sensores foram instalados nos mesmos locais de estações de referência da rede de monitoramento de Bogotá: Usaquén, Ferias e Kennedy. Embora a pesquisa tenha utilizado três sensores em diferentes locais, não fica claro se eles formavam uma rede integrada ou se operavam de forma independente.

No trabalho de Candia et al. (2018) foi elaborado uma rede de monitoramento da qualidade do ar baseado em uma rede LoRaWAN com sensores portáteis de baixo custo em La Plata, Argentina. Como prova de conceito, foi implementada uma rede piloto com cinco gateways LoRaWAN em diferentes pontos da região da Grande La Plata.

Outro trabalho foi o de Gramsch et al. (2020) onde foi implementada uma rede de dez sensores Dyllos de baixo custo em Concón, Chile, para mapear a concentração de PM_{2.5} na cidade. A rede foi instalada em casas de moradores e locais públicos, fornecendo dados sobre a variação espacial e temporal da poluição.

No trabalho de Muñoz et al. (2023), os pesquisadores construíram uma rede de 21 sensores do modelo Sensirion SPS30 que foram calibrados e utilizados para medir PM_{2.5} em Temuco, Chile. Os sensores foram instalados em diferentes locais da cidade, incluindo escritórios públicos, escolas e residências, com o objetivo de coletar dados sobre a poluição por fumaça de madeira em diferentes setores.

Já Lopez-Restrepo et al., (2021) utilizaram uma rede hiperdensa de baixo custo com 255 sensores de PM_{2.5} no Vale do Aburrá, Colômbia. A rede, desenvolvida pelo projeto SIATA, abrange Medellín e sua área metropolitana, complementando a rede oficial de monitoramento de alta qualidade. Os sensores da rede de baixo custo estão localizados em casas e instituições, fornecendo uma alta densidade de dados para análise da qualidade do ar.

É importante destacar que a definição de "rede de monitoramento" pode variar entre os estudos. Alguns trabalhos utilizaram redes pré-existentes como referência, enquanto outros implementaram suas próprias redes com sensores de baixo custo. As informações sobre a quantidade de sensores, sua distribuição espacial e o período de monitoramento variam entre os estudos. É fundamental considerar o contexto de cada pesquisa, os objetivos específicos e as limitações de cada rede de monitoramento para interpretar os resultados.

Ressaltamos ainda que existem redes globais de sensores de baixo custo como as mantidas pela Iqair¹ e a aqicn². Essas redes apresentam milhares de sensores espalhados de maneira heterogênea pelo mundo. E permitem o acesso aos dados dos parâmetros de qualidade do ar em diferentes níveis. Isso demonstra que a implementação de redes de monitoramento com sensores de baixo custo apresenta um grande potencial para ampliar a compreensão da qualidade do ar em diferentes contextos, especialmente em áreas com poucos dados de monitoramento oficial.

Perguntas 7 e 8 - Quais são os parâmetros utilizados para avaliar o desempenho dos sensores de baixo custo? E quais Sensores de Referência e duração das Comparações de Dados?

Apesar da importância dos sensores de baixo custo ficar evidente a cada dia, um ponto de extrema importância é a validação dos dados gerados. Por isso, diversos parâmetros são utilizados para avaliar o desempenho desses sensores no monitoramento da qualidade do ar. Esses parâmetros ajudam a determinar a precisão, a confiabilidade e a adequação dos sensores.

Entre os parâmetros utilizados, os artigos aqui consultados ressaltam: 1) A precisão: que indica a dispersão das medidas obtidas pelo sensor em torno de um valor médio. Sensores com alta precisão produzem medidas com pouca variação; 2) O Viés: representa a diferença sistemática entre a medida média do sensor e o valor real da concentração do gás. Um viés alto indica que o sensor está superestimando ou subestimando a concentração do gás. 3) Exatidão: reflete a proximidade das medidas do sensor em relação ao valor real da concentração do gás. É influenciada tanto pela precisão quanto pelo viés.

Considerando a imperatividade da calibração dos LCS, buscamos identificar como foi feita essa calibração nos estudos analisados. Dentre os artigos que realizaram algum tipo de calibração, cinco estudos utilizaram métodos de regressão linear, em geral comparando os dados dos LCS com os dados de sensores de referência. Dois trabalhos utilizaram algoritmos de Machine Learning ou Redes Neurais para comparação dos dados dos LCS com dados de sensores de referência, e ao menos um trabalho utilizou um método experimental com análise de uma quantidade conhecida de gases em uma câmara hermética (Tabela 4).

O uso da Regressão Linear Múltipla se apresentou como método eficaz para melhorar as medições de gases como SO₂ e NO₂ no estudo de Ahumada et al. (2022). Essa calibração reduziu desvios e tornou os dados mais confiáveis. Também foi possível identificar o uso de Redes Neurais como método que apresentou melhora considerável na calibração de sensores Dylos para PM_{2.5} em comparação com o monitor BAM, aumentando a correlação de 0,638 para 0,742 e diminuindo o nRMSE (Gramsch et al., 2020). Embora o uso do Machine Learning

¹ <https://www.iqair.com/air-quality-map?lat=-8.00889&lng=-34.8553&zoomLevel=10>

² <https://aqicn.org/>

tenha aprimorado ligeiramente a precisão dos sensores de CO₂, ela não garantiu o atendimento aos parâmetros nominais (Araújo et al., 2023).

A calibração destes dados é de suma importância no caso dos LCS em função da influência de fatores ambientais, da composição do material particulado (MP) e da Umidade Relativa (UR). Tagle et al. (2020) observaram viés considerável nas medições de PM_{2.5}: superestimação quando a UR excedia 75% e subestimação quando a UR estava abaixo de 50%. Em relação a temperatura, Ahumada et al. (2022) confirmaram que a temperatura afeta a precisão. Além disso, Romero et al. (2020) notaram que a temperatura era um parâmetro meteorológico mais influente do que a umidade relativa. Em relação específica a composição do MP, a correlação entre os LCS e os instrumentos padrão varia muito dependendo da composição das partículas. Locais com maior concentração de sulfato, nitrato ou SO₂ apresentaram baixa correlação, enquanto aqueles com carbono orgânico e carbono negro mostraram melhor correlação.

Ainda no que diz respeito a validação dos dados de LCS, há a necessidade de exposição destes as variações do ambiente. Por isso, os estudos apresentam uma grande variação na duração das comparações. Foi possível identificar estudos que buscaram uma validação de longo Prazo, como o artigo de Laura & Nestor (2019) que utilizaram dados coletados por 4 meses para comparar os sensores Clarity. E no estudo de Araújo et al. (2023) que conduziram um experimento de campo de longa duração por aproximadamente seis meses (Agosto/2016 a Fevereiro/2017). Já o estudo de calibração com um experimento em câmaras herméticas, como o artigo de Martinez-Soto et al. (2021), foi concluído em apenas 8 horas. Por outro lado, o treinamento de Sensores (de gases específicos, como o NO₂ realizado por Ahumada et al. (2022), exigiu períodos de 25 a 45 dias.

Tabela 4 - Comparação entre os parâmetros utilizados para avaliar o desempenho dos sensores de baixo custo com Sensores de Referência do tempo de análise

Autores (Ano)	Parâmetro de Avaliação	Sensor de Baixo Custo (LCS)	Sensor de Referência	Método Estatístico / Calibração	Resultado dos Modelos Estatísticos	Tempo de Duração
Gamboa et al. (2023)	CO, O3, SO2; Desvio de linha de base, linearidade, precisão, viés, exatidão, interferência.	DR1000L (Scentroid)	Analísadores Thermo Scientific Séries I e IQ (FRM certificado pela EPA)	Linearidade (R ² ADJ), Precisão, Viés	Excelente linearidade (R²ADJ ~1) , Alta precisão (>89%), Baixo viés. Interferência cruzada.	60 dias
Ahumada et al. (2022)	SO2, NO2. Efeito de Temperatura/Umidade (T/U) na precisão.	Alphasense SO ₂ -B4, Alphasense NO ₂ -B43F	Thermo Scientific 43i (SO2) e 42i (NO2)	Regressão Linear Múltipla (MLR).	MLR melhorou significativamente as medições. A calibração reduziu desvios.	Treinamento de NO2: 25 dias e SO2 45 dias.
Araújo et al. (2023)	CO2; Desempenho e precisão com e sem calibração.	Sensores de CO2 (e.g., MG-811, MH-Z16)	Instrumento Vaisala GM70 com sonda de CO2	Machine Learning (ML), Regressão Linear.	Aprimorou ligeiramente a precisão.	Experimentos de exposição: 45 horas. Experimento de campo: 7 meses
Gramsch et al. (2020)	PM2.5; Necessidade de calibração <i>in situ</i> .	Dylos	Monitor BAM	Rede Neural	Rede Neural melhorou a correlação (de 0,638 para 0,742).	Duração não especificada.
Romero et al. (2020)	PM2.5, PM10, T, UR; Correlação entre dados do sensor e referência.	PurpleAir	Medições de referência	Correlação (r ²)	Bom desempenho para PM, mas não para T/UR.	Duração não especificada.
Laura & Nestor (2019)	PM2.5; Comparação sob condições de umidade variável.	Sensores Clarity	Estações de referência da rede de Bogotá	Dois modelos de regressão	Resultados variaram entre ruim e regular.	4 meses (Nov/2018 a Mar/2019), dados horários.
Tagle et al. (2020)	PM2.5, PM10, UR; Variabilidade entre unidades e viés relacionado à UR.	SDS011 (PM), BME280 (T/U)	Dados de referência	Análise de Linearidade, Viés (médias de 24h e 1h).	Desempenho adequado para PM2.5 (superestimação se UR > 75%; subestimação se UR < 50%).	Duração não especificada.
Martinez-Soto et al. (2021)	PM2.5, PM10; Calibração.	Sensirion SPS30	Espectrômetro de aerossol a laser Grimm 11-E	Calibração em câmara hermética	Resultados estatísticos não detalhados.	8 horas (calibração em câmara hermética).
Coker et al. (2022)	PM2.5; Associação com hospitalizações respiratórias.	Sensores de baixo custo (não especificado)	Não especificado	Comparação de valores brutos vs. Corrigidos (fórmula USEPA)	Associações mais fortes para concentrações corrigidas	Duração não especificada.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A elaboração dessa revisão sistemática de literatura permitiu responder a quase todas as perguntas elaboradas em seu escopo. Identificamos que os principais sensores utilizados nos artigos revisados foram das marcas Alphasense (utilizados em 5 trabalhos), Sensirion e Nova Fitness (Utilizados em 4 trabalhos). Destacando que estes são equipamentos cujos sensores precisam ser montados e não soluções prontas para uso.

Também foi possível destacar que as principais grandezas físicas analisadas foram Material Particulado de 2,5 (PM 2,5) em 17 artigos, Material Particulado de 10 (PM 10) em 12 artigos, SO₂ e CO₂ em 6 artigos, NO₂ e CO em 5 artigos, Ozônio (O₃) e Material Particulado de 1 (PM 1,0) em 4 trabalhos, Metano (CH₄) e Compostos Orgânicos Voláteis Totais (TVOC) foram monitorados em 2 trabalhos. Esses dados ressaltam que o PM_{2,5} além de considerado hoje o poluente de maior importância para a saúde humana, é também o mais monitorado. Esses resultados parecem destacar esse movimento de preocupação em entender a situação atual de exposição a poluição por PM 2,5. Mas também evidenciam a lacuna em relação ao monitoramento dos demais poluentes atmosféricos. Evidenciando aí um potencial lacuna de conhecimento e campo aberto para novas pesquisas.

Nossos resultados também evidenciaram um dado pouco divulgado, mas fundamental para essa área de atuação que se baseia no uso de sensores de baixo custo. Nosso levantamento mostrou que esses sensores podem custar entre US\$ 71 e US\$ 1500. Valores que em se considerando a realidade do sul global, das iniciativas de ciência cidadã e do subfinanciamento de instituições de pesquisas, podem inviabilizar o uso mesmo destes sensores de baixo custo. Esse dado também lança luz sobre uma potencial explicação para a maior utilização de sensores para PM 2,5, uma vez que estes em geral apresentam um custo menor que os sensores de outros gases como NO₂, SO₂, ou O₃.

Uma pergunta que não conseguimos responder com essa revisão foi a abrangência destes sensores. Não encontramos informações sobre qual distância do raio de alcance destes sensores para captar a presença de poluentes, a partir do seu ponto de emissão. Essa é uma questão fundamental, apesar de compreensível a não existência de um dado exato, em função da influência das características do ambiente natural e construído que podem influenciar. Ainda assim, considerando que a possibilidade de medição em um maior número de áreas por seu custo mais baixo, se faz importante saber a que distância esses sensores devem estar das fontes de emissão para que consigam ser custo-efetivos em seu uso e na criação de redes de monitoramento que democratizem o acesso à informação.

Assim, nossos resultados demonstraram que ao menos 11 cidades na América Latina, já tem alguma rede de monitoramento utilizando sensores de baixo custo. Nesse ponto, é fundamental destacar que outras redes com sensores de baixo custo são conhecidas tanto no âmbito da América Latina, como globais. Por isso, apesar de sabidamente nesta região termos uma grande lacuna de monitoramento da qualidade do ar, algumas iniciativas já estão se formando. Em geral por ações de Universidades e Organizações da Sociedade Civil.

No entanto, se faz necessário a advertência de que os sensores de baixo custo geralmente apresentam menor precisão e confiabilidade em comparação com os equipamentos de referência. E que suas leituras podem ser afetadas por fatores ambientais como temperatura, umidade, interferência de outros gases e envelhecimento do sensor. Portanto, a calibração dos sensores de baixo custo é essencial para garantir a qualidade dos dados. Essa calibração pode ser complexa, demandar tempo e recursos, o que destaca a necessidade de participação de técnicos capacitados mesmo em iniciativas de ciência cidadã. Além disso, esses podem exigir manutenção e substituição mais frequentes do que os equipamentos de referência,

especialmente em ambientes externos. Ainda existe uma falta de padronização entre os fabricantes que pode dificultar a comparação de dados e a integração de diferentes plataformas.

Ainda assim, é inegável que os sensores de baixo custo para monitoramento da qualidade do ar apresentam um grande potencial para complementar as redes de monitoramento tradicionais, especialmente em países em desenvolvimento. No entanto, é crucial entender as vantagens e desvantagens desses sensores em comparação com os equipamentos de referência.

5. REFERÊNCIAS

AHUMADA, S., TAGLE, M., VASQUEZ, Y., DONOSO, R., LINDÉN, J., HALLGREN, F., SEGURA, M., & OYOLA, P. Calibration of SO₂ and NO₂ Electrochemical Sensors via a Training and Testing Method in an Industrial Coastal Environment. *Sensors*, 22(19). 2022. <https://doi.org/10.3390/s22197281>

ALBARRACÍN, K. Y. A., CONSUEGRA, A. A., & AGUILAR-ARIAS, J. Particulate matter 10 µm (PM 10), 2.5 µm (PM 2.5) datasets gathered by direct measurement, low-cost sensor and by public air quality stations in Fontibón, Bogotá D.C., Colombia. *Data in Brief*, 2023(49), 109323. 2023. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.c.6439400.v7>

ARAÚJO, T., SILVA, L., AGUIAR, A., & MOREIRA, A. Calibration Assessment of Low-Cost Carbon Dioxide Sensors Using the Extremely Randomized Trees Algorithm. *Sensors*, 23(13).2023. <https://doi.org/10.3390/s23136153>

ARAÚJO, T., SILVA, L., & MOREIRA, A. Evaluation of Low-Cost Sensors for Weather and Carbon Dioxide Monitoring in Internet of Things Context. *Internet of Things*, 1(2), 286–308. 2020. <https://doi.org/10.3390/iot1020017>

ASTUDILLO, G. D., GARZA-CASTANON, L. E., & MINCHALA AVILA, L. I. Design and Evaluation of a Reliable Low-Cost Atmospheric Pollution Station in Urban Environment. *IEEE Access*, 8, 51129–51144.2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2980736>

CANDIA, A., REPRESA, S. N., GIULIANI, D., LUENGO, M. A., PORTA, A. A., & MARRONE, L. A. Solutions for SmartCities: Proposal of a monitoring system of air quality based on a LoRaWAN network with low-cost sensors. *Congreso Argentino de Ciencias de La Informatica y Desarrollos de Investigacion, CACIDI*. 2018. <https://doi.org/10.1109/CACIDI.2018.8584183>

CARDOSO, F., & BLAWID, S. Monitoring the Daily Rhythm of Total Green Leaf Volatiles with a Low-Cost Multi-Sensor Node. 2022 *Symposium on Internet of Things, SIoT 2022*. <https://doi.org/10.1109/SIoT56383.2022.10069883>

COKER, E. S., BURALLI, R., MANRIQUE, A. F., KANAI, C. M., AMEGAH, A. K., & Gouveia, N. Association between PM_{2.5} and respiratory hospitalization in Rio Branco, Brazil: Demonstrating the potential of low-cost air quality sensor for epidemiologic research. *Environmental Research*, 214(214).2022. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113738>

GAMBOA, V. S., KINAST, É. J., & PIRES, M. System for performance evaluation and calibration of low-cost gas sensors applied to air quality monitoring. *Atmospheric Pollution Research*, 14(2).2023. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101645>

GRAMSCH, E., MORALES, L., BAEZA, M., AYALA, C., SOTO, C., NEIRA, J., PÉREZ, P., & MORENO, F. Citizens' surveillance micro-network for the mapping of PM_{2.5} in the city of

Concón, Chile. **Aerosol and Air Quality Research**, 20(2), 358–368.2020. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2019.04.0179>

GRAMSCH, E., OYOLA, P., REYES, F., VÁSQUEZ, Y., RUBIO, M. A., SOTO, C., PÉREZ, P., MORENO, F., & GUTIÉRREZ, N. Influence of Particle Composition and Size on the Accuracy of Low Cost PM Sensors: Findings From Field Campaigns. **Frontiers in Environmental Science**, 9 (November 2021).2021. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.751267>

GUANOCHANGA, B., CACHIPUENDO, R., FUERTES, W., BENÍTEZ, D. S., TOULKERIDIS, T., TORRES, J., VILLACÍS, C., TAPIA, F., & MENESES, F. Towards a Real-Time Air Pollution Monitoring Systems Implemented using Wireless Sensor Networks: Preliminary Results. 2018 IEEE **Colombian Conference on Communications and Computing (COLCOM)**.2018.

HERNÁNDEZ RODRÍGUEZ, E., MARTÍNEZ, A., SCHALM, O., AMALIA GONZÁLEZ RIVERO, R., & HERNÁNDEZ SANTANA, L. Diseño de un sistema de medición y monitoreo de variables asociadas a calidad del aire. **RIELAC**, 44(2), 2304.2023. 2023. <https://rielac.cujae.edu.cu/index.php/rieac/article/view/933>

HERNÁNDEZ-GORDILLO, A., RUIZ-CORREA, S., ROBLEDO-VALERO, V., HERNÁNDEZ-ROSALES, C., & ARRIAGA, S. Recent advancements in low-cost portable sensors for urban and indoor air quality monitoring. **Air Quality, Atmosphere and Health**, 14(12), 1931–1951.2021. <https://doi.org/10.1007/s11869-021-01067-x>

IQAIR. **World Air Quality Report**. 2023. Disponível em: <https://www.iqair.com/world-most-polluted-countries>.

ISHMATOV, A. “SARS-CoV-2 is transmitted by particulate air pollution”: Misinterpretations of statistical data, skewed citation practices, and misuse of specific terminology spreading the misconception. **Environmental Research**, Volume 204, Part B, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112116>.

Jia, N., Li, Y., Chen, R., & Yang, H. (2023). A Review of Global PM_{2.5} Exposure Research Trends from 1992 to 2022. **Sustainability**, 15(13), 10509. <https://doi.org/10.3390/su151310509>

KORTOÇI, P., MOTLAGH, N. H., ZAIDAN, M. A., FUNG, P. L., VARJONEN, S., REBEIRO-HARGRAVE, A., NIEMI, J. V., NURMI, P., HUSSEIN, T., PETÄJÄ, T., KULMALA, M., & TARKOMA, S. (2022). Air pollution exposure monitoring using portable low-cost air quality sensors. **Smart Health**, 23, 100241. <https://doi.org/10.1016/j.smhl.2021.100241>

LAURA, R., & NESTOR, R. . Evaluation of the performance of low-cost sensors as a complement to the Bogotá Air Quality Monitoring Network. **Conference Proceedings - Congreso Colombiano y Conferencia Internacional de Calidad de Aire y Salud Publica, CASAP 2019**, 2019-January.2019. <https://doi.org/10.1109/CASAP48673.2019.9364031>

LI, J., MATTEWAL, S. K., PATEL, S., & BISWAS, P. (2020). Evaluation of nine low-cost-sensor-based particulate matter monitors. **Aerosol and Air Quality Research**, 20(2), 254–270. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2018.12.0485>

LOPEZ-RESTREPO, S., YARCE, A., PINEL, N., QUINTERO, O. L., SEGERS, A., & HEEMINK, A. W. Urban air quality modeling using low-cost sensor network and data assimilation in the aburrá valley, colombia. *Atmosphere*, 12(1). 2021. <https://doi.org/10.3390/ATMOS12010091>

MARTINEZ-SOTO, A., AVENDAÑO VERA, C. C., BOSO, A., HOFFLINGER, A., & SHUPLER, M. Energy poverty influences urban outdoor air pollution levels during COVID-19 lockdown in south-central Chile. *Energy Policy*, 158, 112571.2021. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112571>

MONTALVO, L., FOSCA, D., PAREDES, D., ABARCA, M., SAITO, C., & VILLANUEVA, E. (2022). An Air Quality Monitoring and Forecasting System for Lima City With Low-Cost Sensors and Artificial Intelligence Models. *Frontiers in Sustainable Cities*, 4. <https://doi.org/10.3389/frsc.2022.849762>

MUÑOZ, C., HUIRCAN, J., JARAMILLO, F., & BOSO, Á. Calibration of Sensor Network for Outdoor Measurement of PM_{2.5} on High Wood-Heating Smoke in Temuco City. *Processes*, 11(8).2023. <https://doi.org/10.3390/pr11082338>

ORTIZ, D., BENITEZ, D. S., FUERTES, W., & TORRES, J. On the Use of Low Cost Sensors for the Implementation of a Real-Time Air Pollution Monitoring System Using Wireless Sensor Networks. *IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)* 2018.

PAGE M.J., MCKENZIE J.E., BOSSUYT P.M., BOUTRON I., HOFFMANN T.C., MULROW C.D., SHAMSEER L., TETZLAFF J.M., AKL E.A., BRENNAN S.E., CHOU R., GLANVILLE J., GRIMSHAW J.M., HRÓBJARTSSON A., LALU M.M., LI T., LODER E.W., MAYO-WILSON E., MCDONALD S., MCGUINNESS L.A., STEWART L.A., THOMAS J., TRICCO A.C., WELCH V.A., WHITING P., MOHER D. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*. 2021 Mar 29;372:n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>.

REECE, S., WILLIAMS, R., COLÓN, M., HUERTAS, E., O'SHEA, M., SHERIDAN, P., SOUTHGATE, D., PORTUONDO, G., DÍAZ, N., & WYRZYKOWSKA, B. Spatial-Temporal Analysis of PM_{2.5} and NO₂ Concentrations Collected Using Low-Cost Sensors in Peñuelas, Puerto Rico. *Sensors*, 2018(18), 4937.2018. <https://doi.org/10.3390/ecsa-4-04937>

ROMERO, Y., VELÁSQUEZ, R. M. A., & NOEL, J. Development of a multiple regression model to calibrate a low-cost sensor considering reference measurements and meteorological parameters. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(8). 2020. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08440-w>

SUBRAMANIAN, R., ELLIS, A., TORRES-DELGADO, E., TANZER, R., MALINGS, C., RIVERA, F., MORALES, M., BAUMGARDNER, D., PRESTO, A., & MAYOI-BRACERO, O. L.. Air quality in Puerto Rico in the aftermath of Hurricane Maria: A case study on the use of lower-cost air quality monitors. *ACS Earth and Space Chemistry*, 2(11). 2018 DOI: 10.1021/acsearthspacechem.8b00079

TAGLE, M., ROJAS, F., REYES, F., VÁSQUEZ, Y., HALLGREN, F., LINDÉN, J., KOLEV, D., WATNE, Á. K., & OYOLA, P. (2020). Field performance of a low-cost sensor in the

monitoring of particulate matter in Santiago, Chile. **Environmental Monitoring and Assessment**, 192(3).2020. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8118-4>

TAVELLA, R. A., DE MOURA, F. R., MIRAGLIA, S. G. E. K., & DA SILVA JÚNIOR, F. M. R. A New Dawn for Air Quality in Brazil. In *The Lancet Planetary Health* (Vol. 8, Issue 10, pp. e717–e718). **Elsevier B.V.**2024. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(24\)00203-1](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(24)00203-1)

VAZQUEZ-VERA, J. L., ESPINOSA-CALDERON, A., DIAZ-CARMONA, J., LOPEZ-FARIAS, R., & HERNANDEZ-PANIAGUA, I. Y. Design of a Low-cost Air Quality Remote Monitoring System based on IOT and Sensor Sensitivity Validation. **2020 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing, ROPEC**. 2020. <https://doi.org/10.1109/ROPEC50909.2020.9258685>

VILLANUEVA, E., ESPEZUA, S., CASTELAR, G., DIAZ, K., & INGAROCA, E. Smart Multi-Sensor Calibration of Low-Cost Particulate Matter Monitors. **Sensors**, 23(7).2023. <https://doi.org/10.3390/s23073776>

WORLD BANK. **The Global Health Cost of PM2.5 Air Pollution: A Case for Action Beyond 2021** (Vol. 1). The World Bank.2022. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1816-5>

YADUMA, N., KORTELAJINEN, M., & WOSSINK, A. (2013). Estimating Mortality and Economic Costs of Particulate Air Pollution in Developing Countries: The Case of Nigeria. **Environmental and Resource Economics**, 54(3), 361–387.2013. <https://doi.org/10.1007/s10640-012-9598-7>

NOTAS

CONTRIBUIÇÃO DE AUTORIA

Concepção e elaboração do manuscrito: C.E.M. Silva, L. P. Genuino, E. M. N. Bandeira.

Coleta de dados: C.E.M. Silva, L. P. Genuino, E. M. N. Bandeira, M. Lima e Silva, M. A. Silva Pessoa.

Análise de dados: C.E.M. Silva, L. P. Genuino, E. M. N. Bandeira, M. Lima e Silva, M. A. Silva Pessoa

Discussão dos resultados: C.E.M. Silva, A.C.V. Bezerra

Revisão e aprovação: C.E.M. Silva, A.C.V. Bezerra

PREPRINTS

O manuscrito não é um preprint.

FINANCIAMENTO

Este trabalho é parte do projeto Rede de Monitoramento de Poluição Atmosférica e Serviços Ecosistêmicos em áreas com diferentes características socioambientais na Cidade do Recife. Financiado pela FACEPE – Fundação de Amparo a Ciência do estado de Pernambuco, através do Auxílio a Pesquisa - APQ - 1759.9-25-22.

CONFLITO DE INTERESSES

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

DISPONIBILIDADE DE DADOS DE PESQUISA E OUTROS MATERIAIS

Os dados já estão disponíveis em repositórios de dados confiáveis.

Título 1: Sensores de baixo custo para monitoramento ambiental na América Latina: uma revisão sistemática de literatura.

URL ou DOI 1: <https://parsif.al/luanapessoa/sensores-de-baixo-custo-para-monitoramento-ambiental-na-america-latina-uma-revisao-sistemica-de-literatura/>

ANUÊNCIA DE AVALIAÇÃO ABERTA

Não.



O conteúdo deste trabalho pode ser usado sob os termos da licença Creative Commons Attribution 4.0. Qualquer outra distribuição deste trabalho deve manter a atribuição ao(s) autor(es) e o título do trabalho, citação da revista e DOI.